

## MODELAGEM DO RITMO DO TRABALHO HUMANO EM UM PROJETO DE SIMULAÇÃO ATRAVÉS DE MÚLTIPLAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE ESTATÍSTICA

### MODELING THE RHYTHM OF HUMAN WORK IN A SIMULATION PROJECT THROUGH MULTIPLE STATISTICAL PROBABILITY DISTRIBUTIONS

Flávio Fraga Vilela\* E-mail: [flavaofraga@unifei.edu.br](mailto:flavaofraga@unifei.edu.br)

Fabiano Leal\* E-mail: [fleal@unifei.edu.br](mailto:fleal@unifei.edu.br)

José Arnaldo Barra Montevechi\* E-mail: [montevechi@unifei.edu.br](mailto:montevechi@unifei.edu.br)

\*Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG

**Resumo:** Normalmente, projetos de simulação a eventos discretos (SED) consideram funcionários como recursos comuns. Esta premissa, torna-se um problema na modelagem de sistemas de produção, sobretudo se o processo a ser modelado apresenta uma alta parcela de trabalho manual. Neste contexto, esta pesquisa aplica um método de validação computacional para fazer uma análise dos *outputs* de um modelo de simulação quando diferentes distribuições estatísticas, representadas em quatro cenários, são utilizadas nos tempos de entrada. O modelo simulado foi obtido a partir de uma linha de montagem, de uma empresa do ramo da eletrônica situada na cidade de Santa Rita do Sapucaí-MG. Por conseguinte, o objetivo da presente pesquisa é definir e aplicar uma abordagem para consideração da variação do ritmo de trabalho humano em projetos de SED. Para tanto, foram criados quatro cenários, cada qual com suas respectivas distribuições. Essas distribuições estatísticas foram geradas a partir da ferramenta *StatFit*®, que usou dados cronometrados da jornada de trabalho na qual a linha de montagem estava submetida. Como método de pesquisa foi usado a modelagem e simulação com o uso de dados reais. Por fim, os resultados da validação computacional mostram que houve validação apenas para o Cenário 3 em todas as considerações para o nível de confiança utilizado na validação, o que corrobora as premissas iniciais sobre a variação do ritmo de trabalho humano e sua influência na validação do modelo computacional.

**Palavras-chave:** Ritmo do Trabalho. Validação Computacional. Simulação a Eventos Discretos.

**Abstract:** Normally, discrete event simulation (DES) projects consider employees as common resources. This considered premise becomes a problem in the modeling of production systems, especially if the process to be modeled presents a high amount of manual work. In this context, this research applies a computational validation method to analyze the outputs of a simulation model when different statistical distributions, represented in four scenarios, are used in the input times. The simulated model was obtained from an assembly line of an electronics company located in the city of Santa Rita do Sapucaí-MG. Therefore, the objective of this research is to define and apply an approach to consider the variation in the pace of human work in DES projects. For this purpose, four scenarios were created, each with their respective distributions. These statistical distributions were generated from the *StatFit*® tool, which used timed data from the workday in which the assembly line was submitted. As research method, modeling and simulation using real data was used. Finally, the results of the computational validation show that there was validation only for Scenario 3 in all considerations for the level of confidence used in the validation, which corroborates the initial

assumptions about the variation in the pace of human work and its influence on the validation of the computational model.

**Keywords:** Pace of Work. Computational Validation. Discrete Event Simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Normalmente, projetos de simulação a eventos discretos (SED) consideram funcionários como recursos comuns. Esta premissa considerada, torna-se um problema na modelagem de sistemas de produção, sobretudo se o processo a ser modelado apresenta uma alta parcela de trabalho manual, como no caso de uma linha de montagem (BAINES *et al.*, 2004). Por conseguinte, é imperativo melhorar a confiabilidade do projeto de simulação, por meio de uma representação mais assertiva do comportamento do operador.

Com o intuito de melhorar a confiabilidade dos modelos de SED, referentes a sistemas que fazem uso de trabalho humano, esta pesquisa aplica uma modelagem sistemática nos dados de entrada do modelo computacional para mostrar a influência da variação do ritmo do trabalhador na validação computacional de um projeto SED. Logo, o objetivo da presente pesquisa é definir e aplicar uma abordagem que utiliza distribuições de probabilidade para vários períodos do dia, de tal forma a considerar a variação do ritmo do trabalho humano em projetos de simulação a eventos discretos. A premissa é que a consideração da variação do ritmo de trabalho humano, através do uso de várias distribuições de probabilidade para os tempos operacionais (dados de entrada), pode melhorar a confiabilidade do modelo, demonstrada através de um teste de validação. Como método de pesquisa foi usado a modelagem e simulação segundo as definições dos autores Turrione e Mello (2012) e dados reais foram coletados de uma linha de montagem de uma empresa de médio porte, situada no “Vale da Eletrônica”.

Por fim, os resultados da validação computacional mostram que houve validação apenas para o Cenário 3 em todas as considerações para o nível de confiança utilizada na validação, o que corrobora as premissas iniciais sobre a variação do ritmo de trabalho humano e sua influência na validação do modelo computacional.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

