

QUANTIFICANDO A VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS ATRAVÉS DO CÁLCULO DA COBERTURA DE VALIDAÇÃO

Gustavo Teodoro Gabriel
gustavo.teodoro.gabriel@gmail.com

Fernanda Rocha
fernandarocha@unifei.edu.br

Tanita Caroline Pires Maciel
tanitamaciel@unifei.edu.br

Milena Silva de Oliveira
mile_4689@hotmail.com

José Arnaldo Barra Montevechi
montevechi@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Avenida BPS, 1303, Itajubá - MG

RESUMO

A validação do modelo computacional é considerada uma etapa, muitas vezes, de difícil realização. Além disso, os objetivos do projeto podem não ser respondidos caso ela não seja feita de forma correta. Assim, quantificar a validação é algo necessário para se ter um parâmetro de quanto o modelo é válido e se as questões iniciais podem, de fato, serem respondidas. Diante disso, o objetivo do artigo é quantificar um modelo de simulação a eventos discretos através de 15 variáveis de saída. Para isso, uma linha de produção de *karts* foi simulada no *software* FlexSim®, com cinco postos de trabalho e cinco operadores. Após a simulação, técnicas de validação foram aplicadas nas saídas das variáveis definidas e o cálculo da cobertura de validação foi realizado. Como resultado, obteve-se um resultado da cobertura de validação de 76,15%.

PALAVRAS CHAVE. Validação computacional, SED, cobertura de validação.
Área principal: SIM - Simulação

ABSTRACT

The computer model validation is frequently considered a difficult step to perform. One step that is often considered difficult to perform is the computer model validation. In addition, the project goal may not be achieved if it is not carried out correctly. Therefore, quantifying validation is something necessary to have a parameter of how much the model is valid and if the initial questions may be answered. In this sense, the purpose of the article is to quantify a discrete event simulation model through 15 output variables. A kart production line was simulated in FlexSim® software, with five workstations and five operators. After the simulation, validation techniques were applied to the outputs of the defined variables and the validation coverage computation was performed. As a result, it obtained a validation coverage score of 76.15%.

KEYWORDS. Computer validation, DES, validation coverage.
Main area: SIM – Simulation

1. Introdução

Melhorar a qualidade de produtos e serviços é uma atividade que está sempre em constante movimentação. Setores industriais, processos administrativos e setores de saúde buscam aumentar a qualidade final de entrega de seus produtos, sejam eles físicos ou serviços. Para que essa busca seja efetiva, é necessário investir em tecnologias e ferramentas que possibilitam aos tomadores de decisões realizar mudanças que impactam no serviço de qualidade. Além disso, os recursos financeiros e a matéria-prima vêm se tornando cada vez mais escassos. Diante desse *trade-off*, a simulação computacional é utilizada tanto para a melhoria quanto para a previsão do comportamento dos processos e produtos. Ela ajuda na otimização dos procedimentos, sem que haja riscos físicos e custos adicionais, uma vez que o processo é modelado através de um *software* computacional, onde testes podem ser realizados antes da implementação da solução final [Banks et al. 2010], [Montevecchi et al. 2007].

Para se obter modelos de simulação que de fato refletem aos processos reais, a validação do modelo computacional deve ser realizada de forma adequada para que os objetivos do estudo sejam garantidos [Law 2015]. Dessa maneira, a validação do modelo computacional é definida como o processo de comprovar que o modelo se comporta com precisão satisfatória, consistente com os objetivos do projeto, dentro dos limites de sua aplicabilidade [Banks et al. 2010]. Para [Goldsman et al. 2017], o principal aspecto que afeta a estratégia de validação do modelo computacional é a possibilidade de se observar e obter as saídas do sistema real. Ainda, uma dificuldade apresentada por Balci [2004] é a quantificação da validação de um modelo de simulação. O autor afirma que é difícil um modelo de simulação apresentar numericamente a confiança de um modelo. Apesar disso, [Raunak e Olsen 2014] apresentam uma metodologia para o cálculo da cobertura de validação de um modelo de simulação, podendo assim, apresentar um valor final (em porcentagem) do quanto o modelo é validável.

Diante disso, o objetivo deste artigo é quantificar um modelo de simulação a eventos discretos através de 15 variáveis de saída. Para isso, foi construído um modelo de uma linha de produção de *karts* (controlada em laboratório). Foram obtidos, através de filmagens, dados reais de 12 rodadas, onde serviram de métricas para a validação e a entrada dos tempos de produção de cada posto de trabalho. O modelo foi simulado no *software* FlexSim® com 30 réplicas. Após a simulação, técnicas de validação foram aplicadas nas saídas das 15 variáveis definidas e o cálculo da cobertura de validação foi realizado.

O artigo está dividido da seguinte forma: a seção 1 apresentou a introdução e contextualização do problema. A seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica, definindo os conceitos de Simulação a Eventos Discretos e a etapa de validação do modelo computacional. Logo em seguida, na seção 3, há a metodologia definida por [Raunak e Olsen 2014] e aplicada no objeto de estudo, explicado na seção 4. Por fim, na seção 5, apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Simulação a eventos discretos (SED)

A simulação a eventos discretos (SED) é uma ferramenta utilizada para projeto e avaliação de sistemas, assim como para reconfiguração de *layout* ou mudanças no controle e/ou regras de operação, adição de máquinas ao processo, redução do número de colaboradores da equipe, ou aumento na demanda. Os modelos de simulação são formas de representar uma operação existente, uma operação em construção ou até mesmo uma operação hipotética do sistema. Elas podem ser representações matemáticas, lógicas ou simbólicas, permitindo que o modelo seja analisado sem a necessidade de um sistema real, reduzindo os riscos e os custos que a mudança de um sistema pode causar [Laurindo et al 2018].

