

## ***Simulação e Análise de Falhas de um Processo de Produção em uma Indústria Calçadista***

Greiciara Gonçalves dos Santos ([greiciara.santos@sqa.pucminas.br](mailto:greiciara.santos@sqa.pucminas.br))

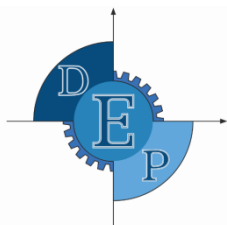
Maria Clara de Souza Rodrigues ([mcsrodrigues@sqa.pucminas.br](mailto:mcsrodrigues@sqa.pucminas.br))

**Maria Aparecida Fernandes Almeida** ([mafa@pucminas.br](mailto:mafa@pucminas.br))

### **RESUMO**

O estudo da simulação de falhas é uma ferramenta relevante para auxiliar na tomada de decisão nas empresas. Este trabalho apresenta simulação e análise de falha de um processo de produção de uma indústria calçadista, localizada no polo de Nova Serrana, Minas Gerais. A linha de produção de um dos modelos fabricados pela indústria foi modelada e simulada através do uso do *software* ARENA. Foram investigados cenários de falhas visando medir interferências na produção. As falhas foram simuladas, para medir a interferências dessas no sistema produtivo em relação aos pontos críticos do uso do maquinário e da mão de obra dos funcionários. A análise de resultados das simulações na linha de produção da indústria analisada demonstrou que a disponibilidade presente no sistema é suficiente para absorver pequenas falhas sem a interferência na produtividade. O estudo também demonstrou que ao simular grandes falhas, determinadas em um maior período de tempo de produção, essas também não causam interferências na produção.

Palavras - Chave: Análise de Falhas. Falhas em Recursos. Indústria Calçadista. Simulação Computacional. Simulação de Falhas. *Software* ARENA.



## ABSTRACT

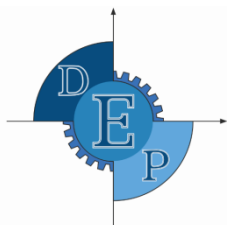
The study of fault simulation is a relevant tool to assist in decision making in companies. This work presents simulation and failure analysis of a production process in a footwear industry, located in the Nova Serrana hub, Minas Gerais. The production line of one of the models manufactured by the industry was modeled and simulated using the ARENA software. Failure scenarios were investigated to measure interference in production. The failures were simulated, to measure their interference in the production system in relation to the critical points of the use of the machinery and the workforce of the employees. The analysis of the results of the simulations in the production line of the analyzed industry demonstrated that the availability present in the system is sufficient to absorb small faults without interfering in productivity. The study also demonstrated that, when simulating large failures, determined over a longer period of production, these also do not cause interference in production.

Keywords: Failure Analysis. Resource Failures. Footwear Industry. Computer Simulation. Failure Simulation. ARENA Software.

## 1. INTRODUÇÃO

Em uma organização, decisões são tomadas diariamente, porém, para que isso ocorra, torna-se necessário obter o máximo de informações que permitam auxiliar na aquisição da melhor opção, dentro do contexto proposto. Entretanto, mesmo com todas as informações coletadas, ainda podem faltar dados para a tomada de decisão.

Como uma opção de instrumento para a análise, os métodos computacionais podem auxiliar com as simulações de cenários distintos para a tomada de decisão. O emprego da teoria das filas, em conjunto com esses métodos, é aplicado para gerar uma adequada resolução de problemas, pois permite a inserção de cenários para os seus respectivos estudos (PRADO, 2004). Assim, a Pesquisa Operacional

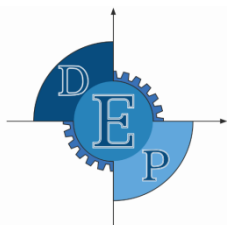


(PO) torna-se propícia e importante nessa situação, já que utiliza ferramentas quantitativas, que tornam possível a análise de diferentes cenários, através de modelagem e simulação para a tomada de decisão. A simulação feita através de um *software*, proporciona a representação de contextos reais ou mesmo pode prever o comportamento de algo que ainda não exista no mundo real, gerando a possibilidade de analisar várias alternativas de cenários, sem a necessidade de aplicar todos eles.

Andrade (2014) afirma que um dos maiores desafios atuais das organizações é se manter competitiva, à medida que as condições do ambiente de negócio mudam e se tornam cada vez mais complexas. A competitividade industrial implica que as empresas tenham que conseguir produzir da melhor forma possível, no menor tempo possível e com a melhor qualidade possível (SLACK *et al.*, 2018). Dessa forma, a análise de falhas para o estudo de otimização e melhoria dos processos torna-se crucial para manter a competitividade industrial da empresa neste mercado altamente competitivo.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), as simulações de variadas possibilidades de cenários de falhas, com a busca de suas minimizações, propicia ganho na confiabilidade do sistema, já que a mesma está associada a uma operação bem sucedida. Na indústria competitiva atual, as perdas, em qualquer etapa nos processos de produção, podem inviabilizar qualquer linha de produção. Esperar que as falhas ocorram para poder intervir, pode ser tarde demais para manter a viabilidade do processo produtivo. Utilizar de recursos que possam minimizar essa situação, se torna de grande valia para qualquer empresário. Uma forma de tentar melhorar essa situação, proposta em uma das áreas da engenharia de produção, é o estudo de análise de simulação de falhas no processo produtivo, visando o melhor desempenho das máquinas e equipamentos.

A falha de um equipamento pode ser causada por diversos fatores externos ou internos, fazendo com que ele não consiga mais desempenhar sua função. Tal falha pode ser desde a condição de operação da máquina até a disposição do equipamento dentro do processo de produção. A redução da quantidade de falhas



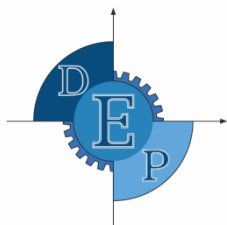
vem sendo procurada pelas empresas, que apreciam ter uma melhora na produção, para poderem competir no mercado (YADAV citado por SOUZA *et al.*, 2018).

O Relatório Setorial: Indústria de Calçados do Brasil 2019 (ABICALÇADOS, 2019) apresenta que no ano de 2017, o Brasil foi o quarto maior produtor mundial de calçados. Também, é o principal produtor fora da região asiática tendo uma expansão de 1,1% da produção, o que representa 4,4% da produção mundial de calçados. Ainda neste relatório, em 2018, quando se analisa a produção do País de forma regional, o maior produtor de calçados é a região Nordeste com 54,1% da produção nacional, seguidas pelas regiões Sul e Sudeste, ambas com 22% da produção nacional. Nesse mesmo ano, o Estado de Minas Gerais apresenta melhoras de desempenho em relação à indústria brasileira, passando de 14,4% para 15,3% da produção nacional de calçados. Dentro desse contexto, o Polo Calçadista de Nova Serrana representa 50,9% da produção do Estado de Minas Gerais. Esse Polo é composto pelos municípios de Araújos, Bom Despacho, Conceição do Pará, Divinópolis, Igaratinga, Leandro Ferreira, Nova Serrana, Onça de Pitangui, Pará de Minas, Perdigão, Pitangui e São Gonçalo do Pará. Os dados apresentados indicam a importância da indústria de calçados na economia do País.

A LL Indústria Calçadista (nome fictício definido para manter o sigilo industrial), localizada em Nova Serrana, é uma indústria de calçados femininos, atualmente com cinco funcionários. Cada funcionário é responsável por uma etapa da produção, que é executada em um equipamento específico. A empresa realiza a sua produção sobre demanda, com oito horas diárias de trabalho, e funcionamento de segunda a sexta.

O objetivo geral deste trabalho é analisar o sistema de produção de um modelo de calçado produzido pela LL Indústria Calçadista, com a modelagem e a simulação da linha de produção, utilizando o *software* ARENA, para identificar a interferência de falhas em máquinas ou de operação. Os objetivos específicos, listados a seguir, têm o propósito de alcançar os fins desejados no objetivo geral:

- i) Estudar a simulação de sistemas discretos;



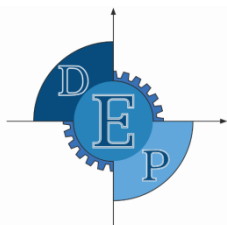
- ii) Desenvolver um projeto de simulação de uma linha de produção de uma indústria calçadista utilizando o software ARENA;
- iii) Analisar as condições de operação do processo produtivo;
- iv) Efetuar a simulação de falhas nos equipamentos de forma a identificar a máquina mais crítica;
- v) Identificar as interferências das falhas nos recursos das máquinas e nos operadores.

Para alcançar os objetivos, este trabalho está estruturado da seguinte forma. A seção 1, Introdução, apresenta o trabalho e os objetivos do estudo. A seção 2, Referencial Bibliográfico, tem os conceitos teóricos sobre Confiabilidade, Falhas e Simulação, contendo as seções Modelos de Simulação e Simulação Computacional, esta última, é seguida pelas subseções com conceitos sobre o Plano de Simulação, o *Software* ARENA e a Simulação de Falhas no *Software* ARENA. A seção 3 contém a Metodologia utilizada. Na seção 4 está o estudo desenvolvido, bem como os seus resultados. Por fim, a Conclusão deste trabalho está na seção 5.

## 2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 Confiabilidade

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5462:1994, o termo confiabilidade significa que a partir de condições operacionais especificadas durante um período determinado de tempo, um equipamento ou sistema possui a capacidade de desempenhar uma função específica solicitada. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o conceito de confiabilidade ganhou um significado tecnológico no final da Primeira Guerra Mundial, a qual foi utilizada para relatar os estudos comparativos, medindo o número de acidentes por voo em relação à quantidade de motores nos aviões utilizados na guerra. Os autores



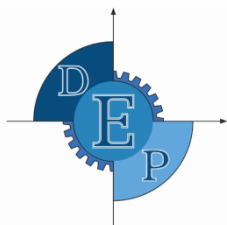
continuam a mencionar que a confiabilidade, na década de 1970 estava relacionada à análise de riscos devido à operação e construção de usinas nucleares. E a partir dessa época, a aplicação da confiabilidade foi difundida para diversas áreas. Para Fogliatto e Ribeiro (2009),

“Confiabilidade é definida como função de um período de tempo, o que implica cinco consequências: (i) o analista deve definir uma unidade de tempo para a realização das análises; (ii) os modelos que descrevemos tempos até falha utilizam a variável aleatória  $T$  (em vez de  $X$ , como é comum na estatística clássica) para descrever o tempo até falha de um item; (iii) o termo tempo não deve ser interpretado literalmente, já que em muitos contextos o número de milhas ou o número de ciclos pode representar o tempo até falha de um item; (iv) o conceito de confiabilidade deve ser associado a um período de tempo ou duração de missão, e; (v) a determinação do que deveria ser usado para medir a vida de um item nem sempre é óbvia.” (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009, p.3).