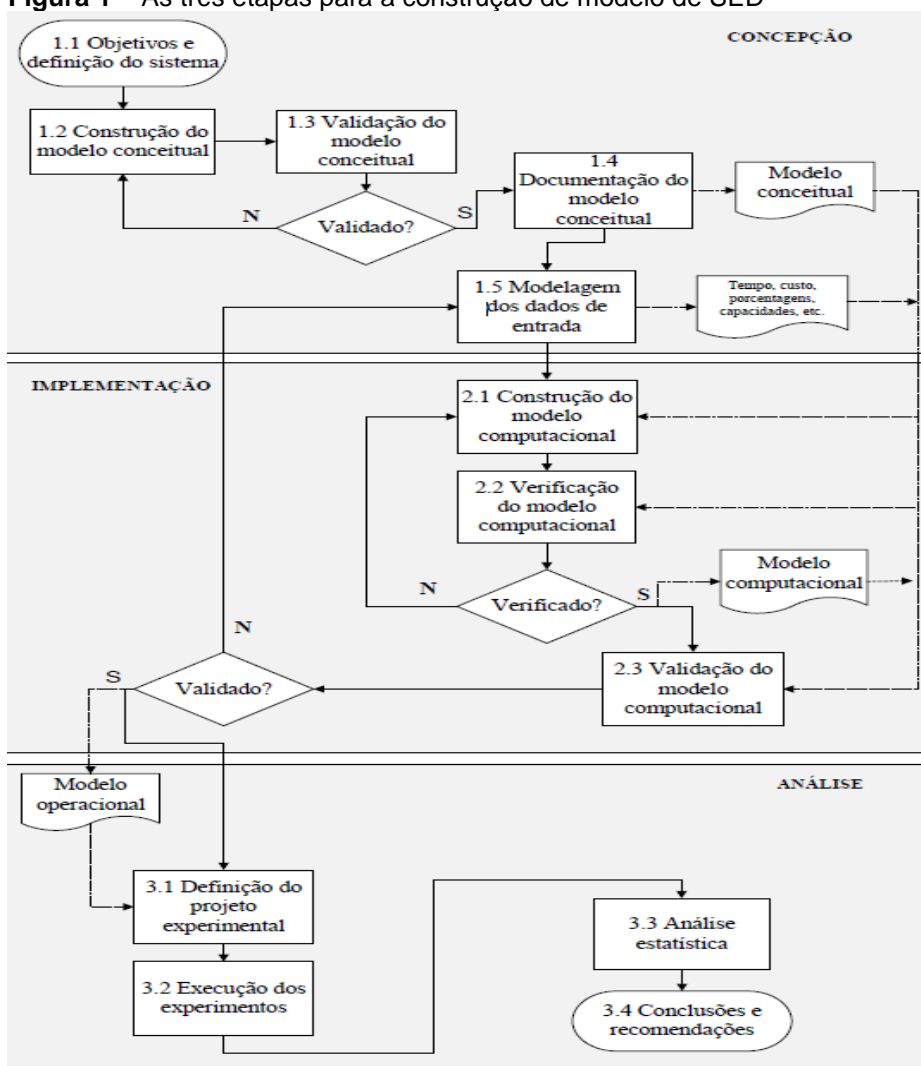
### 2.1 Modelagem e simulação a eventos discretos

Segundo Hillier e Lieberman (2001), a simulação a eventos discretos (SED) é uma técnica extremamente versátil, podendo ser utilizada para investigar praticamente qualquer tipo de sistema estocástico. Essa versatilidade fez da simulação a técnica de pesquisa operacional mais utilizada para estudos que lidam com sistemas estocásticos. Ainda segundo estes autores, devido à enorme diversidade de sua aplicação, é praticamente impossível enumerar todas as áreas nas quais a simulação vem sendo utilizada. Além disso, vale ressaltar que a simulação por mais que apresente algumas restrições de aplicação, se usada corretamente é uma força poderosa para a aprendizagem organizacional, segundo Stansfield *et al.* (2014).

As etapas de um projeto de SED são apresentadas por meio da Figura 1 a seguir. Na etapa de concepção, o modelo que está na mente do analista (modelo abstrato) deve ser representado de acordo com alguma técnica de representação de modelo de simulação, a fim de torná-lo um modelo conceitual, de modo que outras pessoas possam entendê-lo. Os dados de entrada também devem ser coletados nesta fase. Sendo assim, é importante coletar e tratar esses dados de maneira assertiva, pois a incerteza sobre eles pode causar um efeito de não saber ao certo as verdadeiras e corretas distribuições de probabilidades dos processos estocásticos básicos que dirigem a simulação (NELSON; SONG; PEGDEN, 2014).

Na segunda etapa (implementação) o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional através da implementação no computador, com a utilização de uma linguagem de simulação ou de um simulador comercial. O modelo computacional deve, ainda, ser verificado contra o modelo conceitual, a fim de avaliar se está operando de acordo com o pretendido. Alguns resultados devem ser gerados para validar o modelo computacional, observando se o modelo é uma representação adequada da realidade. Por fim, na terceira etapa (análise), após a verificação e validação, o modelo de simulação computacional está pronto para a realização dos experimentos, dando origem ao modelo experimental.

**Figura 1** – As três etapas para a construção de modelo de SED



Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010).

## 2.2 Validação do modelo computacional

O autor Sargent (2004) destaca a preocupação com a validação desde a fase do modelamento conceitual. Segundo este autor, há dois tipos de suposições do modelo conceitual. São as suposições estruturais (a respeito das operações do sistema do mundo real) e as suposições de dados. As suposições estruturais podem ser validadas através de observações do sistema do mundo real e através de discussões com o pessoal especializado no sistema. Este autor ainda destaca que nenhuma pessoa conhece tudo sobre o sistema. Desta forma, várias pessoas precisam ser consultadas para a validação das suposições do modelo conceitual.

Em uma perspectiva mais quantitativa, a validação através da comparação dos resultados fornecidos pelo modelo e dos resultados obtidos no sistema real deve ocorrer através de testes estatísticos. Uma das formas de se executar tal procedimento foi apresentada no livro dos autores Chwif e Medina (2010), que foi proposta tendo como base o trabalho de Kleijnen (1995). A ideia consiste em tomar o intervalo de confiança para a diferença entre os dois conjuntos (dados do modelo e dados do sistema). Se o intervalo contiver o zero pode-se afirmar que com um nível de confiança  $[(1-\alpha).100\%]$  que as respostas são equivalentes (do sistema real e do modelo de simulação). Neste caso, o intervalo de confiança pode ser construído como mostra a Equação (1).

$$\bar{x}_s - \bar{x}_r \pm t_{2n-2, \alpha/2} \sqrt{\frac{s_s^2 + s_r^2}{n}} \quad (1)$$

Na Equação (1) tem-se:

- $X_s$  é a média do resultado obtido a partir da simulação do sistema;
- $X_r$  é a média do resultado obtido a partir do sistema real;
- $S_s$  é o desvio padrão do resultado obtido a partir da simulação do sistema;
- $S_r$  é o desvio padrão do resultado obtido a partir do sistema real;
- $n$  é o número de observações obtidas;
- $t_{2n-2, \alpha/2}$  é a distribuição  $t$  de *Student* para  $2n-2$  graus de liberdade e um nível de significância de  $\alpha/2$ .

Segundo Leal *et al.* (2011) afirmam que, à medida que o número de experiências de simulação aumenta, a necessidade de validação e verificação desses modelos exige uma atenção especial por parte dos praticantes da simulação.

Raunak e Olsen (2014) afirmam que a validação do modelo de simulação é uma tarefa difícil e necessita para tanto de uma avaliação rigorosa. Portanto a quantificação da validação é uma ação necessária para responder à pergunta "qual o critério adequado para a validação?".