As suas aplicações têm crescido em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas complexos e possibilitando um melhor conhecimento dos processos nas

organizações [Sakurada e Miyake 2009]. Além disso, tem sido usada no estudo de uma variedade de sistemas como, terminais de aeroportos [Tomasella et al, 2017], cuidados de saúde [Richardson and Cohn, 2018], entre outros, com o objetivo de otimizar o desempenho do sistema, diagnosticar problemas e avaliar alternativas [Padilla et al., 2016]. Ainda, a simulação pode ser usada para dimensionar um sistema, melhorar o uso de equipamentos e também demonstrar o potencial para a instalação de novos equipamentos [Na e Shinozuka, 2009].

Como vantagem, essa ferramenta apresenta o estudo de sistemas complexos com eventos probabilísticos, os quais não podem ser tratados adequadamente por meio de métodos analíticos, mas podem ser estudados via simulação. Fornece um controle maior sobre as condições experimentais do que seria possível na experimentação do sistema real e permite a replicação precisa dos experimentos, sendo possível testar cenários para o sistema. Além de permitir também simular longos períodos em um tempo reduzido [Assumpção e Jacobs 2019].

2.2. Validação computacional

A validação do modelo computacional é uma etapa crucial dentro da SED, uma vez que cenários futuros e mudanças nos sistemas só surgirão efeito se o modelo computacional for igual ao processo real. Assim, [Sargent 2013] afirma que validar um modelo é avaliar o quanto ele se aproxima de um sistema real, assegurando que o modelo está apto a responder as perguntas para aquilo em que foi desenvolvido. Para que essas respostas sejam efetivas e alcance o objetivo do processo, a validação deve ser contínua e deve ser aplicada através do seu desenvolvimento e uso [Robinson 2014].

Diversas técnicas podem ser utilizadas para a validação de um modelo computacional, as quais podem ser empregadas em conjunto ou separadamente. Validação face a face usando especialistas no assunto, validação de dados de entrada através de testes de adequação, análise de sensibilidade, testes de condições extremas, animação gráfica e comparação com outros modelos são técnicas citadas por [Law 2015], [Sargent 2013] e [Balci 2004]. De fato, ao utilizar as técnicas de validação, as saídas geradas pelo modelo computacional podem ser comparadas com o processo real para garantir que o modelo reflete a realidade [Leal et al. 2011].

A precisão e a confiança do modelo podem ser desenvolvidas pelos modeladores a partir de um constante processo de validação e verificação. Contudo, é muito difícil definir numericamente o nível de confiança da validação do modelo [Balci 2004]. Dessa forma, [Balci 2004] afirma que o modelo deve ser classificado com termos nominais como “alto”, “excepcional” e “notável”. Apesar disso, [Raunak e Olsen 2014] propõe em seu trabalho cinco passos para a validação do modelo computacional para SED que leva a um número final, denominado cobertura de validação.

3. Metodologia

Como mencionado na seção anterior [Raunak e Olsen 2014] propõe um passo a passo (Figura 1) para a cobertura de validação de um modelo de SED. As cinco etapas são apresentadas na sequência, com uma descrição de cada uma delas.