Ainda segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), de modo geral, a confiabilidade está relacionada ao funcionamento de um sistema ou produto, sem que este apresente falhas ou quebras. Para poder realizar análises em termos de engenharia é necessário que ocorra, segundo a probabilidade, uma determinação quantitativa de confiabilidade. Os autores ainda continuam estabelecendo a confiabilidade como uma probabilidade. E que esta deve manifestar valores entre “0” e “1”, além disso, nos cálculos de confiabilidade podem ser utilizados os axiomas clássicos da probabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

“O Axioma 1 diz que a probabilidade de o resultado do experimento ser o resultado é igual a algum número entre 0 e 1. O Axioma 2 diz, com probabilidade 1, que o resultado será um ponto contido no espaço amostral. O Axioma 3 diz que, para qualquer sequência de eventos mutuamente exclusivos, a probabilidade de pelo menos um desses eventos ocorrer é justamente a soma de suas respectivas probabilidades.” (ROSS, 2010, p.44).

Venanzi e Silva (2016) mostram a importância da confiabilidade para reduzir a probabilidade de ocorrência de falha e para se considerar o tempo de garantia de atuação do produto. Desta forma, o desempenho do produto está relacionado com a sua propensão de executar suas funções, apresentando o menor número de falhas possível.



Silveira *et al.* (2019) classificam os itens como reparáveis e não reparáveis, sendo que os itens que possuem a viabilidade de voltar ao seu funcionamento, após reparar sua falha, são os itens reparáveis. Já, os itens que devem ser substituídos em seguida da ocorrência de uma falha, são os itens não reparáveis.

Ainda, Silveira *et al.* (2019) apresentam dois princípios que estão unidos à confiabilidade. O primeiro, tempo médio entre falhas (MTBF, do inglês *Mean Time Between Failure*), que é empregue em itens reparáveis, com a equação a seguir para realizar o seu cálculo:

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n tbf_i \quad (1)$$

O segundo princípio apresentado pelos autores é o tempo médio até a falha (MTTF, do inglês *Mean Time to Failure*), que é empregue em itens não reparáveis. Silveira *et al.* (2019), também, apresentam a sua equação:

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n ttf_i \quad (2)$$

Conforme apresentado por Silveira *et al.* (2019) “onde  $N$  é a quantidade de equipamentos,  $tbf$  é o tempo entre falhas registrado para cada equipamento [...] e [...]  $ttf$  é o tempo para falha registrado para cada equipamento.” (SILVEIRA *et al.*, 2019, p.45 e 46).

## 2.2 Falha

De acordo com a ABNT NBR 5462:1994, falha é definida como o “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p.3). Já para Rodrigues (2014), “Falha é um desvio não previsto ou permitido de pelo menos uma característica ou critério do produto ou sistema.” (RODRIGUES, 2014, p. 178). Ainda segundo Rodrigues (2014), uma falha pode ser provocada por inúmeros fatores inevitáveis,





que podem ser um desvio nos componentes físicos dos produtos ou nos serviços, até ser causada por agentes externos.

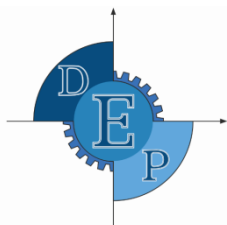
Para Xenos (1998, p. 68), “existem três grandes categorias de causas [para as falhas]: falta de resistência, uso inadequado ou manutenção inadequada”. Ainda no contexto de falhas, Rodrigues (2014, p. 178) apresenta que “as consequências das falhas afetam diretamente o usuário e podem variar em grau de importância e interferência no objetivo final do processo” e, realiza quatro etapas para a determinação das falhas, descritas a seguir:

1. Quando um equipamento apresenta um comportamento anormal, ocorre a Detecção de Falhas.
2. Quando se restringe a falha, ocorre o Isolamento de Falhas.
3. Quando se reconhece a falha, ocorre a etapa de Identificação de Falhas.
4. A última etapa de Análise de Falhas ocorre quando se constata o que causou a falha e assim, pode-se notar sua amplitude.

Ainda de acordo com a NBR 5462:1994, é conhecido que, a vida útil de um equipamento, trabalhando em condições específicas, é o período posto no estado de disponibilidade, até que ocorra uma sucessão acentuada de falhas, que torne este maquinário irreparável, após uma pane ou tal sucessão se torne inaceitável. Para entender estas falhas no equipamento, é necessário conhecer a taxa de falha e de reparo. No entanto, de acordo com Silveira *et al.* (2019) tal equipamento que possua uma taxa de falha ( $\lambda$ ) e uma taxa de reparo ( $\mu$ ) constantes devem ser calculados da seguinte maneira, de acordo com as equações 4 e 5. O tempo médio para reparo (MTTR, do inglês *Mean Time to Repair*) indicado pela equação 3, “é um indicador de desempenho utilizado na manutenção, para contabilizar o tempo médio de reparo de um determinado equipamento ou sistema.”

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n ttr_i \quad (3)$$





“[...] onde  $N$  é a quantidade de manutenções corretivas realizadas para determinado equipamento e  $ttr$  é o tempo de cada manutenção. Em itens não reparáveis, que, após a falha, são descartados, o  $MTTR$  é igual a zero.” (SILVEIRA *et al.*, 2019, p.49 e 50).

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (5)$$

## 2.3 Simulação

De acordo com Silva *et al.*, (2017, p. 120) “A simulação é uma das técnicas mais gerais usadas em Pesquisa Operacional. Simular significa reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo, o que nos permite testar algumas hipóteses sobre o valor de variáveis controladas. As conclusões são usadas então para melhorar o desempenho do sistema em estudo”. (SILVA, Ermes Medeiros da. *et al.*, 2017, p.120).

“A simulação tem inúmeras aplicações no mundo atual, nas áreas mais diversas que vão desde produção em manufatura até o movimento de papéis de um escritório. Costuma-se dizer que “tudo que pode ser descrito pode ser simulado.”” (Prado, 2010, p.21).

Para Gregório (2018), a simulação permite obter soluções e testar o comportamento de modelos, que são a representação da realidade de forma simplificada, a partir de várias situações. Com o uso da simulação pode-se adquirir uma medição quantitativa da confiabilidade de um sistema quando suas características são conhecidas (Prado, 2010). Já para Yu (2011), a confiabilidade dos resultados encontrados nos modelos de simulação, depende da confiabilidade dos dados utilizados na entrada destes modelos.



“A principal motivação para se usar simulação é a praticidade. Essa técnica permite que tanto os cenários, quanto os parâmetros que o caracterizam sejam alterados com pouco nível de complexidade. Se a ideia é analisar o desempenho de uma proposta diante de diferentes situações (mudando tráfego, protocolos, escalabilidade etc.) tem-se na simulação uma grande aliada.” (JOHNSON; COUTINHO, 2011, p. 90).

Segundo Prado (2009, p. 30), “a taxa de utilização dos atendentes é a relação entre o tempo total ocupado e o tempo total disponível”. Esta relação da Taxa de Utilização ( $\rho$ ), que está demonstrada na Equação 6, é relacionada com a Teoria das Filas de modo que o Tempo Médio de Atendimento ou de Serviço (TA) é formado pelo inverso do Ritmo Médio de Atendimento de cada Atendente ( $\mu$ ) e, que o Intervalo Médio entre Chegadas (IC) é o inverso do Ritmo Médio de Chegada ( $\lambda$ )

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (6)$$

“em que  $\lambda$  = ritmo médio de chegada e  $\mu$  = ritmo médio de atendimento” (PRADO, 2009, p. 30). Assim, como existe a relação entre  $\mu$  e  $\lambda$  da Teoria das Filas, existe a relação entre a taxa de reparos ( $\mu$ ) que é o inverso do tempo médio de reparo (MTTR) e que a taxa de falhas ( $\lambda$ ) é o inverso do tempo médio entre falhas (MTBF). Portanto, a relação entre as Falhas e a Simulação pode ser feita da seguinte maneira. A Taxa De Reparos ( $\mu$ ) é a Taxa De Atendimento ( $\mu$ ), O Tempo Médio para Reparo (MTTR) é o Tempo Médio de Atendimento (TA). O mesmo acontece com a Taxa De Falhas ( $\lambda$ ) que é a Taxa De Chegadas ( $\lambda$ ) e o Intervalo De Chegadas (IC) é o Intervalo de Chegada de Falhas (MTBF).

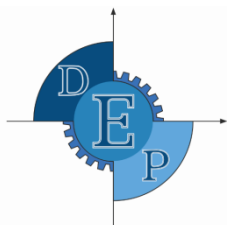
### 2.3.1 Modelos de Simulação

Segundo Almeida (2017), existem dois tipos de modelo de simulação:

a. Modelos Discretos:

A mudança ocorre nos valores do sistema em intervalos discretos de tempo, ou seja, o valor deste sistema somente se altera em períodos específicos. (ALMEIDA, 2017).

b. Modelos Contínuos:



Neste tipo de modelo, é necessário o uso de uma equação matemática com variáveis que mudam com o passar do tempo, para poder representar o estado do sistema. (BARRETO citado por ALMEIDA, 2017, p. 10).

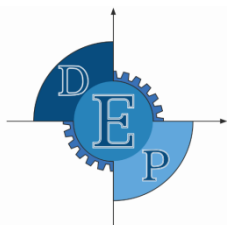
Em alguns casos, os modelos contínuos podem ser discretizados, através de suposições que simplificam as variáveis em intervalos específicos do processo. (ALMEIDA, 2017).

Ainda segundo Barreto citado por Almeida (2017, p. 10), “O sistema é modelado de acordo com uma sequência ordenada de eventos inter-relacionados, separados por passagem de tempo que descrevem inteiramente a experiência de uma entidade ao longo do seu fluxo pelo sistema”. A modelagem pode ser feita de três maneiras distintas (ALMEIDA, 2017):

- a. Modelagem por Eventos: o sistema é caracterizado por eventos discretos ao longo do tempo que são utilizados para a sua modelagem.
- b. Modelagem por Atividades: o sistema depende de atividades específicas que ocorrem ao longo do tempo, que são utilizados para a modelagem.
- c. Modelagem por Processos: o sistema é definido por um conjunto de entidades dinâmicas que define um processo específico, esse processo é utilizado para a modelagem.