Ainda segundo Sargent (2013) a verificação e validação estão preocupadas em determinar se um modelo e seus resultados são "corretos" para um uso ou finalidade específica. A verificação do modelo é formalmente definida como "assegurar que o programa de computador do modelo computadorizado e sua implementação estão corretos e a validação do modelo é definida como a comprovação de que a modelo computadorizado dentro de seu domínio de aplicabilidade possui um leque satisfatório de precisão.

Finalmente, para Wang (2013) a realização da verificação e validação para a modelagem e simulação requer uma aplicação sistemática e estruturada de diferentes técnicas de verificação e validação em todo o ciclo de vida da modelagem e simulação. Apesar de existir vários documentos de orientação descrevendo uma ampla variedade de técnicas de verificação e validação, seu potencial de aplicação e experiências sobre a seleção eficaz dessas técnicas para um determinado contexto de modelagem e simulação ainda são escassos.

### **2.3 Identificação dos fatores humanos**

Para Digiesi *et al.* (2009), o comportamento de um operador pode ser afetado por vários fatores tais como o ambiente de trabalho físico (clima, ergonomia, ruído), social (relações humanas, comunicação entre o grupo), a natureza da tarefa (discreta ou contínua, repetitiva ou não-repetitiva, motora ou cognitiva) e aspectos pessoais (atitudes psicofísicas, habilidade pessoal, idade, sexo).

Segundo esses autores, estes fatores podem influenciar profundamente o comportamento de um operador, o que pode resultar em uma variabilidade de desempenho durante o turno de trabalho. Essa variabilidade nos tempos de conclusão de tarefas pode ser observada se a tarefa é completada pelo mesmo operador em diversos contextos de produção, bem como se a tarefa é executada no mesmo ambiente de trabalho (ambiente físico e social) e no mesmo local de trabalho.

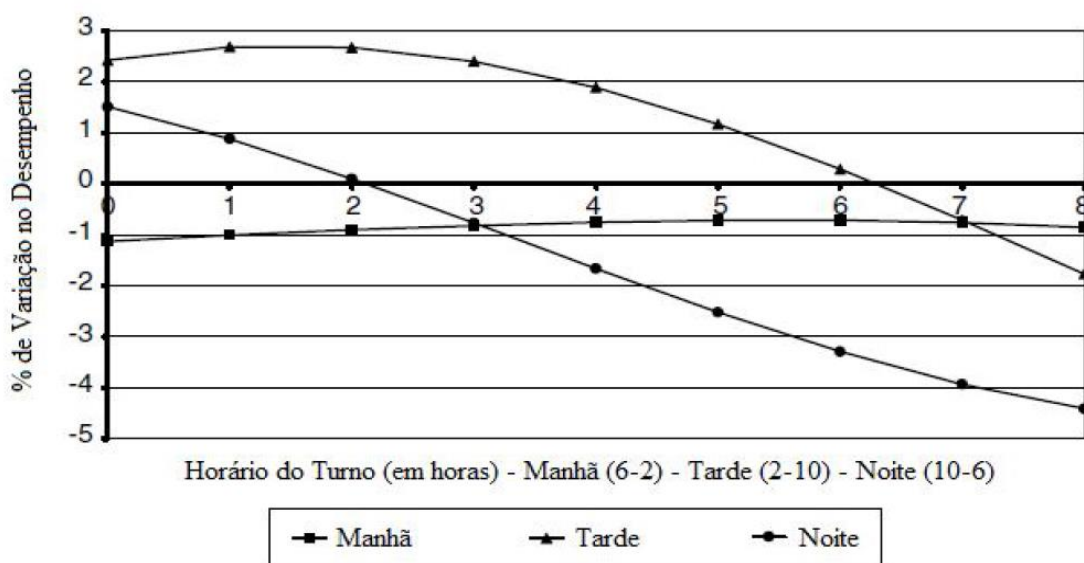
Neste contexto, as pesquisas de Brailsford (2014) apontam para a importância do "fator humano" nos sistemas produtivos, pois qualquer tipo de operação envolverá esses "participantes" humanos, cujo comportamento pode afetar o desempenho do sistema em questão. Até mesmo em uma indústria de

transformação, onde muitos processos são automatizados, ainda sim, envolverá o “fator humano” em algum ponto.

De forma mais específica, segundo Reilly, Atkinson e Waterhouse (2000), os ritmos biológicos se referem às mudanças cíclicas que se repetem regularmente em um determinado tempo e estão relacionadas às alterações dos processos fisiológicos. Os ritmos podem ser denominados de circadiano, ou seja, referentes ao dia solar (24 +/- 4 horas), ultradiano (ciclos com menos de 24 horas) ou infradiano (ciclos com mais de 28 horas). A principal função do ritmo circadiano é preparar o corpo humano para o sono através da regulação hormonal de suas funções básicas. Até certa hora da noite, tipicamente entre as 22h30min às 01h00min, o corpo naturalmente adormece. Isso é usualmente acompanhado por uma redução na temperatura central e por um aumento no hormônio do sono (BAINES *et al.*, 2004).

No trabalho de Baines *et al.* (2004), esse modelo foi utilizado para representar as mudanças ocorridas no desempenho do operador devido aos efeitos do ritmo circadiano. Foram incluídas a “hora do dia” e a “hora que a pessoa acorda” para prever o desempenho dos operadores que começam suas atividades em horários diferentes do dia. O resultado para um operador que acorda três horas antes de começar cada turno de trabalho é apresentado na Figura 2.

**Figura 2** – Modelo de desempenho humano relacionado ao ritmo circadiano



**Fonte:** Baines *et al.* (2004).

É notável que as maiores variações de desempenho ocorrem para aqueles trabalhadores do turno da noite, pois estão na “contramão” de seu ritmo biológico normal evidenciado pela pesquisa dos autores (BAINES *et al.*, 2004).

### **3 MÉTODO DE PESQUISA**

O presente trabalho é classificado, segundo os autores Turrioni e Mello (2012) como uma pesquisa de natureza aplicada, em que os resultados obtidos têm como função inicial resolver os problemas ocorridos em um sistema real. Quanto aos objetivos, pode-se dizer que a pesquisa é classificada como descritiva, pois tenta modelar e retratar as particularidades de um dado fenômeno analisado por meio de uma observação sistemática na coleta dos tempos de processamento. Em relação à abordagem do problema, a pesquisa é classificada como combinada, pois apresenta aspectos das pesquisas quantitativas e qualitativas e o método aplicado nesta abordagem foi a modelagem e simulação.