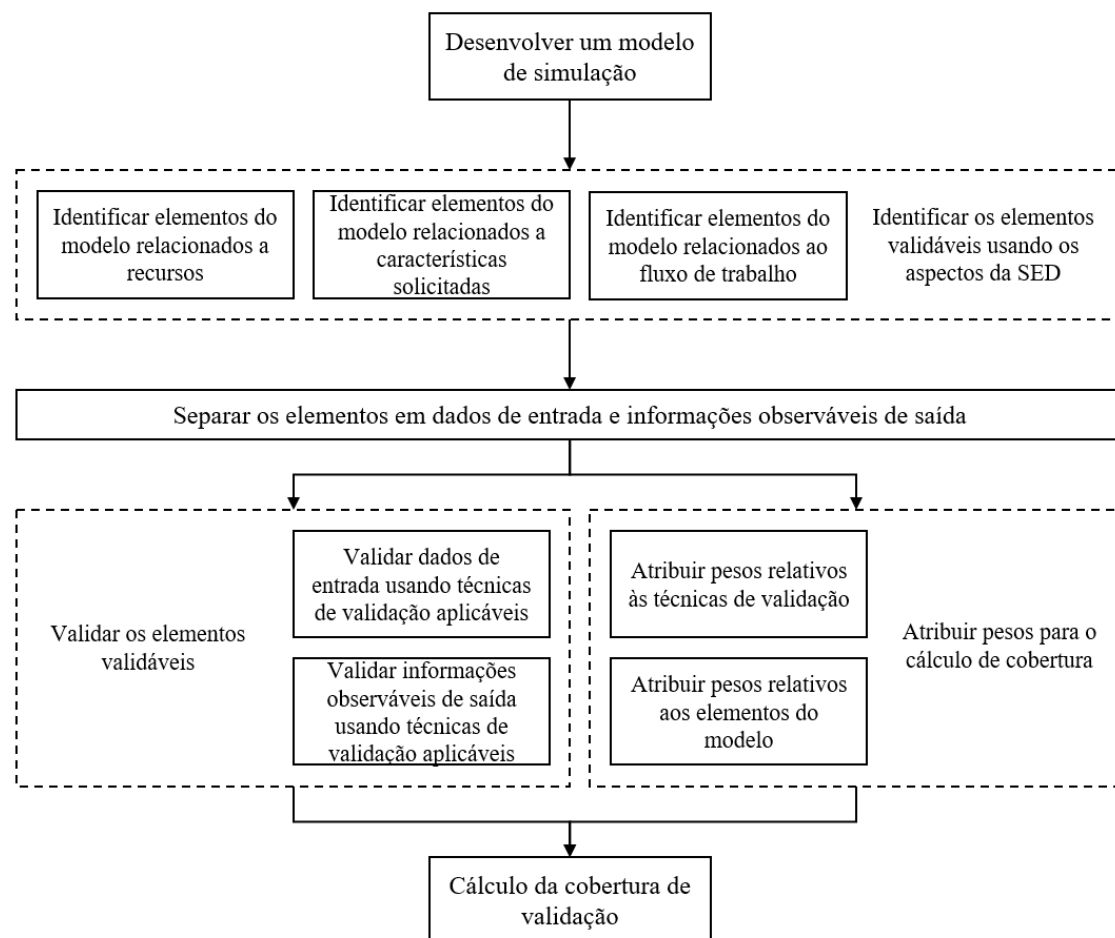
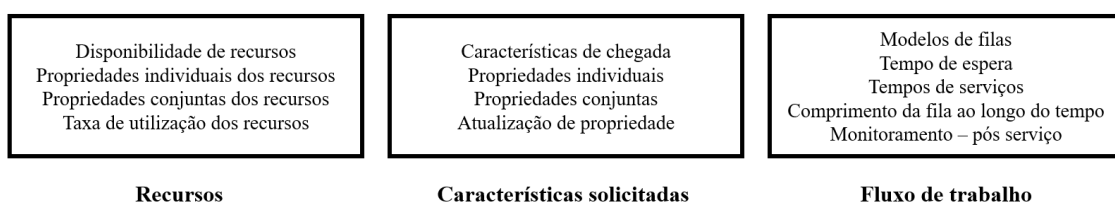


Figura 1 – Passo a passo para o cálculo da cobertura de validação
Fonte: [Raunak e Olsen 2014]

3.1. Etapa 1: Definição dos elementos do modelo que podem ser validados

A primeira etapa visa identificar os aspectos e elementos do modelo de simulação que podem ser validados, sendo eles: recursos, fluxo de trabalho e características solicitadas. Os recursos são aqueles que fornecem serviços e apoio para a condução das operações [Schriber et al. 2016], [Harrel et al. 2012]. A maioria dos processos de SED apresentam fluxo de trabalho que são caracterizados como tempo de serviços e processamento e tempo de espera [Raunak e Olsen 2014]. As características solicitadas estão ligadas as entidades que passam pelo fluxo de trabalho e que utilizam os recursos disponíveis, ou seja, as que são processadas ao longo do sistema [Raunak e Olsen 2014], [Harrel et al. 2012]. Esses elementos podem ser classificados como dados de entrada (*id*) e informações observáveis de saída (*oei*). A Figura 2 apresenta os elementos propostos por [Raunak e Olsen 2014].



Recursos

Características solicitadas

Fluxo de trabalho

Figura 2 – Aspectos propostos e tipos de elementos para SED

Fonte: [Raunak e Olsen 2014]

3.2. Etapa 2: Aplicabilidade da técnica de validação

[Raunak e Olsen 2014] afirmam que é necessário determinar técnicas apropriadas para a validação de cada elemento agrupados em um aspecto, definidos na Etapa 1. Além disso, cabe ao modelador determinar qual técnica se aplica a cada caso individualmente.

3.3. Etapa 3: Maximização da cobertura da validação no modelo

Na metodologia proposta, é necessário desenvolver as etapas 1 e 2 de forma objetiva, aplicando a técnica escolhida para a validação, validando o modelo e em seguida calculando a sua pontuação [Raunak e Olsen 2014]. Para se determinar quais técnicas estão disponíveis para a validação, os autores propõem peso relativo para cada uma, de acordo com o trabalho de Law e Sargent [Sargent 2010] e [Law 2009]. A Tabela 1 apresenta os pesos relativos para cada técnica. Vale ressaltar que as técnicas que são usadas com mais frequência apresentam pesos relativos mais altos.

Tabela 1 – Técnicas de validação com pesos relativos

	Técnica de Validação	Abreviação	Peso Relativo
Dados de entradas (id)	Validação face a face usando especialista	VFF- <i>id</i>	2
	<i>Goodness-of-fit</i> (Teste de sensibilidade)	GoF	3
	Animação	AN	1
Informações observáveis de saída (oei)	Análise de sensibilidade	AS	2
	Teste de Condição Extrema	CE	2
	Validação face a face usando especialista	VFF- <i>oei</i>	2
	Comparação com a saída de outro modelo	CM	3
	Validação dos resultados (teste estatístico)	VR	4

Fonte: [Raunak e Olsen 2014]

3.4. Etapa 4: Determinar os pesos relativos

Os pesos relativos a serem determinados leva em consideração a importância de cada elemento (identificado na Etapa 1) dentro do modelo de simulação. Cabe ao modelador definir, de forma subjetiva, qual elemento é o mais importante e quais tem pesos inferiores e/ou iguais. Valores numéricos e uma escala podem ser utilizados nessa etapa [Raunak e Olsen 2014].