Segundo Andrade citado por Almeida (2017), as variáveis nos modelos de simulação podem ser classificadas como:

- a. Variáveis Exógenas: são variáveis independentes ou de entrada do sistema. Sendo classificadas como:
  - i. Variável Controlável: pode ser controlada ou manipulada pelo sistema;
  - ii. Variável Não Controlável: “são geradas pelas circunstâncias nas quais o sistema modelado existe e não



pelo próprio sistema” (ANDRADE citado por ALMEIDA, 2017, p. 11).

- b. Variáveis de Estado: Descreve uma situação de estado de um componente do sistema, no início, durante ou no final do processo;
- c. Variáveis Endógenas: são variáveis dependentes ou de saída do sistema, geralmente gerada pelas variáveis anteriores.

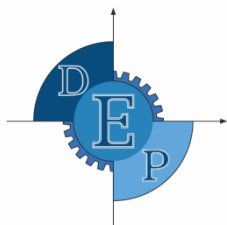
De acordo com Almeida (2017), os modelos de simulação podem ser classificados, entre:

- a. Modelos Determinísticos: Exigem que se conheçam as variáveis exógenas e endógenas, ou seja, essas variáveis não podem ser variáveis aleatórias. Sua característica operacional é de ter relações precisas e não funções de densidade de probabilidade.
- b. Modelos Estocásticos: quando é necessária a aplicação de uma função de probabilidade para caracterizar uma operação do sistema. Por ser mais complexo que um modelo determinístico, o uso de uma solução analítica é limitado. Em função disso é mais conveniente que a simulação seja utilizada para analisar e solucionar problemas de modelos estocásticos e não de modelos determinístico.

Diferente do modelo estocástico, o modelo determinístico não necessita de recursos computacionais muito complexos, devido ao fato de ser um sistema que pode ser modelado de forma analítica.

Em Almeida (2017), os modelos de simulação também são classificados, entre:

- c. Modelos Estáticos: é um sistema que não sofre alteração à medida que o tempo passa, ou seja, são independentes da variável tempo. Geralmente são determinísticos e solucionáveis por técnicas analíticas diretas, portanto os resultados podem ser obtidos de forma analítica.
- d. Modelos Dinâmicos: são modelados matematicamente e dependentes da variável tempo.



### 2.3.2 Simulação Computacional

Segundo Prado (2010), o advento do desenvolvimento dos computadores se iniciou na década de 1940. Na década de 1950, o desenvolvimento das linguagens de programação computacional *FORTRAN* e *ALGOL* foram fundamentais para a criação dos primeiros *softwares* de simulação. Este período foi caracterizado pela necessidade de um grande conhecimento de programação computacional.

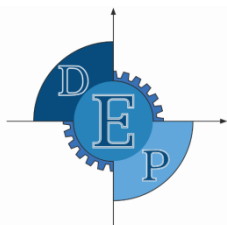
Devido à expansão do uso do computador na década de 1950 e da linguagem de simulação na década de 1960, as técnicas de simulação visual puderam ser usadas a partir da década de 1980, devido a maior habilidade de comunicação dos microcomputadores. (PRADO, 2010).

“Cada software de simulação possui uma característica básica que o diferencia dos outros: a “**visão do mundo**”. Este termo significa a forma com que o *software* foi concebido, ou como ele vê um sistema a ser simulado. Isto tem como consequência que a maneira como os dados serão fornecidos a cada *software* é diferente dos outros e os relatórios gerados também têm características peculiares.” (PRADO, 2010, p. 25).

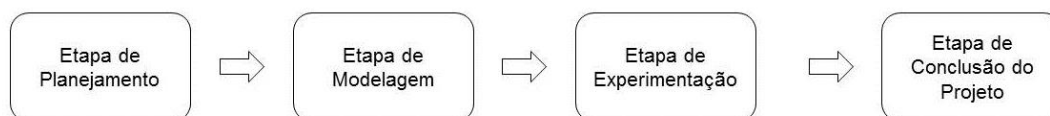
Segundo Prado (2010, p. 24), “Simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”. Assim, a simulação é uma ferramenta utilizada nas organizações como apoio para a tomada de decisões.

#### 2.3.2.1 Plano de Simulação

O Plano de Simulação (PS), criado por Almeida (2016), é um roteiro contendo quatro etapas para auxiliar no desenvolvimento do planejamento e do projeto de simulação. As quatro etapas a serem seguidas para a elaboração deste plano estão esquematizadas como demonstrado na Figura 1, com os ajustes necessários para a execução do mesmo.

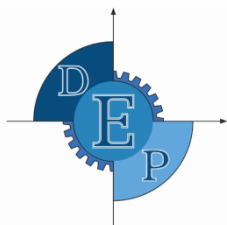


**Figura 1 – Passos da Modelagem e Simulação**



**Fonte: Adaptada de Almeida (2016, p. 6).**

1. Etapa de Planejamento: realizada após serem definidas a formulação, objetivos e análise do problema. Nela é definido o planejamento do projeto, assim como a formulação do modelo conceitual e a coleta das informações e dados. Nessa etapa define quais serão os parâmetros das principais distribuições que irão se adaptar ao modelo, conforme pode ser visto na Tabela 1, que normalmente é utilizada na ausência de dados.
2. Etapa de Modelagem: o modelo formulado é traduzido para o *software*, onde é efetuada a sua verificação e validação.
3. Etapa de Experimentação: nesta etapa são efetuadas várias simulações de experimentos, que auxilia na obtenção das informações necessárias para realizar a interpretação e análise estatísticas dos resultados.
4. Etapa de Conclusão: todas as alternativas dos cenários obtidos na etapa anterior são comparadas em busca de se identificar as melhores soluções para o problema proposto.



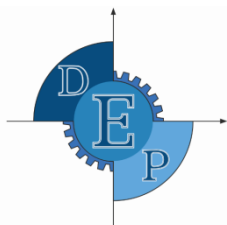
**Tabela 1 – Distribuições normalmente utilizadas na ausência de dados**

| Distribuição  | Parâmetros                                           | Características                                                                              | Exemplo em uso                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Discreta      | Valores e probabilidade de ocorrência destes valores | Apenas assume valores fornecidos pelo analista                                               | Escolha de parâmetros das entidades.<br>Usada para valores Intermediários.                              |
| Erlang        | Média/K                                              | Soma de k variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas exponencialmente. | Tempo de espera em filas, duração de chamadas telefônicas.                                              |
| Exponencial   | Média                                                | Variância alta.<br>Limitada à esquerda, entre chegadas.<br>Ilimitada à direita.              | Representa intervalos.<br>Independência entre valores.<br>Muitos valores baixos e poucos valores altos. |
| Gamma         | Beta, Alfa                                           | Faixa da distribuição positiva.                                                              | Atendimento                                                                                             |
| Log Neperiano | Média Logrtm.                                        | Produto de “peças” independentes.                                                            | Atendimento                                                                                             |
| Normal        | Média, Desvio Padrão.                                | Simétrica<br>Variabilidade controlada pelo desvio padrão.                                    | Processos somativos de outros processos.<br>Processos com simetria em relação à média.                  |
| Poisson       | Média                                                | Número de eventos aleatórios em um intervalo.                                                | Chegada                                                                                                 |
| Triangular    | Min, Moda, Max.                                      | Simétrica ou assimétrica.<br>Limitada em ambos os lados.                                     | Duração de atividades.<br>Conhecimento da moda (valor que mais ocorre), o menor valor e o maior valor.  |
| Uniforme      | Min, Max                                             | Valores com a mesma probabilidade.<br>Limitada em ambos os lados.                            | Pouco conhecimento do processo.                                                                         |
| Weibull       | Beta, Alfa                                           | Função de taxa monótona.<br>Estritamente crescente, decrescente ou constante.                | Atendimento.                                                                                            |

Fonte: Adaptada de Velloso et al. (2018, p. 6).

Conforme Almeida (2020a, p. 48), o emprego da distribuição triangular pode ser utilizado quando a variável aleatória é desconhecida, mas se têm boas estimativas dos seus limites inferior, superior e sua moda.





### 2.3.2.2 O Software ARENA

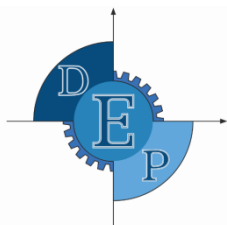
Segundo Prado (2010), o *software* ARENA foi lançado em 1993 pela empresa *Systems Modeling*, de origem americana, este foi elaborado a partir da união de dois outros sistemas. O SIMAN, criado em 1982, foi o primeiro *software* de simulação para o uso geral em computadores e, o outro, o sistema CINEMA, criado em 1984, foi o primeiro *software* para animação gráfica em computadores. A empresa *Rockwell Software*, no ano 1998, anexou a empresa *Systems Modeling*.

Para realizar a inserção de um modelo no *software* ARENA, devem ser utilizados os *templates* presentes na Barra de Projetos (*Barra de Templates*). Esta barra possui os seguintes *templates* pré-instalados chamados de *Advanced Transfer*, *Basic Process*, *Advanced Process*, *Follow Process*, *Packaging*, *Relatórios* e *Navigate*. Segundo Prado (2004), cada *template* é dividido por dois tipos de módulos. O primeiro chamado de Módulos de Fluxograma, que é usado para construir diagramas de blocos ou o fluxograma na área de trabalho. E o segundo, chamado de Módulos de Dados, recebem dados sobre o modelo. Não são colocados na Área de Trabalho, e sim em uma Área abaixo desta, que mostra qual o módulo foi escolhido e de qual *template* da Barra de Projetos ele faz parte.

Ainda de acordo com Prado (2004), para se realizar um modelo básico é necessário utilizar três blocos presentes no Módulo de Fluxogramas do *template Basic Process*. Tais blocos são chamados de *Create*, *Process* e *Dispose* que devem ser conectados pelo ícone *Connect* (Conectar), o qual realiza a interconexão entre estes blocos, pois sem estas conexões não é possível iniciar as simulações realizadas pelo programa.

“O ponto de partida para todo modelo é o bloco *Create*. É desse ponto que as entidades surgem no sistema, sejam elas clientes, documentos, peças, equipamentos, navios, aviões, qualquer coisa. As entidades são “tudo aquilo” que sofrerá a ação das diversas operações lógicas do fluxo.” (ALMEIDA, 2020a, p. 18).