É importante frisar que a linha de produção de placas eletrônicas se encaixa como objeto de estudo elegível para testar a abordagem proposta, pois possui dez etapas com processos manuais e semiautomáticos operando com um alto volume de produção. Vale ressaltar, também, que para a coleta desses dados de pesquisa foram utilizados cronômetros, filmadoras, gravações da linha de montagem e uma planilha de Excel® para melhor armazenar e organizar os dados.

#### **3.1 Sistemática para a coleta dos tempos**

Para atingir o objetivo proposto na pesquisa fez-se necessário uma abordagem sistemática durante a etapa de modelagem dos dados de entrada. Por conseguinte, um intenso trabalho de cronometragem foi realizado nas dez etapas da linha de montagem.

Ao todo foram feitas 3000 tomadas de tempo de processamento no decorrer de nove meses de coleta de dados. Estes 3000 tempos, foram divididos como mostra a Tabela 1. Vale ressaltar, que esta tabela exemplifica a estrutura de tomada de tempo para “um” dia da semana. Como foram considerados nesta pesquisa os



dias de segunda-feira até sexta-feira multiplica-se 600 por 5 para obter-se o total dos tempos cronometrados (3000 tempos).

**Tabela 1** - Método de coleta de dados. Tt = tomadas de tempo

Turno	Período	Etapas (1 a 10)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Manhã	07:40 às 09:00	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	09:00 às 11:40	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Tarde	13:00 às 15:00	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	15:00 às 17:00	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>Total por etapa</b>		<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
<b>Total do dia</b>		<b>600</b>									

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Portanto, como mostra a Tabelas 1, foram realizadas 15 cronometragens em cada um dos 4 períodos diários. Este procedimento foi feito para cada um dos 5 dias da semana. Desta forma, seria possível captar a variação do ritmo de trabalho dos funcionários entre os dias da semana e entre os períodos do dia. Para se realizar as cronometragens, foram utilizados três cronômetros em conjunto com câmeras de filmagens, que ficavam no teto da linha de produção, com a devida autorização e consentimento da empresa estudada.

Vale ressaltar que os tempos medidos nos primeiros dias de cronometragem, por meio da cronometragem direta, foram todos desconsiderados, pois os trabalhadores estavam em um ritmo de produção fora da “normalidade” (SLACK *et al.*, 2002). Esta alteração de comportamento pode ser atribuída pela ansiedade gerada nos funcionários pela presença do cronômetro.

Por fim, é importante salientar que os dados de cada etapa foram coletados sempre do mesmo operador. Dessa forma, as variações dos tempos de produção não podem ser atribuídas a diferenças de habilidades dos operadores.

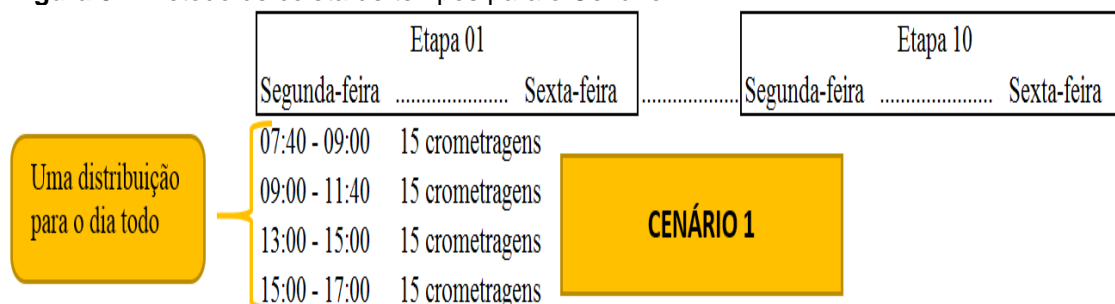
### 3.2 Concepção dos cenários

Neste artigo, foram desenvolvidos quatro cenários com características e objetivos distintos. Para o Cenário 1, foi gerada para cada etapa de montagem, uma distribuição de probabilidade por dia da semana, para representar o turno inteiro de trabalho, conforme indica a Figura 3. Este cenário objetiva verificar se a modelagem

dos tempos operacionais de cada etapa de montagem, através de uma única distribuição de probabilidade por dia, garante a validação do modelo computacional.

Logo, foram utilizados todos os dados cronometrados do dia para gerar uma distribuição de probabilidade por etapa. Vale ressaltar que no trabalho de coleta dos tempos foram feitas 60 medições de tempos de processamento por dia.

**Figura 3** – Método de coleta de tempos para o Cenário 1

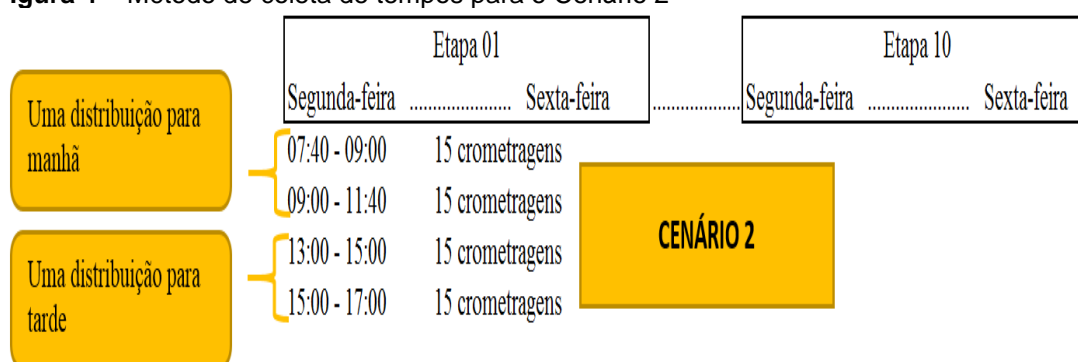


**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

Já para o Cenário 2 foram geradas, para cada etapa de montagem, duas distribuições de probabilidade, representando a parte da manhã e a parte da tarde de cada dia da semana. Este cenário objetiva verificar se a modelagem dos tempos operacionais de cada etapa de montagem, através de duas diferentes distribuições de probabilidade por dia, garante a validação do modelo computacional.

Conforme Figura 4, para todas as etapas, foram feitas 30 medições de tempos de processamento na parte da manhã e 30 medições na parte da tarde.