3.5. Etapa 5: Cálculo da cobertura de validação

O cálculo da cobertura de validação do modelo computacional deve ser feito após as seguintes atividades serem identificadas [Raunak e Olsen 2014]:

- Elementos que devem ser validados;
- Possíveis técnicas de validação aplicáveis para validar cada elemento;
- Técnicas de validação que foram bem-sucedidas quando utilizadas.

Cada aspecto da etapa 1 define um conjunto de tipos de elementos validáveis $\{va_k = \{et_1^k, et_2^k, \dots, et_i^k\}\}$. Assim, et_i^k é um tipo de elemento válido em k aspectos. Os k aspectos variam de 1 a 3 e representam recursos, características solicitadas e fluxo de trabalho de acordo com o *framework* proposto por [Raunak e Olsen 2014]. Para um modelo de simulação, os modeladores podem definir cada tipo de elemento do aspecto va_k que devem ser validados. Assim, et_i^k representa os conjuntos de elementos que exigem validação, onde i é a quantidade de elementos

que devem ser validados em cada aspecto. Se alguns dos aspectos não for escolhido para validação, como por exemplo, recursos, o seu et_i^k será vazio.

Os autores ainda afirmam que algumas técnicas de validação são mais compreensíveis que outras. Dessa forma, cada técnica de validação (v_{ijl}^k) tem o seu próprio peso w_l . l corresponde ao número de técnicas de validação aplicáveis para o elemento j do tipo de elemento i . Também, os elementos validáveis são levados em consideração na importância do cálculo final. Assim, r_j é o peso de cada elemento validável. Ainda, a cobertura da validação (cv) é baseada no sucesso ou fracasso do uso da técnica de validação. v_{ijl}^k pode variar de 1 a 0, onde 1 representa o sucesso da técnica e 0 o fracasso ou não uso da mesma.

Por fim, para calcular a cobertura de validação, é comparado quanto cada elemento é validável com base em quantas técnicas de validação relevantes (ponderadas) foram utilizadas para cada elemento (ponderado). Assim, o cálculo final para a cobertura de validação do modelo é dado pela Equação 1:

$$cv = \frac{\sum_{ijk} r_{ij}^k \frac{1}{\sum_l w_l} \sum_l w_l a(v_{ijl}^k)}{\sum_{ijk} r_{ij}^k} \quad (1)$$

A cobertura de validação é a porcentagem das técnicas de validação aplicadas de forma ponderada com sucesso em cada elemento que também foi ponderado, variando de 0 a 1. [Raunak e Olsen 2014] dizem que se o cv atende ao limite pré-estabelecido do projeto, uma validação suficiente foi realizada no modelo de simulação. Os autores ainda afirmam que esse processo pode definir faixas de valores numéricos para os termos nominais como “excepcional”, “alto” e “notável” definidos por [Balci 2004].

4. Resultados e Discussões

4.1. Estudo de caso

O modelo estudado e simulado representa uma linha de montagem de *karts* utilizando peças Lego®, composta por 5 postos de trabalho, sendo os 4 primeiros divididos entre as tarefas de montagem e o último corresponde a inspeção. Para a reposição de matéria-prima, há um estoque central no qual as peças dos 4 primeiros postos ficam agrupadas em lotes de 8 unidades. Quando necessária a reposição, os operadores se deslocam do posto de trabalho até ao estoque central para a reposição dos kits. Além disso, entre cada posto de trabalho há um estoque intermediário, onde o que cada operador produziu fica aguardando para a produção no próximo posto. A linha tem como capacidade total a produção de 40 unidades.

O processo se inicia no posto 1 com um fluxo empurrado, isto é, a produção ocorre de maneira contínua independente do consumo do processo seguinte. Ocasionalmente há uma quebra de máquina neste posto e, quando isso acontece, o operador 1 deve parar a produção até que o problema na máquina seja resolvido. Já no posto 2 o fluxo é puxado, ou seja, o operador 2 só inicia a montagem quando o operador 3 puxa a peça produzida no processo anterior. Em seguida o processo vai para o posto 3, que produz em lotes de 2 unidades. Neste posto há um *kanban* que tem a função de sinalizar para o operador 4 a cada lote produzido. Com isso, o operador 4 se desloca até o estoque intermediário do posto 3, leva o lote de duas unidades para o seu posto, finalizando a produção dos *karts* em lotes de 4 unidades. A cada lote produzido, o operador 5 inicia o processo de inspeção, realizando medições, verificando o funcionamento e a qualidade dos *karts*. Os *karts* aprovados são embalados e conduzidos em lotes de 4 unidades até a área de logística. Se o *kart* for reprovado, o operador 5 leva o produto até a área de rejeitos. A taxa de retrabalho neste processo é de 10%. A Figura 3 mostra o modelo conceitual do processo utilizando a técnica de modelagem IDEF-SIM [Gabriel 2018], [Montevecchi et al. 2010] e [Leal 2008].