No bloco *Create* é necessário definir qual expressão com seu valor e unidade de tempo, que mais representa o intervalo entre chegadas das entidades escolhidas



para entrar no sistema, além de definir a sua quantidade de entrada. Ainda segundo Almeida (2020a), o bloco *Process* demonstra qual ação será realizada na entidade ao ocupar um recurso, máquina e/ou operador que devem ser adicionados, durante um intervalo de tempo. Neste bloco também é necessário informar qual é a expressão que mais representa a situação, com seu valor e unidade de tempo.

“[O Bloco *Dispose*] [...] é o “fim” de todo projeto de simulação. É por ele que as entidades desaparecem do sistema, sendo tão obrigatório quanto o bloco *Create*. Se existem muitas entidades acumulando-se na fila de um processo pode ter ocorrido um erro de modelagem em que uma entidade entrou no bloco *Dispose* sem antes ter liberado o processo que havia reservado.” (ALMEIDA, 2020a, p. 19).

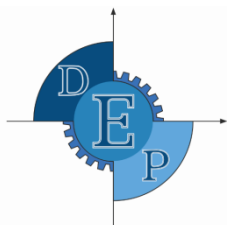
De acordo com Prado (2004), é possível introduzir estações de trabalho no *software*. Então, para modelar estações de trabalho no ARENA é necessário utilizar os blocos *Station*, *Enter* e *Leave* do *template Advanced Transfer*.

“[O Módulo *Station*] é utilizado para informar que a entidade ocupou uma estação. [...] O Módulo *Enter* tem a mesma finalidade e a mesma configuração que o módulo *Station*. Assim, podemos utilizar tanto um como outro. [...] O módulo *Leave* é utilizado para informar que a entidade desocupou uma estação.” (PRADO, 2004, p. 74 e 75).

Ainda segundo Prado (2004), para poder conectar o *Leave* de uma estação com o início de outra *Station*, é necessário programar o *Connected Type* do bloco *Leave*. Marcar a opção *Route* no *Connected Type* permite que este tipo de conexão envie a entidade para a estação seguinte selecionada, com um valor e a unidade de tempo informados para realizar tal rota.

### 2.3.2.3 Simulação de Falhas no Software ARENA

Segundo Rossetti (2016, p. 562), para simulação de falhas o Arena possui o módulo de dados *Failures* dentro do *template Advanced Process*, que pode ser aplicado no modelo para reproduzir uma falha ou um reparo dos equipamentos do



processo de produção. Este módulo permite modelar a mudança de capacidade não planejada ou aleatória, que podem colocar o recurso no estado de “*failed*” (“falha”). Tal módulo faz com que ocorra uma paralisação total do recurso escolhido. Então, quando este recurso fica no estado de “*failed*” (“falha”), todas as unidades presentes nele são interrompidas, causando uma indisponibilidade das mesmas. As falhas baseadas em uso, ocorrem após o recurso ser liberado. Cada vez que o recurso é liberado, uma contagem é incrementada; quando atinge o número especificado, até o valor da falha, o recurso falha. Novamente, se o recurso tem unidades ocupadas, as regras de mudança de capacidade são invocadas. Um recurso pode ter várias falhas (com base em tempo e contagem) definidas para governar seu comportamento. No caso de várias falhas que ocorrem antes do reparo, as falhas entram em fila e fazem com que os tempos de reparo sejam executados consecutivamente.

Para Rossetti (2016), neste módulo existem duas formas de se colocar uma falha no recurso. A primeira é baseada em tempo e a segunda é baseada em contagem. A falha baseada em tempo ocorre conforme uma distribuição estatística ou em um espaço de tempo pré-definido. Então, esta falha ocorre somente quando o evento de falha for programado. Quando ela for reparada, tal evento é reprogramado e o tempo para ela ocorrer novamente é reiniciado. Já a falha baseada em contagem ocorre quando se tem definida uma quantidade específica de peças que passam pelo recurso.

Ainda, de acordo com Rossetti (2016), ao adicionar uma falha em um recurso, o módulo de dados *Failures* possui três opções de regras definidas para aplicar as falhas, que são ilustrados pela Figura 2. Estas falhas ocorrem em um tempo programado pelo usuário que gera a mudança do processo causando o estado de “*failed*” (“falha”) no recurso. A primeira é a opção *Wait* (Espera), nela o recurso ocupado por uma entidade aguarda a finalização do seu processamento e, logo após modifica o estado do recurso para que entre no estado de “*failed*” (“falha”) ou modifique sua capacidade. A segunda opção definida é a *Ignore* (Ignorar) que consiste em interromper imediatamente o processamento do recurso, mesmo que

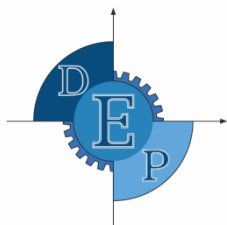


ele esteja ocupado pela entidade. Para isso, ele finaliza o processamento da entidade simultaneamente, enquanto efetua a modificação do seu estado, gerando o estado de “*failed*” (“falha”) no recurso. Por último, a opção *Preempt* (Antecipação), nela o recurso ocupado por uma entidade paralisa seu estado de ocupação e o modifica para o estado de “*failed*” (“falha”), após cessar este novo estado, e assim que o recurso estiver disponível, o processamento da entidade retorna a partir do ponto onde ocorreu a paralização do estado de ocupação.



Fonte: Elaborada pelas autoras (2020).

Rossetti (2016) cita que para representar um cenário característico de falha temos que, após um período operacional normal (tempo de atividade ou *uptime*) ocorre uma falha em um recurso que está em processamento. Este irá ter seu processamento interrompido e em seguida passará por um tempo de reparo, em que ficará inativo. São chamadas dependentes da operação, as falhas que ocorrem enquanto o recurso (máquina) está em processamento. Também podem ocorrer as falhas independentes da operação, que são aquelas que ocorrem em recursos muito tecnológicos, que podem falhar independente do status do recurso. Pode ser incluído nesse tipo de falha o mau desempenho da máquina, as paradas para ajustes e outros atrasos adicionais, que são modelados em um determinado sistema e podem ocasionar maior tempo de reparo.

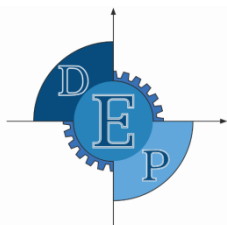


Em Rossetti (2016), no *software* ARENA o usuário pode definir a quantidade de estados que desejar e também tem a possibilidade de utilizar os estados já existentes, chamados estados automáticos. Para um recurso modelado no ARENA existem quatro estados automáticos: *Idle* (Ocioso), *Busy* (Ocupado), *Failed* (Falha) e *Inactive* (Inativo). O usuário pode modelar e definir a mudança de um estado para outro. Por exemplo, o modelador definiu a chegada de uma falha em um recurso “y” do processo, automaticamente este recurso entrará em um estado de *Failed* (Falha), caso outro evento seja programado a transição irá ocorrer e o recurso entrará no próximo estado programado. Ainda de acordo com Rossetti (2016), os estados adicionais de falha e parada, que podem ser descritos como *Down* (Desligada), *Cleaning* (Limpeza), *Adjustment* (Ajuste) entre outros, fazem com que os dois estados fundamentais de uma máquina, *Idle* (Ocioso) e *Busy* (Ocupado) tenham que ser aumentados.

### 3. METODOLOGIA

O estudo foi efetuado junto a empresa, LL Indústria Calçadista, nome fictício para a preservação de seus dados. A empresa localizada na cidade de Nova Serrana, no Polo Calçadista do Estado de Minas Gerais, é especializada na produção de calçados femininos. A indústria possui em sua linha de produção vários modelos de calçado, dentre eles o que foi denominado de “Modelo X”, que foi analisado neste trabalho. A empresa trabalha a partir de demanda do cliente, o que significa quando o cliente realiza o pedido, a produção é iniciada, ou seja, a sua produção é puxada. A sua linha de produção opera durante cinco dias da semana, de segunda a sexta, por oito horas diárias.

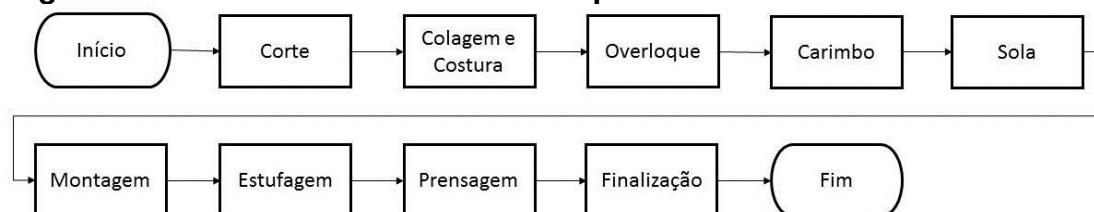
Os dados levantados, em agosto de 2020, para realizar a modelagem e simulação deste trabalho foram coletados através de uma visita técnica utilizando de entrevistas com os funcionários e gravação em vídeo do processo, que serviu para observar e conhecer as etapas do processo produtivo. Processo executado por cinco funcionários na linha de produção.



O Modelo X, utilizado para a análise deste trabalho, foi escolhido devido aos processos utilizados na sua linha de produção, possuir as etapas base para os modelos de calçado fabricado pela LL Indústria Calçadista. Conforme os dados levantados na visita, a produção de vinte e quatro pés deste modelo ocupa duas horas diárias da linha de produção da empresa.

A LL Indústria Calçadista segue o macro fluxo no processo de fabricação do Modelo X, conforme ilustrado na Figura 3. O macro fluxo é iniciado no recebimento da matéria prima. Então, segue para as etapas operacionais, nas quais se tem o processo de Corte da matéria prima efetuada no equipamento balancim, passa para o processo de Colagem e Costura, esta costura é efetuada na máquina de costura. Em seguida vai para o processo Overloque realizado na máquina de costura overloque, a seguir, passa, sucessivamente, para os processos de Carimbo, Sola, Montagem, Estufagem e Prensagem, por último, segue para o processo de Finalização.