**Figura 4** – Método de coleta de tempos para o Cenário 2

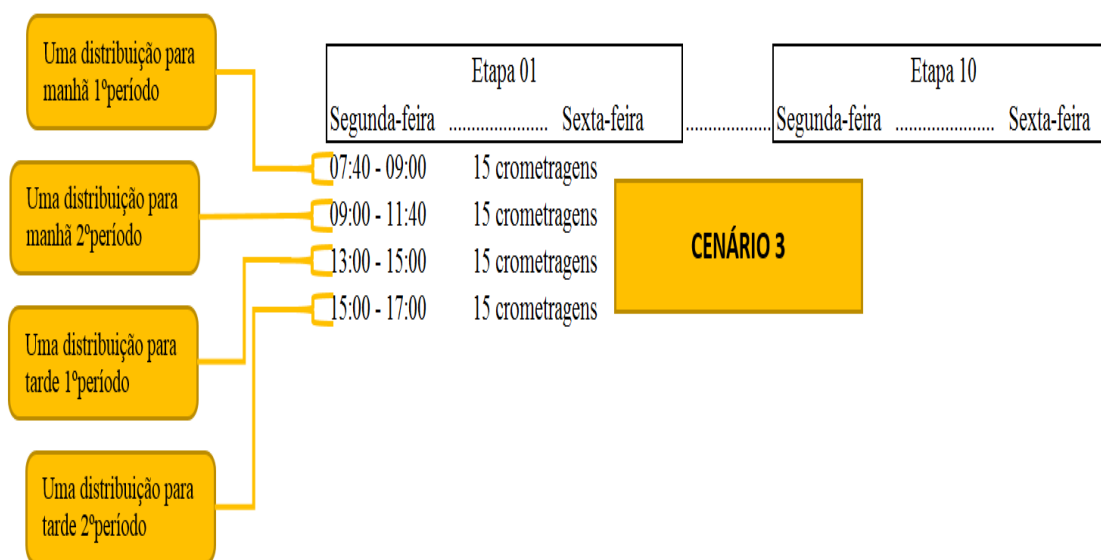


**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

No Cenário 3 foram geradas quatro distribuições de probabilidade (Figura 5), representando o primeiro período do dia (07:40 às 09:00), o segundo período do dia

(09:00 às 11:40), o terceiro período do dia (13:00 às 15:00) e o quarto período do dia (15:00 às 17:00). Têm-se então, para cada uma das dez etapas de montagem, quatro distribuições por dia da semana. Este cenário objetiva verificar se a modelagem dos tempos operacionais de cada etapa de montagem, através de quatro diferentes distribuições de probabilidade por dia, garante a validação do modelo computacional.

**Figura 5** – Método de coleta de tempos para o Cenário 3



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

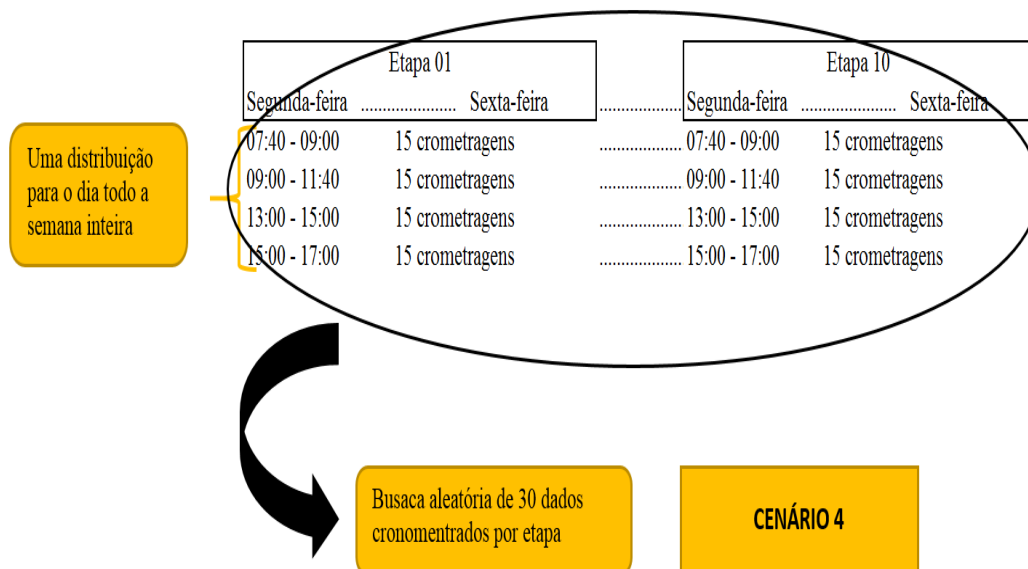
Por fim, no Cenário 4, foi gerada para cada etapa de montagem uma única distribuição de probabilidade, independente do dia da semana. Para isto, foi realizada uma seleção aleatória nos tempos cronometrados de cada etapa, buscando-se 30 dados em 300 dados disponíveis para cada etapa. Logo, dez distribuições de probabilidade foram construídas.

O objetivo deste último cenário é verificar se a consideração de apenas uma única distribuição de probabilidade por etapa de montagem, independente do dia da semana, garante a validação do modelo computacional.

Logo, para se obter os 30 tempos aleatórios utilizou-se a seleção aleatória do MINITAB. O objetivo do cenário 4 é simular uma possível ação de um cronometrista, que tenha desconsiderado a cronometragem vinculada a períodos específicos do dia

e dias específicos da semana. A Figura 6 a seguir exibe de forma sucinto a descrição realizada previamente:

**Figura 6** – Método de coleta de tempos para o Cenário 4



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

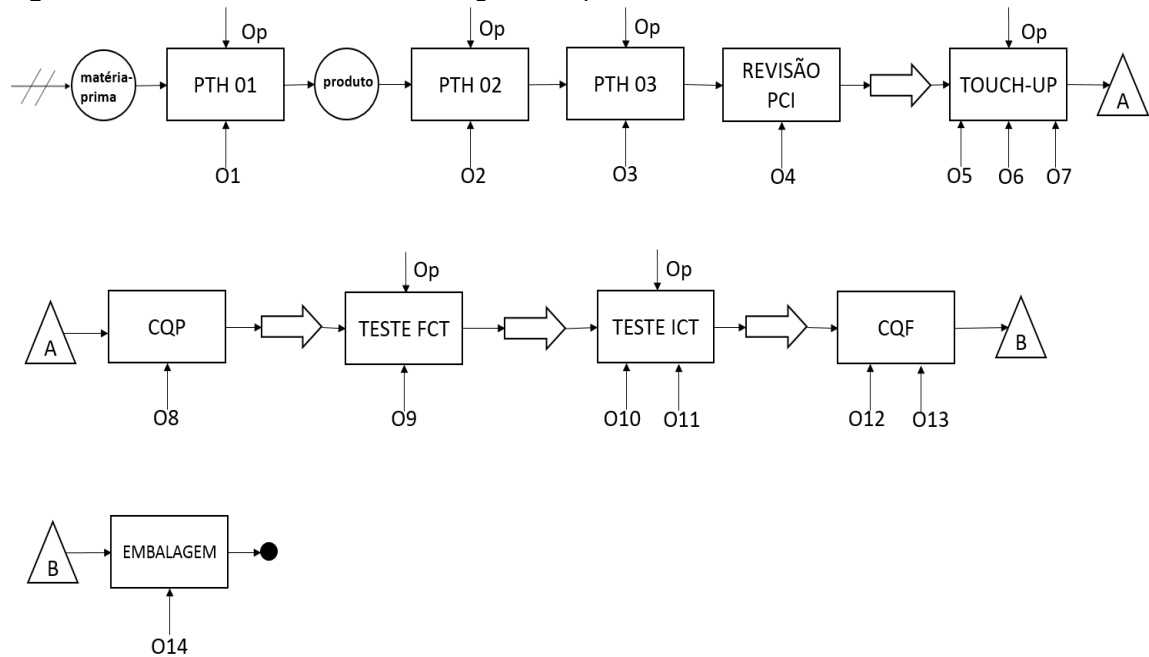
#### 4 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

O objeto de estudo desta pesquisa foi uma linha de produção de uma empresa de médio porte do ramo da eletrônica, situada na cidade de Santa Rita do Sapucaí – MG, Brasil. Esta linha de produção monta placas eletrônicas e trabalha com um *mix* reduzido de placas, além de um alto volume de produção. Esta linha de produção utiliza um layout em U com dez etapas: As etapas 1,2 e 3 são de montagem. A etapa 4 é de revisão, a etapa 5 é de *touch-up*, a etapa 6 é de controle da qualidade da produção, as etapas 7 e 8 são de teste, a etapa 9 é de controle de qualidade final e a etapa 10 é referente a embalagem.

Aplicando-se os passos propostos por Montevechi *et al.*, (2010) tem-se: a etapa de “concepção”, onde é apresentada a modelagem conceitual, utilizando-se a técnica IDEF-SIM, apresentada por Leal *et al.*, (2014). Em seguida é apresentado a sistemática usada para a modelagem dos dados de entrada. Nesse caso foi aplicado uma abordagem diferenciada na coleta de tempos, para em seguida se fazer a transformação desses tempos em distribuições de probabilidade. A seguir, na etapa

de “implementação” é apresentado a forma como foi desenvolvido o modelo computacional. E por fim, na etapa de “análise”, faz-se a aplicação dos cenários propostos. A Figura 7 exibe o IDEF-SIM da linha de montagem das placas eletrônicas. Essa modelagem do processo por meio dessa técnica foi a base principal para a construção do modelo conceitual.

**Figura 7** – IDEF-SIM da linha de montagem das placas eletrônicas



**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

A Figura 7 mostra que a matéria-prima entra no processo pela etapa PTH 01. Esta matéria prima refere-se à placa de circuito impresso eletrônico com vários componentes inseridos via processo automático. Em seguida, esta matéria-prima segue para a montagem de componentes do tipo PTH 01. Essa etapa é executada de acordo com uma ordem de produção e necessita de um operador para sua realização. Logo após, é gerada a entidade nomeada de produto, que segue a para a montagem PTH 02. Essa etapa também é executada de acordo com uma ordem de produção e utiliza um operador.

Em seguida o produto segue para a etapa PTH 03, cuja operação é orientada também por uma ordem de produção. Em seguida o produto segue para a etapa 04, que se refere à atividade de revisar o produto, por meio de um único operador, para garantir que as atividades anteriores de montagem foram bem executadas. Logo

após o produto é transportado manualmente para etapa 05, onde são inseridos mais alguns componentes. Para isto são necessários três operadores.

A entidade “produto” segue então para etapa 06 (CQP, controle de qualidade da produção), onde o operador tem como tarefa verificar se até este estágio a placa está corretamente montada. A entidade produto é então transportada manualmente até a etapa 07, que é responsável por fazer o teste funcional. Nesta etapa um operador é responsável por verificar se a placa está funcionando corretamente.

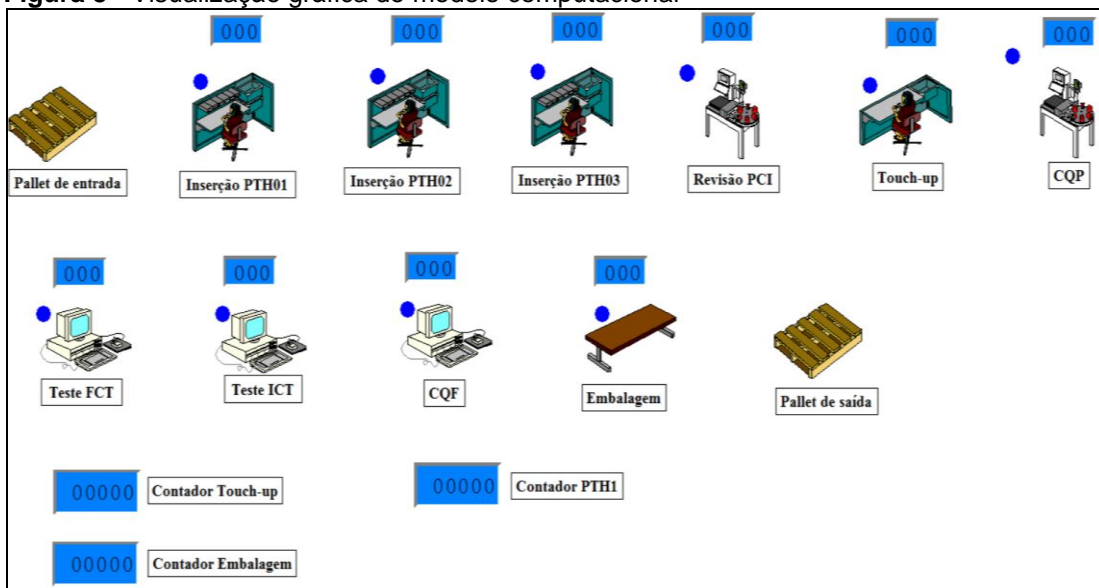
Em seguida a entidade “produto” é transportada manualmente até a etapa 08, que é o teste do circuito. Nessa etapa, dois operadores são responsáveis por verificar se o circuito da placa está funcionando corretamente. Alguns testes são efetuados para se determinar se a montagem e o primeiro teste foram corretamente executados. Uma vez finalizado o último teste, a entidade “produto” segue para a etapa 9 (CQF, controle da qualidade final). Nessa etapa dois operadores são responsáveis por fazer uma última inspeção de qualidade na placa e fazer o lançamento de alguns parâmetros no sistema da empresa. Por fim, a entidade “produto” segue para a última etapa da linha de montagem das placas eletrônicas.