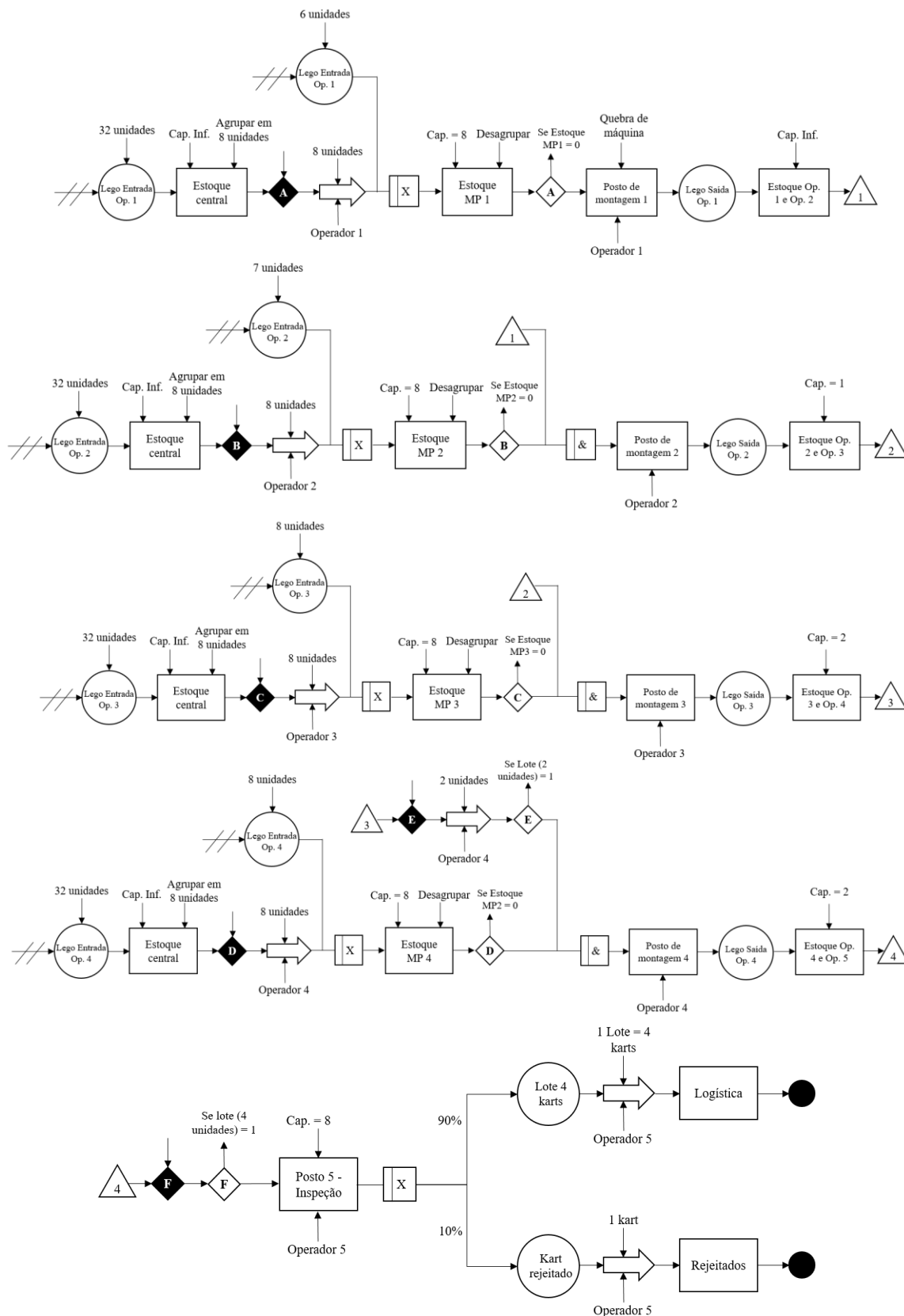


Figura 3 – Modelagem conceitual do processo simulado

Figura 4 apresenta a tela do modelo simulado no *software* FlexSim®.

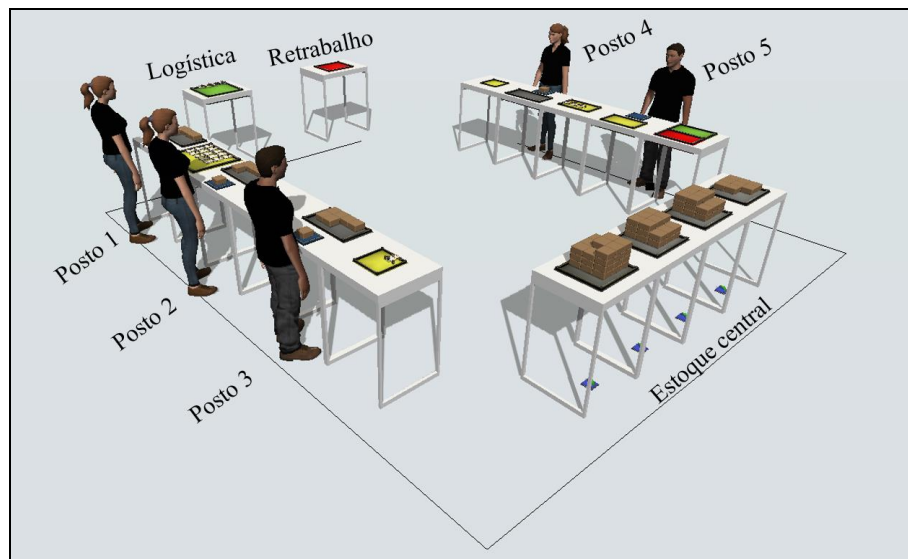


Figura 4 – Tela do modelo simulado no FlexSim®

4.2. Definição dos elementos do modelo que podem ser validados

Para a validação do modelo computacional do processo descrito na seção 4.1, definiu-se como parâmetros de avaliação as seguintes métricas:

- Porcentagem de ociosidade dos operadores 1, 2, 3, 4 e 5 ($et_{5,1}^1$);
- Porcentagem de deslocamento dos operadores 1, 2, 3, 4 e 5 ($et_{5,2}^1$);
- Taxa da primeira quebra de máquina do posto 1 ($et_{1,1}^2$);
- Taxa entre quebras de máquina do posto 1 ($et_{1,2}^2$);
- Tempo de produção de 40 karts ($et_{1,1}^3$);
- Lead time do primeiro kart ($et_{1,2}^3$);
- Lead time do último kart ($et_{1,3}^3$).

Para a taxa da primeira quebra de máquina e taxa entre quebras foi considerado como um dado de entrada (*id*). Para todos os outros parâmetros foram considerados como informações observáveis de saída (*oei*).

A Figura 5 mostra a divisão dos elementos em seus respectivos aspectos.

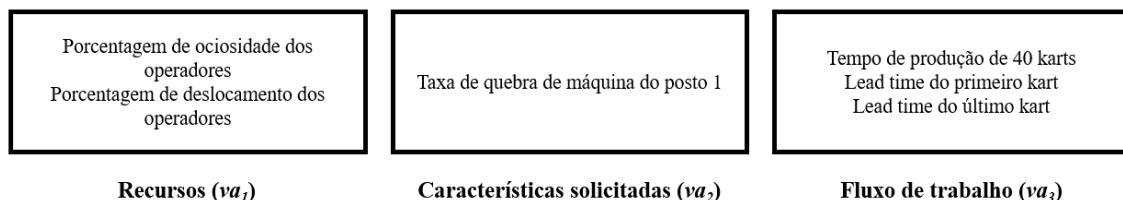


Figura 5 – Aspectos e elementos relevantes para o modelo

4.3. Aplicabilidade da técnica de validação

Como dito anteriormente, cada elemento pode ser validado por técnicas diferentes. Assim, foi definido as técnicas para cada um dos $et_{i,j}^k$, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Definição das técnicas utilizadas para cada elemento validável.

Elementos do Modelo	Técnicas de validação aplicáveis
Porcentagem de ociosidade dos operadores	AS, CE, CM, VR
Porcentagem de deslocamento dos operadores	AS, CE, VFF-oei, CM, VR
Taxa de quebra de máquina do posto 1	VFF-id, GoF
Taxa entre quebras de máquina do posto 1	VFF-id, GoF
Tempo de produção de 40 karts	AS, CM, VR
Lead time do primeiro kart	AS, CE, CM, VR
Lead time do último kart	AS, CE, CM, VR

4.4. Maximização da cobertura da validação no modelo

Os pesos aplicados para cada técnica de validação foram definidos de acordo com a Tabela 1 da seção 3.3.

4.5. Determinar os pesos relativos

A importância de cada elemento dentro do modelo foi definida de acordo com uma escala de 1 a 5, onde 1 é considerado pouca importância e 5 de extrema importância. Assim, as porcentagens de ociosidade dos operadores foram definidas de forma separadas. O operador 1, como se sabe, apresenta um fluxo empurrado e um tempo de ciclo baixo em relação aos outros, dessa forma, a importância para esse operador foi de 1. Para os operadores 2 e 4, que operam de acordo com o gargalo (operador 3), houve uma nota de importância igual a 3. Como o operador 3 é o gargalo, o tempo de ociosidade desse posto recebeu uma nota de importância 4. Por fim, o operador 5 recebeu uma nota de importância 2.

Em relação à porcentagem de deslocamento dos operadores, o mesmo procedimento foi realizado. Como os operadores 1, 2 e 3 se deslocam apenas para a reposição do material, a nota dada para eles foi de 1. O operador 4 é o que mais se desloca dentro da linha de montagem. Dessa forma, recebeu a importância 3, enquanto o operador 5 recebeu uma nota 2.

A taxa da primeira quebra de máquina e a taxa entre quebras receberam nota 3, pois impacta diretamente na ociosidade e bloqueio do operador 1. Os fatores mais importantes que receberam nota 5 foram o tempo de produção dos 40 produtos e o *lead time* do último kart. O tempo do *lead time* do primeiro kart tem uma importância 4 dentro do modelo.

4.6. Cálculo da cobertura de validação

Para a última etapa do método, utilizou-se os dados resultantes da Tabela 3. A Tabela 3 mostra os elementos validáveis, sua categoria, o peso relativo de cada um, as técnicas de validação aplicáveis, as técnicas aplicadas e a pontuação média obtida através de cada técnica.