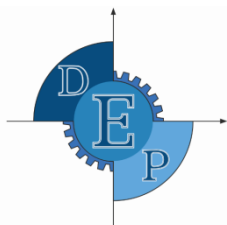
**Figura 3 – Macro Fluxo do Processo Operacional Simulado do Modelo X**



**Fonte: Elaborada pelas autoras (2020).**

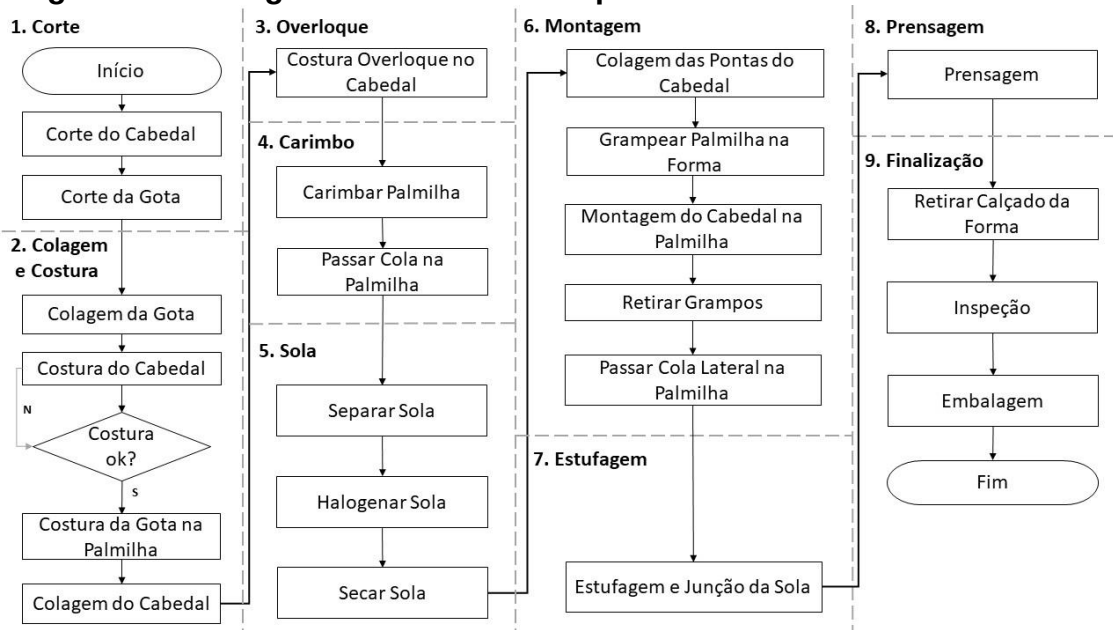
Conforme ilustrado na Figura 4, o fluxograma apresenta o detalhamento da linha de produção do Modelo X, fabricado pela LL Indústria Calçadista, de acordo com o que foi acompanhado na produção do modelo, durante a visita técnica. Como apresentado no fluxograma, a fabricação do modelo ocorre em vinte e duas etapas. Após a chegada de material na linha de produção, as duas primeiras etapas são realizadas no processo de Corte, que são Corte do Cabedal e Corte da Gota. Seguindo para as quatro etapas seguintes presentes no processo de Colagem e Costura. Estas etapas são divididas em Colagem da Gota, Costura do Cabedal, Costura da Gota na Palmilha e Colagem do Cabedal. O próximo processo é o de





Overloque que consiste em uma etapa, sendo feita a costura overloque no Cabedal. O processo de Carimbo é subdividido em duas etapas Carimbar Palmilha e Passar Cola na Palmilha. Após, é realizado o Processo da Sola, que é dividido nas três etapas Separação da Sola, Halogenação da Sola e Secagem da Sola. Em seguida, a linha de produção passa para o processo de Montagem, o qual realiza as cinco etapas, Colagem nas pontas do Cabedal, Grampear a Palmilha na Forma, Montagem do Cabedal na Palmilha, Retirar Grampos, Passar Cola na Lateral da Palmilha. Seguida pelos processos de Estufagem, para a junção do Calçado na Sola, e pelo processo de Prensagem do calçado. O último processo é o de Finalização, que é composto por três etapas. Essas etapas são de Retirada da Forma, Inspeção e por último a Embalagem do Calçado.

**Figura 4 – Fluxograma do Processo Operacional Simulado do Modelo X**

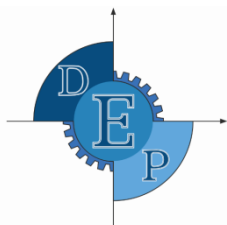


Fonte: Elaborada pelas autoras (2020).

Definidas as etapas do fluxo de produção do Modelo X na LL Indústria Calçadista, foram aplicadas as etapas quatro do Plano de Simulação, proposto por Almeida (2016).

#### 4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO





#### 4.1 Simulação do modelo no software ARENA

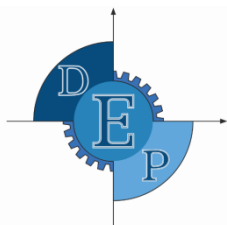
A LL Indústria Calçadista não possui informações registradas das etapas dos processos e nem estimativas dos mesmos documentadas. Foi observado o processo de fabricação do Modelo X, para criação do modelo e obtenção dos dados necessários para a simulação do processo de produção do mesmo, conforme a primeira etapa, Etapa de Planejamento do PS.

Conforme constatado, no dia agendado para o levantamento das medições do processo havia uma demanda de produção de vinte e quatro pés de sapatos (doze pares) do Modelo X. O tempo diário disponibilizado, na LL Indústria Calçadista, no processo para a produção do calçado analisado são de duas horas (7200 segundos). No restante do dia, de oito horas diárias, a linha de produção é utilizada para produzir outros modelos de calçados.

Na LL Indústria Calçadista a fabricação do Modelo X é efetuada a partir da demanda de pedidos do cliente. Então, no sistema analisado, a chegada na linha de produção foi caracterizada pela chegada de materiais para a produção de vinte e quatro pés de sapatos em intervalos de duas horas. Neste caso, foram consideradas reproduções sucessivas, múltiplas, de duas horas diárias de trabalho do ciclo analisado.

Para as etapas internas dos processos de fabricação foram utilizados os dados apresentados na Tabela 1, que apresenta as opções para a escolha da melhor distribuição, para representar os processos no *software* ARENA. Na visita técnica, com os dados medidos durante o acompanhamento e análise da linha de produção foi possível levantar os tempos mínimo, máximo e a moda, tempo médio que mais ocorre, viabilizando a utilização de uma distribuição para a simulação dos processos.

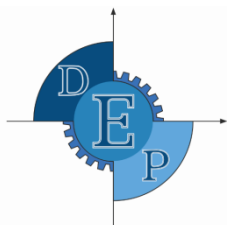
A Tabela 2 contém os seguintes títulos das colunas, “Operação” que indica qual o recurso que está sendo utilizado; “Bloco” que indica qual foi o bloco do *Template Basic* ou *Advanced Process* utilizado; “Operador” que indica qual dos cinco operadores da indústria calçadista realiza a etapa do processo; “Rota” que



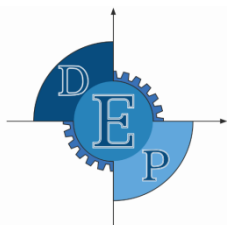
indica para qual estação a entidade irá após terminar o processo em que está; “Mover em Segundos” que indica o tempo gasto entre o deslocamento de uma estação para outra. Os dois próximos títulos são “Distribuição de Probabilidade” e “Expressão (Segundos)” que demonstram qual foi o tipo de distribuição de probabilidade escolhida, para cada processo do sistema e o seu valor em segundos. O último título “Tempo de Espera (Segundos)” é referente ao tempo de espera em segundos, a ser preenchido no bloco *Delay* do *Template Advanced Process*, para aguardar a secagem da cola na sola do sapato. O bloco da operação chamado “Costura ok?” é um bloco *Decide* do *Template Advanced Process*, o qual indica a verificação da costura do cabedal. Conforme os dados levantados, 79% da quantidade de peças que o percorrem, seguem no fluxo do processo e que 21% delas retornam com algum erro de costura para a etapa anterior, para ser reprocessado. Para melhor representar o modelo do processo produtivo e suas respectivas estações de trabalho, presentes na linha de produção do Modelo X, foram utilizados os blocos *Enter* e *Leave* do *Template Advanced Process*.

**Tabela 2 – Dados Coletados**

| Operação                  | Bloco   | Ope-<br>rador | Rota                      | Mover em<br>Segundos | Distribuição<br>Probabilidade | Expressão<br>(Segundos) | Tempo de<br>Espera<br>(Segundos) |
|---------------------------|---------|---------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Chegada de Material       | Create  | -             | -                         | -                    | Constante                     | CONST(7200)             | -                                |
| Estação Corte             | Enter   | -             | -                         | -                    | -                             | -                       | -                                |
| Corte Cabedal             | Process | 1             | -                         | -                    | Triangular                    | TRIA(11,17,21)          | -                                |
| Corte Gota                | Process | 1             | -                         | -                    | Triangular                    | TRIA(8,9,14)            | -                                |
| Leave Corte para Costura  | Leave   | -             | Estação Colagem e Costura | 60                   | -                             | -                       | -                                |
| Estação Colagem e Costura | Enter   | -             | -                         | -                    | -                             | -                       | -                                |
| Colagem da Gota           | Process | 2             | -                         | -                    | Triangular                    | TRIA(6,8,12)            | -                                |
| Costura do Cabedal        | Process | 3             | -                         | -                    | Triangular                    | TRIA(17,19,21)          | -                                |
| Costura ok?               | Decide  | 2             | -                         | -                    | -                             | -                       | -                                |