Na etapa 10, um operador é responsável por fazer a embalagem da placa, usando material anti-estático e colocar em uma embalagem própria conforme a especificação do cliente. Vale ressaltar que linha de montagem utiliza uma esteira motorizada da etapa 01 até a etapa 04. Da etapa 04 em diante o transporte entre as etapas restantes é feito manualmente.

Para criar os quatro cenários apresentados no método da presente pesquisa foi necessário a construção de uma tabela com 360 distribuições de probabilidade. Essas 360 distribuições foram criadas com o uso da ferramenta *StatFit*®, presente no software *Promodel*®, onde foram selecionadas as distribuições que se posicionaram em primeiro lugar no *rank*, para cada análise realizada.

A Figura 8 mostra a visualização gráfica do modelo computacional da linha de montagem das placas eletrônicas.

**Figura 8** - Visualização gráfica do modelo computacional



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por ser de extrema importância a verificação do modelo computacional (CHWIF; MEDINA, 2010), a mesma foi aplicada e foram criadas variáveis para registrar o valor “sorteado” pelo software Promodel® em cada distribuição. Estes valores foram monitorados durante a simulação. Também foram criadas variáveis para registrar a contagem de peças no início do processo (etapa 01), no meio do processo (etapa 05) e no final do processo (etapa 10). A finalidade dessa verificação é checar se as entidades estariam de fato passando por esses referidos locais.

Os comandos mais importantes que foram utilizados no modelo computacional foram os comandos *calhour* e *calday*. O comando *calhour* especificou na lógica de programação do modelo o intervalo de tempo em que cada distribuição de probabilidade atuou.

O comando *calday* foi utilizado para identificar, no modelo, os diferentes dias da semana. Os comandos mencionados foram utilizados dentro da lógica condicional *if then/else*. Ou seja, a lógica de processamento foi diferente para cada um dos quatro cenários definidos nesta pesquisa, no que se refere à utilização dos dados de entrada. Também foi necessária a definição de um turno de trabalho (arquivo externo) para ser designado no modelo computacional. Nesse turno, as atividades seguiam os seguintes horários: parte da manhã, das 07:40 até 11:40; parada para almoço, das 11:40 até 13:00; parte da tarde, das 13:00 até 17:00. A

seguir tem-se um trecho da lógica de processamento empregada no modelo computacional do Cenário 3 na etapa 1:

```
IF CALDAY = 4 AND CALHOUR > 6 AND CALHOUR < 9 THEN
{
Tempo1 = 32.7+L (25.9, 7.41)
}
ELSE
IF CALDAY = 4 AND CALHOUR > 8 AND CALHOUR < 12 THEN
{
Tempo1 = 52.5 + L(17.3, 16.6)
}
IF CALDAY = 4 AND CALHOUR > 12 AND CALHOUR < 15 THEN
{
Tempo1 = 29.9 + L(38.1, 7.51)
}
IF CALDAY = 4 AND CALHOUR > 14 AND CALHOUR < 17 THEN
{
Tempo1 = 41.7 + L(33.4, 8.14)
}
IF CALDAY = 5 AND CALHOUR > 6 AND CALHOUR < 9 THEN
{
Tempo1 = 40.6 + L(19.1, 8.07)
}
```

Para este cenário foram utilizadas quatro distribuições de probabilidade por dia, para cada um dos cinco dias da semana. O comando *calday* = 1 refere-se a segunda-feira, *calday* = 2 refere-se a terça-feira e assim sucessivamente até *calday* = 5, que se refere a sexta-feira. Quando *calday* = 2, o comando *calhour* é utilizado quatro vezes, sendo que sempre é acompanhado de uma distribuição de probabilidade logo em seguida. Por exemplo, no texto, quando *calday* = 4, significa que a simulação do modelo computacional está simulando a quinta-feira. Em seguida é mostrado *calhour* > 6 and *calhour* < 9. Essa formatação do comando refere-se ao período do dia entre 7 horas e 9 horas.



Por fim, a expressão “tempo1 = 32.7+L (25.9, 7.41)” indica que para o dado período citado anteriormente, atuará a distribuição de probabilidade estatística “Log-normal” com os respectivos parâmetros.

## 5 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Serão apresentados a seguir os resultados da validação do modelo computacional para cada cenário quando são considerados diferentes níveis de confiança nos parâmetros da equação de validação. Foram produzidas 30 réplicas para cada cenário, onde a quantidade de saída do modelo computacional refere-se ao total produzido ao longo de uma semana inteira de produção. Para esta pesquisa considerou-se a semana como sendo de segunda-feira até sexta-feira. A primeira ação para início das análises pós-simulação foi construir a Tabela 2.

Nesta tabela têm-se os quatro cenários utilizados na pesquisa e ainda os resultados para “Média” e “Desvio-padrão”, ou seja, a média aritmética e o desvio padrão amostral, respectivamente, para as 30 réplicas dos resultados simulados. Estes dois parâmetros serão utilizados na equação de Kleijnen (1995).

**Tabela 2** – Média e desvio-padrão das 30 réplicas do total produzido por semana de cada cenário

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>
Réplicas (30)	Total produzido	Total produzido	Total produzido	Total produzido
Média	1587,23	1622,83	1605,07	1586,17
Desvio-padrão	5,27	7,29	6,88	4,62

**Fonte:** Elaborado pelo autor (2021).

É importante ressaltar que a média aritmética dos dados reais (n=30) é igual a 1606,93 minutos e o desvio-padrão amostral é de 7,57 minutos. Essas informações foram obtidas, portanto, dos apontamentos reais de quantidade produzida na linha de montagem.

Logo, usando-se os dados da Tabela 2, as informações da produção real e aplicando-se a Equação (1) nos quatro cenários para os cinco níveis de confiança utilizados nessa pesquisa, tem-se que a validação somente se confirmou para o Cenário 3, em todos os níveis de confiança utilizados (80%, 90%, 95%, 98% e 99%).