Apesar de poder ser realizada, a análise de sensibilidade não foi analisada para nenhum elemento validável. Para a condição extrema, não houve reposição de materiais, esperando assim que os operadores trabalhem menos tempo. Para a comparação com outro modelo, dobrou-se a quantidade de materiais obtidos e observou-se os parâmetros escolhidos. Em relação a validação dos resultados, foi utilizado um teste 2 *sample-t*, comparando as saídas do modelo de simulação com o modelo real. Um teste de normalidade foi realizado em todos os parâmetros. Todos os parâmetros se adequaram a normalidade, com exceção da ociosidade do operador 1 para os dados simulados e o *lead time* do primeiro kart, tanto para os dados simulados quanto para os dados reais. Assim, realizou-se um teste *Mann-Whitney* para essas exceções. Foram realizadas 30 réplicas para o modelo computacional. Para os testes estatísticos, a ociosidade dos operadores 3 e 5 e o deslocamento dos operadores 1, 2 e 3 não foram validados.

Tabela 3 - Cálculo da Cobertura da Técnica de Validação por Elemento

Elementos	Categoria	Peso	Técnicas Aplicáveis	Técnicas Aplicadas	Pontuação
Ociosidade Op. 1	oei	1	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+4}{2+2+3+4} = 0,73$
Ociosidade Op. 2	oei	3	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+3+4}{2+2+3+4} = 0,73$
Ociosidade Op. 3	oei	4	AS, CE, CM, VR	CE, CM	$\frac{2+2+3+4}{2+2} = 0,36$
Ociosidade Op. 4	oei	3	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+3+4}{2+2+3+4} = 0,73$
Ociosidade Op. 5	oei	2	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+3+4}{2+2} = 0,36$
Deslocamento Op. 1	oei	1	AS, CE, VFF-oei, CM, VR	CE, VFF-oei, VR	$\frac{2+2+2+3+4}{2+2+2+2} = 0,46$
Deslocamento Op. 2	oei	1	AS, CE, VFF-oei, CM, VR	CE, VFF-oei, VR	$\frac{2+2+2+3+4}{2+2+2+2} = 0,46$
Deslocamento Op. 3	oei	1	AS, CE, VFF-oei, CM, VR	CE, VFF-oei, VR	$\frac{2+2+2+3+4}{2+2+2+2} = 0,46$
Deslocamento Op. 4	oei	3	AS, CE, VFF-oei, CM, VR	CE, VFF-oei, CM, VR	$\frac{2+2+2+3+4}{2+2+2+3+4} = 0,85$
Deslocamento Op. 5	oei	2	AS, CE, VFF-oei, CM, VR	CE, VFF-oei, CM, VR	$\frac{2+2+2+3+4}{2+2+2+3+4} = 0,85$
Taxa de quebra	id	3	VFF-id, GoF	VFF-id, GoF	$\frac{2+3}{2+3} = 1,00$
Taxa entre quebras	id	3	VFF-id, GoF	VFF-id, GoF	$\frac{2+3}{2+3} = 1,00$
Tempo de produção	oei	5	AS, CM, VR	CM, VR	$\frac{3+4}{3+4} = 1,00$
Lead Time primeiro	oei	4	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+3+4}{2+2+3+4} = 0,82$
Lead Time último	oei	4	AS, CE, CM, VR	CE, CM, VR	$\frac{2+2+3+4}{2+2+3+4} = 0,82$

Por fim, para realizar o cálculo da cobertura de validação (Equação 1), deve-se multiplicar o peso do elemento pela sua pontuação e dividir pelo peso total (Tabela 4):

Tabela 4 - Cálculo da Cobertura de Validação

Elementos	Peso	Pontuação	Multiplicação
Ociosidade Op. 1	1	0,73	1*0,73 = 0,73
Ociosidade Op. 2	3	0,73	3*0,73 = 2,19
Ociosidade Op. 3	4	0,36	4*0,36 = 1,44
Ociosidade Op. 4	3	0,73	3*0,73 = 2,19
Ociosidade Op. 5	2	0,36	2*0,36 = 0,72
Deslocamento Op. 1	1	0,46	1*0,46 = 0,46
Deslocamento Op. 2	1	0,46	1*0,46 = 0,46
Deslocamento Op. 3	1	0,46	1*0,46 = 0,46
Deslocamento Op. 4	3	0,85	3*0,85 = 2,55
Deslocamento Op. 5	2	0,85	2*0,85 = 2,55
Taxa de quebra	3	1,00	3*1,00 = 3,00
Taxa entre quebras	3	1,00	3*1,00 = 3,00
Tempo de produção	5	1,00	5*1,00 = 5,00
Lead Time primeiro	4	0,82	4*0,82 = 3,28
Lead Time último	4	0,82	4*0,82 = 3,28
Soma	40		30,46

$$cv = \frac{30,46}{40} = 0,7615$$

De acordo com o cálculo da cobertura de validação, o modelo simulado apresentou um valor de 76,15% da validação total. Assim, pode-se categorizar o modelo em um modelo de alta validação [Balci 2004].

5. Conclusão

O presente trabalho visou aplicar o método desenvolvido por [Raunak e Olsen 2014] para o cálculo da cobertura de validação de um modelo de simulação a eventos discretos. Assim, um modelo de uma linha de montagem foi filmado e obtidos dados reais de 12 rodadas. A partir dos dados coletados, foi possível obter 15 elementos validáveis que foram divididos em três aspectos. Ainda, cada elemento foi categorizado em dados de entrada (*id*) e ou informações observáveis de saída (*oei*).