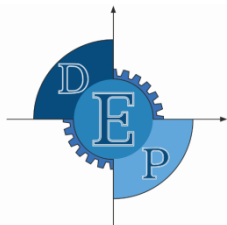
|                                        |         |   |                   |    |            |                |     |
|----------------------------------------|---------|---|-------------------|----|------------|----------------|-----|
| Costura da Gota                        | Process | 3 | -                 | -  | Triangular | TRIA(23,25,28) | -   |
| Colagem do Cabedal                     | Process | 2 | -                 | -  | Triangular | TRIA(41,44,47) | -   |
| Leave Colagem e Costura Para Overloque | Leave   | - | Estação Overloque | 30 | -          | -              | -   |
| Estação Overloque                      | Enter   | - | -                 | -  | -          | -              | -   |
| Costura Overloque                      | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(9,12,13)  | -   |
| Leave Overloque para Carimbo           | Leave   | - | Estação Carimbo   | 10 | -          | -              | -   |
| Estação Carimbo                        | Enter   | - | -                 | -  | -          | -              | -   |
| Carimbar Palmilhas                     | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(3,4,6)    | -   |
| Passar Cola nas Palmilhas              | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(9,10,13)  | -   |
| Leave Carimbo para Sola                | Leave   | - | Estação Sola      | 10 | -          | -              | -   |
| Estação Sola                           | Enter   | - | -                 | -  | -          | -              | -   |
| Separar as Solas                       | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(12,13,16) | -   |
| Halogenar as Solas                     | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(8,9,12)   | -   |
| Secagem da Sola                        | Delay   | - | -                 | -  | -          | -              | 900 |
| Leave Sola para Montagem               | Leave   | - | Estação Montagem  | 10 | -          | -              | -   |
| Estação Montagem                       | Enter   | - | -                 | -  | -          | -              | -   |
| Colagem das Pontas do Cabedal          | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(2,5,6)    | -   |
| Grampear as Palmilhas nas Formas       | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(4,6,11)   | -   |
| Montagem do Cabedal na Palmilha        | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(28,33,52) | -   |
| Retirar os Grampos das Formas          | Process | 4 | -                 | -  | Triangular | TRIA(4,6,9)    | -   |



|                                       |         |   |                     |    |            |                |   |
|---------------------------------------|---------|---|---------------------|----|------------|----------------|---|
| Passar Cola na Lateral das Palmilhas  | Process | 4 | -                   | -  | Triangular | TRIA(20,26,35) | - |
| Leave Montagem para Estufagem         | Leave   | - | Estação Estufagem   | 10 | -          | -              | - |
| Estação Estufagem                     | Enter   | - | -                   | -  | -          | -              | - |
| Estufagem e Junção do Calçado na Sola | Process | 4 | -                   | -  | Triangular | TRIA(21,26,28) | - |
| Leave Estufagem para Prensagem        | Leave   | - | Estação Prensagem   | 10 | -          | -              | - |
| Estação Prensagem                     | Enter   | - | -                   | -  | -          | -              | - |
| Prensagem                             | Process | 4 | -                   | -  | Constante  | CONST(19)      | - |
| Leave Prensagem para Finalização      | Leave   | - | Estação Finalização | 10 | -          | -              | - |
| Estação Finalização                   | Enter   | - | -                   | -  | -          | -              | - |
| Retirar o Calçado da Forma            | Process | 5 | -                   | -  | Triangular | TRIA(6,7,8)    | - |
| Inspeção                              | Process | 5 | -                   | -  | Triangular | TRIA(4,5,7)    | - |
| Embalagem                             | Process | 5 | -                   | -  | Triangular | TRIA(15,21,35) | - |
| Leave Finalização para Saída          | Leave   | - | Saída               | 10 | -          | -              | - |
| Saída                                 | Enter   | - | -                   | -  | -          | -              | - |
| Saída do Calçado do Processo          | Dispose | - | -                   | -  | -          | -              | - |

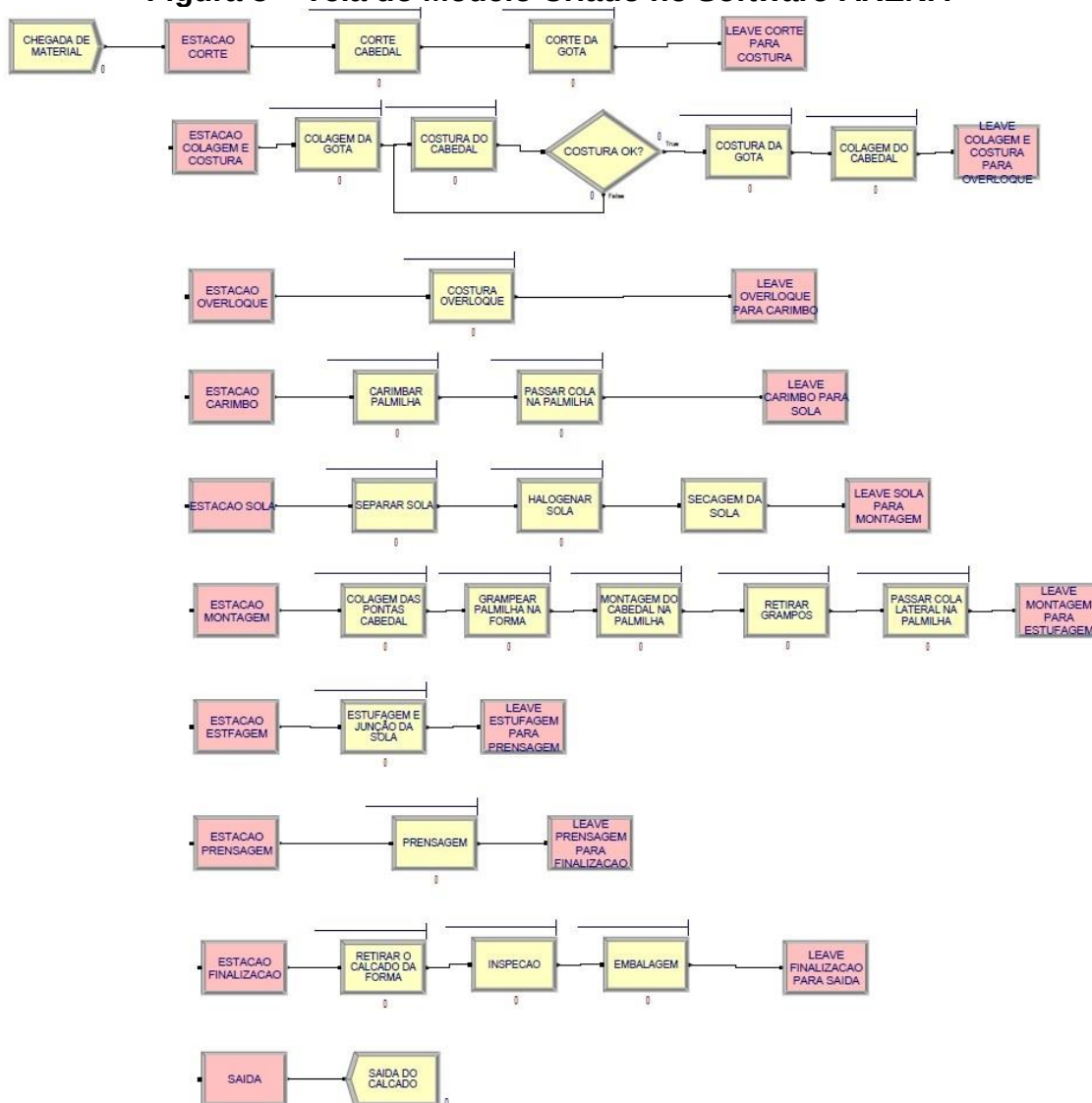
**Fonte: Elaborada pelas autoras (2020).**

A segunda etapa do Plano de Simulação (PS) caracterizada pela Etapa de Modelagem na qual o modelo preparado, apresentado pela Figura 4, foi convertido para o *software* de simulação ARENA, apresentado na Figura 5, onde foi executada a sua verificação e validação, que consistiu de um dia de trabalho de duas horas diárias. Esta validação foi efetuada com vinte replicações para aumentar o intervalo

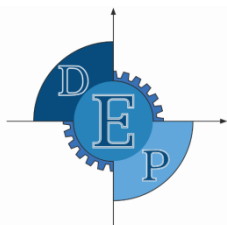


de confiança da amostragem, conforme Figura 6. Então, foi necessário utilizar os dados presentes na Tabela 2 para o modelo convertido para o *software* ARENA. Com os resultados exibidos pelo *software* foi confirmada a adequação do modelo de simulação da linha de produção do Modelo X, produzido pela LL Indústria Calçadista.

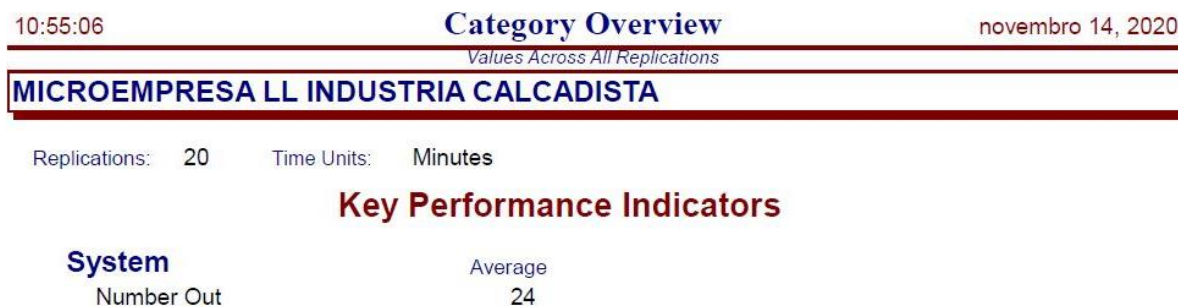
**Figura 5 – Tela do Modelo Criado no Software ARENA**



Fonte: Elaborada pelas autoras (2020).



**Figura 6 – Validação do Modelo no Software ARENA**

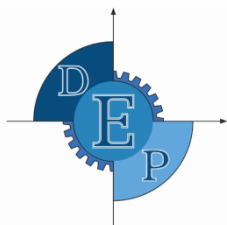


Fonte: Elaborada pelas autoras a partir dos resultados do software ARENA (2020).

#### 4.2 Simulação de Falhas

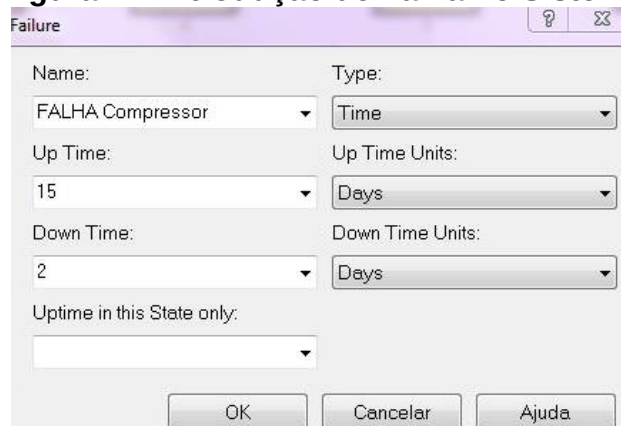
Após execução e aprovação do modelo, é efetuada a terceira etapa do PS, sendo caracterizada pela experimentação. Nas simulações do sistema, os dados da modelagem foram rodados para as várias condições das análises. Em todas as simulações foram realizadas vinte replicações, para aumentar o intervalo de confiança dos dados. Foram efetuadas simulações de condição de trabalho da fábrica para vinte dias, correspondente a um mês de produção, e vinte e cinco dias, em função da análise de falhas, realizado pelos operadores na fabricação do Modelo X. Considerando a hipótese de demandas sucessivas de lotes de vinte e quatro pés de sapatos, que são efetuados durante as duas horas diárias, disponibilizadas na linha de produção para o Modelo X, como replicações sucessivas das condições levantadas na visita de campo.