Fazendo-se o “passo a passo” do cálculo com o auxílio da Tabela 3 e considerando um nível de confiança de 99% para o Cenário 3, tem-se:

**Tabela 3** – Dados cenário 3 para 99% de confiança

Dados Cenário 3					
$X_s$	$X_r$	$S_s$	$S_r$	N	$t_{58,0.005}$
1605,7	1606,93	6,88	7,57	30	2,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Aplicando-se a Equação (1):

$$(1605,7 - 1606,93) + 2,66 \cdot \sqrt{6,88^2 + 7,57^2/30} = 3,11 \quad (2)$$

$$(1605,7 - 1606,93) - 2,66 \cdot \sqrt{6,88^2 + 7,57^2/30} = - 6,84 \quad (3)$$

Como o valor “0” se encontra no intervalo [-6,84 +3,11] pode-se afirmar que o Cenário 3 validou. É importante frisar que este Cenário 3 foi o mais fracionado, pois considerou quatro distribuições de probabilidade por dia. Aplicando-se a mesma Equação (1) para os outros cenários, foi possível constatar que não houve validação mesmo considerando todos os níveis de confiança para todos os outros níveis de confiança considerados (80%, 90%, 95%, 98% e 99%).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi definir e aplicar uma abordagem para consideração da variação do ritmo de trabalho humano em projetos de simulação a eventos discretos. Desta forma, foi desenvolvido um modelo de simulação, utilizando-se o software *Promodel*®, onde o trabalho realizado em uma linha de montagem de placas eletrônicas foi modelado, levando-se em conta a variação do trabalho do fator humano por meio de uma abordagem diferenciada na coleta dos tempos de processamento das etapas.

A forma encontrada nesse trabalho para considerar a influência do ritmo do trabalho humano foi pautada na modelagem dos dados de entrada, na fase de concepção de um projeto de simulação a eventos discretos. E baseou-se na divisão dos períodos do dia sendo que para cada um desses períodos, foi-se atribuído uma distribuição de probabilidade estatística.

Na validação do modelo computacional, foram utilizadas as saídas do modelo computacional (quantidade produzida de placas) referentes aos quatro cenários. Finalmente, foi aplicada a equação de Kleijnen (1995) em cada um dos cenários para se fazer a validação do modelo computacional. Os resultados da validação mostram que apenas houve validação para o Cenário 3 para todos os níveis de confiança avaliados na presente pesquisa. Este fato corroborou a premissa inicial sobre a variação do ritmo de trabalho humano e sua influência na validação do modelo computacional. Vale salientar, que no Cenário 3 o período do dia foi fracionado em quatro partes sendo uma respectiva distribuição de probabilidade para cada, com o objetivo de mostrar que cada uma dessas partes tem uma variação intrínseca e a mesma deve ser considerada, pois o operador altera seu ritmo no decorrer do dia.

Logo, sugere-se a partir desse trabalho que quando o profissional da área de simulação for fazer um projeto de simulação de uma linha de produção, por exemplo, o mesmo deverá ter que fazer um bom planejamento para a coleta de dados, no que tange aos tempos de processamento por atividade ou etapa. Nesse caso deve-se ter em conta que a hora do período do dia que se faz a tomada de tempo é de extrema importância. Para enriquecer a presente discussão e abordagem é indicado como trabalhos futuros:

- Analisar a variação do ritmo de trabalho ao longo dos dias do mês;
- Utilizar outras técnicas de validação, como as apontadas no trabalho de Leal *et al.* (2011);
- Analisar a variação do ritmo do trabalho humano decorrente da ansiedade gerada pela proximidade do cronometrista.

## REFERÊNCIAS

BAINES, T.; MASON, S.; PEER-OLAF, S.; LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation? **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.12, p. 515-526, 2004. [https://doi.org/10.1016/S1569-190X\(03\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S1569-190X(03)00094-7)

BRAILSFORD, S. C. Modeling human behavior – an (id)entity crisis? **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014. <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020006>

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos, teoria & aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed do autor, 2010.

DIGIESI, S.; KOCK, A. A. A.; MUMMOLO, G.; ROODA, J. E. The Effect of Dynamic Worker Behavior on Flowtime Performance. **International Journal of Production Economics**, v. 120, n. 2, p. 368-377, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.012>

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research**. McGraw-Hill, 2001.

KLEIJNEN, J. P. C. Verification and validation of simulations models. **European Journal of Operational Research**, v. 82, n.1, 1995. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00016-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00016-6)

LEAL, F.; SILVA, R. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A.; MARINS, F. A. S. A practical guide for operational validation of discrete simulation models. **Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional**, SBPO, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382011000100005>

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. **Proceedings of Winter Simulation Conference**. Baltimore, USA, 2010. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678908>

NELSON, B. L.; SONG, E.; PEGDEN, C. D. Advanced tutorial: input uncertainty quantification. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014. <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7019886>

RAUNAK, M.; OLSEN, M. Quantifying validation of discrete event simulation models. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Savannah, USA, 2014. <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7019927>

REILLY, T.; ATKINSON, G.; WATERHOUSE, J. Chronobiology and Physical Performance, *in*: Garret WE. Kirkendall DT (ed). **Exercise and sport science**. 1 ed. Philadelphia: Willians &Wilkins, 2000. p. 351-372.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models are discussed in this paper. **Journal of Simulation**, v. 7, n.1, p. 12–24, 2013. <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>

SARGENT, R.G. Validation and verification of simulation models. **Proceedings of the Winter Simulations Conference**, Washington, DC, USA, 2004.

SILVA, C. E. S.; SALGADO, E. G.; MELLO, C. H. P.; OLIVEIRA, E. S.; LEAL, F. Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly. **International Journal of Production Research**, 2014, v. 52, n. 10, p. 2851–2866. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.853887>

SLACK, N; CHAMBERS, S; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

STANSFIELD, T.; MASSEY, R.; JAMISON, D. Simulation can improve reality: get more from the future. **Industrial Engineer**, v. 46, n. 3, p. 38-42, 2014.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. 2012. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

WANG, Z. Selecting verification and validation techniques for simulation projects: a planning and tailoring strategy. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA, 2013. <https://doi.org/10.1109/WSC.2013.6721511>



Artigo recebido em: 04/11/2021 e aceito para publicação em: 03/02/2022  
DOI: <http://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i4.4496>