As técnicas de validação que cada elemento poderia passar foi definida e o seus respectivos pesos foram definidos de acordo com o estudo proposto por [Sargent 2010] e [Law 2009] e apresentados por [Raunak e Olsen 2014]. Ainda, de acordo com os critérios dos autores, houve a definição do peso de cada elemento validável (importância dentro do modelo). Dessa forma, os elementos mais importantes do sistema foram definidos como: tempo de produção do lote de 40 karts; *lead time* do primeiro e do último kart produzido.

Após as definições dos pesos e técnicas utilizadas, o cálculo de cobertura do modelo foi realizado. Assim, obteve-se uma nota para o modelo de 76,15%. Dessa forma, pode-se dizer que o modelo é considerado válido na sua maior parte, sendo categorizado como um modelo de alta validação [Balci 2004]. Vale ressaltar que para os testes estatísticos, a ociosidade dos operadores 3 e 5 e o deslocamento dos operadores 1, 2 e 3 não foram validados. Apesar de não ter sido validado pelo deslocamento dos operadores 1, 2 e 3, esses elementos foram o que apresentaram menos importância dentro do modelo. De fato, os deslocamentos desses operadores são relativamente pequenos em relação as outras métricas. Em relação a ociosidade do operador 3 e 5, esses elementos receberam importância 4 e 2, respectivamente. Isso pode causar um impacto direto se decisões forem tomadas em cima da ociosidade desses operadores.

Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se a validação do modelo pela análise sensitiva, técnica de validação que não foi testada. Além disso, sugere-se investigar o porquê da não validação estatística dos 5 elementos apresentados anteriormente. Cabe investigar se é necessária uma nova coleta de dados para esses elementos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio dado à essa e outras pesquisa.

Referências

- Assumpção, L. E.; Jacobs, W. (2019). Estudo comparativo entre layouts sob a ótica da teoria das restrições com apoio de simulação de eventos discretos em empresa de alimentos. *Revista Produção Online*, v.19, n.1, p.152-178.
- Balci, O. (2004). Quality Assessment, Verification, and Validation of Modeling and Simulation Application. In: *Proceedings of Winter Simulation Conferences*, DC, USA, p.122-129.
- Banks, J.; Carson II, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M. (2010) Discrete-event Simulation. 5. ed., New Jersey: Pearson Prentice-Hall.
- Gabriel, G. T. (2018). Documentação da lógica de modelos de simulação por meio do uso da técnica de modelagem IDEF-SIM. 123 f. *Dissertação* (Dissertação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG.

- Goldsman, D. M.; Yaacoub, T.; Sargent, R. G. (2017). A tutorial on the operational validation of simulation models. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Las Vegas, NV, USA, p.163-167.
- Harrell, C.; Ghosh, B. K.; Bowden, R. (2012). Simulation using ProModel. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Laurindo, Q. M. G.; Peixoto, T. A.; Rangel, J. J. A. (2018). Communication mechanism of the discrete event simulation and the mechanical project softwares for manufacturing systems. *Journal of computational Design and Engineering*, v.6, p.70-80.
- Law, A. (2009). How to build valid and credible simulation models. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Austin, TX, USA, p.24-33.
- Law, A. (2015). Simulation modeling and analysis. Boston: McGraw-Hill Education.
- Leal, F. Análise do efeito de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados. (2008). 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP.
- Montevecchi, J. A. B.; Pinho, A. F. de; Leal, F.; Marins, F. A. S. (2007). Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Washington, DC, USA, p.1601-1609.
- Montevecchi, J. A. B.; Leal, F.; Pinho, A. F. de; Costa, R. F. da S.; Oliveira, M. L. M. de; Silva, A. L. F. da. (2010). Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Baltimore, MD, USA, p.1624-1635.
- Na, U. J., & Shinozuka, M. (2009). Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system. *Reliability Engineering and System Safety*, v.9, n.3, p.722-731.
- Padilla, J. J., Lynch, C. J., Diallo, S. Y., Gore, R. J., Barraco, A., Kavak, H., & Jenkins, B. (2016). Using simulation games for teaching and learning discrete-event simulation. In: *Winter Simulation Conference*, Washington, DC, USA, p.3375-3384.
- Raunak, M.; Olsen, M. (2014). Quantifying validation of discrete event simulation models. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Savannah, GA, USA, p.628-639.
- Richardson, D.B.; Cohn, A.E.M. (2018). Modeling the impact of make-ahead chemotherapy drug policies through discrete-event simulation. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Gothenburg, Sweden, p.2690-2700.
- Robinson, S. (2014). Simulation: The Practice of Model Development and Use. 2. ed. Palgrave Macmillan.
- Sakurada, N.; Miyake, D. I. (2009). Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. *Gestão da Produção*, v.16, n.1, p.25-43.
- Sargent, R. G. (2010). Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Baltimore, MD, USA, p.166-183.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v.7, n.1, p.12-24.
- Tomasella, M.; Hancock, P., Hristova, B.; Vancova, Z.; Buke, B. (2017). Enhancing the toolkit of airport operations analysts: evidence from an airport baggage handling system improvement project. In: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Las Vegas, NV, USA, p.2542-2553.