Posterior às simulações de operação “normal” (sem falhas) foi implementado no sistema a hipótese de uma falha grave baseada em tempo de operação, como uma parada do compressor, demonstrado na Figura 7, situação identificada durante a visita, onde foi feita entrevistas para identificar as possíveis falhas em cada recurso bem como o tempo de interrupção que tais falhas causavam no sistema. Chamada de falha grave por se tratar de uma falha em uma máquina necessária para o funcionamento de cinco dos recursos do processo analisado, sendo eles máquina de carimbar, máquina grampeador, máquina pistola de cola 1, máquina pistola de cola 2 e máquina prensa. Situação que foi simulada para ocorrer após



quinze dias de operação implicando em uma parada de dois dias de trabalho no compressor, até ser efetuada sua reparação.

**Figura 7 – Introdução de Falha no Sistema**



Fonte: Elaborada pelas autoras a partir do software ARENA (2020).

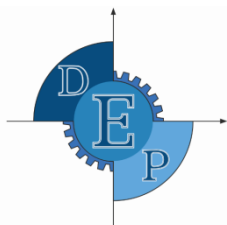
### 4.3 Análise de Resultados

Os resultados na Tabela 3 apresentam os dados da simulação do ciclo de operação da produção do Modelo X, realizado pela LL Indústria Calçadista. Nesta tabela são apresentadas as produções sem interrupções (sem falhas) considerando o montante produzido em vinte dias e em vinte e cinco dias de trabalho, sendo duas horas diárias para produzir vinte e quatro pés de sapato. Para todas as simulações foram consideradas vinte replicações do processo produtivo, para aumentar o intervalo de confiança dos dados.

**Tabela 3 – Simulação de Operação Sem Interrupções**

| Parâmetros                                               |    |    |
|----------------------------------------------------------|----|----|
| Number of Replications<br>(Número de Replicações)        | 20 | 20 |
| Replication Length<br>(Duração da Replicação<br>em Dias) | 20 | 25 |
| Hours Per Day<br>(Horas por Dia)                         | 2  | 2  |





| <b>Resultados</b>                         |                 |                              |                              |                 |                              |                              |
|-------------------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| Statistics (Estatísticas)                 | Average (Média) | Minimum Value (Valor Mínimo) | Maximum Value (Valor Máximo) | Average (Média) | Minimum Value (Valor Mínimo) | Maximum Value (Valor Máximo) |
| <b>Time (Tempo em Minutos)</b>            |                 |                              |                              |                 |                              |                              |
| VA Time (TA)                              | 20,649          | 19,889                       | 22,411                       | 20,651          | 19,889                       | 22,411                       |
| Wait Time (TF)                            | 46,721          | 9,355                        | 66,917                       | 46,705          | 9,355                        | 66,917                       |
| Transfer Time                             | 2,667           | 2,667                        | 2,667                        | 2,667           | 2,667                        | 2,667                        |
| Total Time (TS)                           | 70,037          | 32,465                       | 90,225                       | 70,023          | 32,465                       | 90,300                       |
| <b>Other (Outros)</b>                     |                 |                              |                              |                 |                              |                              |
| Number In                                 | 480,000         | -                            | -                            | 600,000         | -                            | -                            |
| Number Out                                | 480,000         | -                            | -                            | 600,000         | -                            | -                            |
| Work In Process (WIP)                     | 14,007          | 0,000                        | 24,000                       | 14,005          | 0,000                        | 24,000                       |
| <b>Usage (Utilização)</b>                 |                 |                              |                              |                 |                              |                              |
| Instantaneous Utilization (Taxa Ocupação) |                 |                              |                              |                 |                              |                              |
| Maq. Balancim                             | 0,088960        | 0,000                        | 1,000                        | 0,088953        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. de Carimbar                          | 0,014437        | 0,000                        | 1,000                        | 0,014439        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. de Costura                           | 0,164500        | 0,000                        | 1,000                        | 0,164500        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Estufa                               | 0,082240        | 0,000                        | 1,000                        | 0,082288        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Grampeador                           | 0,024454        | 0,000                        | 1,000                        | 0,024470        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Overloque                            | 0,037767        | 0,000                        | 1,000                        | 0,037768        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Pistola de Cola 1                    | 0,186600        | 0,000                        | 1,000                        | 0,186500        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Pistola de Cola 2                    | 0,014434        | 0,000                        | 1,000                        | 0,014428        | 0,000                        | 1,000                        |
| Maq. Prensa                               | 0,063333        | 0,000                        | 1,000                        | 0,063333        | 0,000                        | 1,000                        |
| Operador 1                                | 0,088960        | 0,000                        | 1,000                        | 0,088953        | 0,000                        | 1,000                        |
| Operador 2                                | 0,186600        | 0,000                        | 1,000                        | 0,186500        | 0,000                        | 1,000                        |
| Operador 3                                | 0,164500        | 0,000                        | 1,000                        | 0,164500        | 0,000                        | 1,000                        |
| Operador 4                                | 0,586400        | 0,000                        | 1,000                        | 0,586500        | 0,000                        | 1,000                        |
| Operador 5                                | 0,103400        | 0,000                        | 1,000                        | 0,103700        | 0,000                        | 1,000                        |

**Legenda:**

TA = tempo de valor agregado

TF = tempo em fila

TS = tempo total no sistema

Transfer Time = tempo de deslocamento entre estações

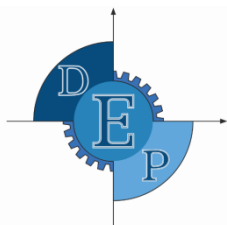
WIP = peças em processamento

Number In = n° de materiais que entram do sistema

Number Out = n° de pés de sapato que saem do sistema

**Fonte: Elaborada pelas autoras a partir dos resultados do software ARENA (2020).**

O processo de produção do Modelo X nas condições apresentadas para um dia de trabalho produziu os vinte e quatro pés de sapato conforme especificado na validação. Como pode ser observado pelos resultados apresentados na Tabela 3,

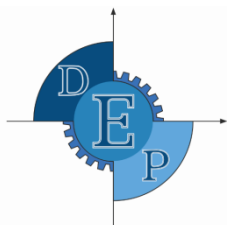


para vinte dias e vinte cinco dias, respectivamente, produz 480 e 600 pés de sapatos, o que corresponde aos múltiplos da quantidade de dias do processo produtivo básico de duas horas de trabalho, para produzir vinte e quatro pés do Modelo X. Também, pode ser observado que o *Number In* foi o mesmo que o *Number Out*, o que significa que a mesma quantidade de material que entrou em todos os dias simulados do sistema saiu do mesmo como pés de sapato.

O ponto principal a ser destacado, indicado pelos resultados apresentados na Tabela 3, foi a disponibilidade presente no sistema de produção da linha do Modelo X, nas condições levantadas. Tal disponibilidade pode ser verificada pelos baixos índices de utilização dos equipamentos e dos operadores durante o processo produtivo. A taxa de utilização da Máquina Pistola de Cola 1 é de 18,66%, que é a máquina mais ocupada em vinte dias de produção. Já o Operador 4, que realiza a maioria das etapas do processo produtivo, esteve 58,64% do seu tempo de trabalho ocupado, os demais operadores e máquinas possuem índices de ocupação bem inferiores. Tais índices possuem o mesmo padrão para vinte e cinco dias de simulação.

A disponibilidade apresentada foi fundamental para a definição da simulação de falhas apresentadas no sistema. Pequenas falhas, que poderiam ser adicionadas, não interfeririam no processo produtivo, considerando que ele dispõe de tempo de folga para recuperar a sua produção perdida. Desta maneira, a introdução de pequenas falhas no sistema de produção se torna desnecessária, de forma que o mesmo se recupera das perdas geradas durante o tempo simulado do processo produtivo.

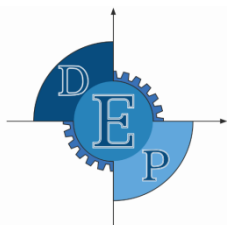
A Tabela 4, que apresenta as mesmas condições de simulação da Tabela 3, com a diferença da introdução de uma falha grave em um equipamento, que afeta a operação de vários processos da linha de produção, como uma que ocorreu, no compressor, no mês anterior à visita técnica. Foi considerado, nesta simulação, a quebra do compressor após quinze dias de produção, considerando que o tempo demandado para a sua recuperação seria de dois dias de trabalho. A parada do



compressor paralisa os processos de colagem, de prensagem, de grampear e de carimbar no sistema analisado.

**Tabela 4 – Simulação de Operação Com Interrupções**

| Parâmetros                                            |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
|-------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Number of Replications<br>(Número de Replicações)     | 20                 |                                       |                                       | 20                 |                                       |                                       |
| Replication Length<br>(Duração da Replicação em Dias) | 20                 |                                       |                                       | 25                 |                                       |                                       |
| Hours Per Day<br>(Horas por Dia)                      | 2                  |                                       |                                       | 2                  |                                       |                                       |
| Falha Compressor Up<br>Time em Dias                   | 15                 |                                       |                                       | 15                 |                                       |                                       |
| Falha Compressor Down<br>Time em Dias                 | 2                  |                                       |                                       | 2                  |                                       |                                       |
| Resultados                                            |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
| Statistics (Estatísticas)                             | Average<br>(Média) | Minimum<br>Value<br>(Valor<br>Mínimo) | Maximum<br>Value<br>(Valor<br>Máximo) | Average<br>(Média) | Minimum<br>Value<br>(Valor<br>Mínimo) | Maximum<br>Value<br>(Valor<br>Máximo) |
| Time (Tempo em Minutos)                               |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
| VA Time (TA)                                          | 20,650             | 19,889                                | 22,411                                | 20,652             | 19,889                                | 22,411                                |
| Wait Time (TF)                                        | 88,143             | 9,355                                 | 464,490                               | 80,142             | 9,127                                 | 464,490                               |
| Transfer Time                                         | 2,667              | 2,667                                 | 2,667                                 | 2,667              | 2,667                                 | 2,667                                 |
| Total Time (TS)                                       | 111,460            | 32,465                                | 488,610                               | 103,460            | 32,012                                | 488,610                               |
| Other (Outros)                                        |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
| Number In                                             | 480,000            | -                                     | -                                     | 600,000            | -                                     | -                                     |
| Number Out                                            | 467,550            | -                                     | -                                     | 600,000            | -                                     | -                                     |
| Work In Process (WIP)                                 | 22,336             | 0,000                                 | 81,000                                | 20,692             | 0,000                                 | 81,000                                |
| Usage (Utilização)                                    |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
| Instantaneous Utilization (Taxa Ocupação)             |                    |                                       |                                       |                    |                                       |                                       |
| Maq. Balancim                                         | 0,088957           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,088923           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. de Carimbar                                      | 0,014443           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,014435           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. de Costura                                       | 0,164700           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,164600           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. Estufa                                           | 0,081572           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,082268           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. Grampeador                                       | 0,024440           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,024492           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. Overloque                                        | 0,037777           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,037767           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. Pistola de Cola 1                                | 0,186600           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,186500           | 0,000                                 | 1,000                                 |
| Maq. Pistola de Cola 2                                | 0,014436           | 0,000                                 | 1,000                                 | 0,014440           | 0,000                                 | 1,000                                 |



|             |          |       |       |          |       |       |
|-------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Maq. Prensa | 0,061781 | 0,000 | 1,000 | 0,063333 | 0,000 | 1,000 |
| Operador 1  | 0,088957 | 0,000 | 1,000 | 0,088923 | 0,000 | 1,000 |
| Operador 2  | 0,186600 | 0,000 | 1,000 | 0,186500 | 0,000 | 1,000 |
| Operador 3  | 0,164700 | 0,000 | 1,000 | 0,164600 | 0,000 | 1,000 |
| Operador 4  | 0,584200 | 0,000 | 1,000 | 0,586600 | 0,000 | 1,000 |
| Operador 5  | 0,100900 | 0,000 | 1,000 | 0,103700 | 0,000 | 1,000 |

**Legenda:**

TA = tempo de valor agregado

WIP = peças em processamento

TF = tempo em fila

Number In = n° de materiais que entram do sistema

TS = tempo total no sistema

Number Out = n° de pés de sapato que saem do sistema

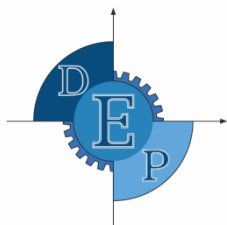
Transfer Time = tempo de deslocamento entre estações

**Fonte: Elaborada pelas autoras a partir dos resultados do software ARENA (2020).**

A Tabela 4 apresenta os resultados com a introdução de falha no compressor. Apesar da falha simulada, paralisar várias etapas do processo produtivo, por dois dias de trabalho após quinze dias, a produção em vinte dias sofre uma redução de 480 para 468 pés de sapatos, causando uma perda de doze pés de sapato, 2,5% da produção. A simulação mostra que houve a redução da produção com introdução da falha, pois em vinte dias de trabalho, a disponibilidade presente não foi suficiente para recuperar a produção. A taxa de utilização da Máquina Pistola de Cola 1 é de 18,66%, que ainda é a máquina mais ocupada em vinte dias de produção. Já o Operador 4, que realiza a maioria das etapas do processo produtivo esteve 58,42% do seu tempo de trabalho ocupado, os demais operadores e máquinas possuem índices de ocupação inferiores.

Diante dos dados apresentados, referentes à perda ocorrida pela falha do compressor nos vinte dias de produção, foi levantado, através de simulações, o número de dias trabalhados necessários para que fosse recuperada esta queda. Mesmo com a falha no compressor o que se constata, em vinte e cinco dias de trabalho, é que não houve perda de produção, pois ele deveria produzir 600 pés de sapato, o que foi obtido devido à disponibilidade do sistema.

Apesar da redução da disponibilidade, ainda houve folga suficiente do sistema para conseguir recuperar a produção. Desta forma, a introdução desta falha alterou o tempo de espera de 46,754 para 80,1420 minutos, consequentemente



aumentando o tempo total médio de produção de um pé de sapato de 70,0227 para 103,46 minutos. A taxa de utilização da Máquina Pistola de Cola 1 é de 18,65%, que é a máquina mais ocupada em vinte e cinco dias de produção. Já o Operador 4, que realiza a maioria das etapas do processo produtivo, esteve 58,65% do seu tempo de trabalho ocupado, os demais operadores e máquinas possuem índices de ocupação inferiores.

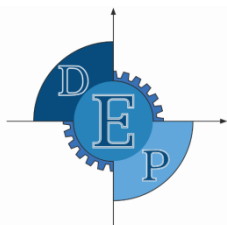
Como último passo do PS, a seguir, será apresentada a Conclusão deste trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

A análise do processo de produção e a simulação do mesmo no software ARENA, em condições normais de operação e com as interrupções devido às falhas, permite vislumbrar vários ajustes para o processo produtivo, que podem ser efetuados, visando a sua otimização através de adequações nas taxas de utilização das máquinas e dos operadores.

Com a simulação e análise de falhas no processo, foi possível detectar o que essa falha representa em termos de perda na linha de produção. O que torna relevante, o estudo das simulações de falhas no sistema. Conforme registrado nos resultados obtidos das simulações, a LL Indústria Calçadista apresenta uma disponibilidade em seu processo de produção.

No caso apresentado, a introdução da falha de dois dias de parada no sistema após quinze dias de trabalho provoca a diminuição da produção de sapatos em 2,5%, para a simulação de vinte dias de trabalho de duas horas diárias. Quando foi aumentado o tempo em dias de vinte para vinte e cinco, a disponibilidade presente no sistema fez com que esta falha não provocasse uma perda na produção. A análise desta falha apresentada foi capaz de determinar o tempo mínimo de recuperação da produção, mesmo com a introdução de uma falha grave. O que mostra que a disponibilidade presente no sistema de vinte e cinco dias de

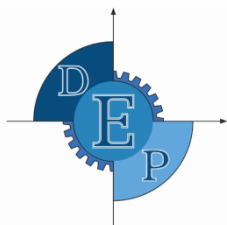


trabalho é suficiente para recuperar a produção planejada, mesmo com uma falha grave como a do compressor.

As simulações evidenciam os índices de utilização dos equipamentos e os índices de ocupação dos operadores, mostrando que o equipamento que possui maior taxa de utilização é a Máquina Pistola de Cola 1, com cerca de 18% de ocupação. Este dado não foi alterado após a introdução de falhas no sistema, o que mostra que a disponibilidade presente no sistema não afetou este maquinário. Quanto aos funcionários ficou evidente a concentração de trabalho do Operador 4, para a condição de vinte dias de trabalho sem falha, ficou ocupado por 58,64%, o que passou para 58,42% quando houve a introdução da falha. Esta variação de 0,22% foi devido a parada do sistema por dois dias de trabalho, mesmo com a disponibilidade presente no sistema, o tempo de fabricação não foi suficiente para o sistema se recuperar, como ocorreu nos vinte e cinco dias de trabalho.

Com a análise da simulação de falhas é possível levantar a expectativa do tempo mínimo necessário para a produção de uma demanda esperada, considerando um conjunto de interrupções geradas no sistema.

Com o auxílio do Plano de Simulação e da simulação dos sistemas discretos foi possível identificar as etapas do processo produtivo, simular o mesmo no *software* ARENA, validando o processo simulado. Também foi possível levantar os pontos críticos de máquinas e de operação em condições sem e com falhas, esta última introduzida no sistema, bem como simular as perdas do processo de produção do Modelo X na LL Indústria Calçadista. Portanto, o objetivo geral e os específicos foram cumpridos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICALÇADOS. **Relatório Setorial: Indústria de Calçados do Brasil 2019**. Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. Novo Hamburgo, RS, 2019.

ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. **Notas de Aulas – Teoria – Pesquisa Operacional II**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, 2017.

ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. **Notas de Aulas – Laboratório Pesquisa Operacional II: Simulação**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, 2020a.

ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. **PS-Simulato© – Diretrizes para Elaboração de um Plano de Simulação**. Belo Horizonte: Simulato – PUC Minas, 2016.

ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. **Simulação de Falhas com Arena**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, 2020b.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos para análise de decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/eavargas2512/nbr-5462-2>> Acesso em: 25 ago. 2020.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. xvi, 265 p.

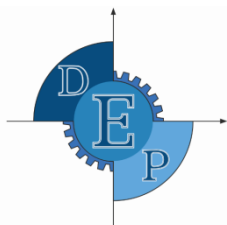
GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira. **Simulação de sistemas produtivos**. Porto Alegre SAGAH, 2018.

JOHNSON, Thienne de Melo e Silva Mesquita; COUTINHO, Mauro Margalho. **Avaliação de desempenho de sistemas computacionais**. Rio de Janeiro LTC 2011.

PRADO, Darci S. **Teoria das filas e da simulação**, 2ª Edição, Belo Horizonte: Editora IDG, 2004.

PRADO, Darci S. **Usando o ARENA em Simulação**. 4ª. ed. Belo Horizonte: Ed. Falconi, 2010.





RODRIGUES, Marcus Vinícius. **Ações para a qualidade:** gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade. 5. ed. Revisa da e ampliada. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROSSETTI, Manuel D. **Simulation Modeling and Arena®.** 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 719 p.

SILVA, Ermes Medeiros da; SILVA, Ermes Medeiros da; GONÇALVES, Valter; MUROLO, Afrânio Carlos. **Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia:** programação linear: simulação. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: Atlas, 2017. E-book (162 p.)

SILVEIRA, Aline Moraes da; VILSEKE, Abel José; PEZZATTO, Alan Thomas; GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Parreira. **Confiabilidade de sistemas.** Porto Alegre SAGAH, 2019. E-book 233 p.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert; VIEIRA, Daniel. **Administração da produção.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018. 463 p.

SOUZA, Letícia Ayala Almeida; NETO, Manoel Ferreira dos Santos; NASCIMENTO, Willem Vieira; OLIVEIRA, Ricardo. **Análise Da Manutenção E Dos Modos De Falhas Operantes Em Dois Equipamentos Empregados Na Indústria De Petróleo E Gás.** XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, 2018.

ROSS, Sheldon. **Probabilidade um Curso Moderno com Aplicações.** 8 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. E-book 606 p.

VELLOSO, Alyne de Almeida; PINHEIRO, Derlaine Brito; SILVA, Elenice Aparecida; NUNAN, Carolina. **Modelagem e Simulação de uma Nova Linha de Produção de Rodas Locomotivas Ferroviárias:** O Desafio da Ausência de Dados. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, 2018.

VENANZI, Délvio; SILVA, Orlando Roque da. **Introdução à engenharia de produção:** conceitos e casos práticos. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

XENOS, Harilaus Georgius D'Philippus. **Gerenciando a manutenção produtiva:** o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. Belo Horizonte: DG, 1998. 302 p.

YU, Abraham Sin Oih. **Tomada de decisão nas organizações.** São Paulo: Saraiva, 2011.