

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE UMA INDÚSTRIA DE CORDOARIA  
POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DISCRETA**

**ERIK GUNNAR REBELO HOFFMANN**

**ORIENTADOR: MICHEL JOSÉ ANZANELLO**

**PORTO ALEGRE**

**AGOSTO/2023**

## **RESUMO**

Este estudo apresenta a análise da eficiência produtiva de uma indústria de cordoaria por meio da simulação computacional discreta. O objetivo do trabalho foi de buscar alternativas para incremento da capacidade produtiva da linha produtiva. A metodologia utilizada apoiou-se inicialmente na compreensão do sistema atual, seguindo para coleta de dados e modelagem do modelo. Posteriormente, foram testados cenários de operação, os quais incluíram adição de máquinas e paradas de produção. O primeiro visou avaliar estratégias para expansão da produção e o segundo para compreensão do impacto dos desvios de produção. Os resultados dos cenários demonstram a necessidade da diminuição de paradas de produção de alto impacto, bem como do aumento da produtividade por meios mais viáveis em termos financeiros (como aumento dos turnos de produção ao invés do investimento em maquinário).

### **1. INTRODUÇÃO**

O setor da indústria no Brasil tem grande importância devido à sua contribuição na economia e no número de empregos gerados. Em 2021, segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), o setor colaborou com 22% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, sendo a segunda atividade mais representativa para a economia, atrás somente de serviços. Mesmo com toda essa importância, percebe-se uma queda de participação do setor industrial na economia nacional, fenômeno que se vem acentuando principalmente a partir de 2013 (ano no qual o setor perdeu 28,6 mil empresas e mais de 1,4 milhão de postos de trabalho, segundo o IBGE). Por consequência, os principais afetados nesses resultados são as empresas de porte pequeno, que normalmente dispõem de uma menor estrutura e desenvolvimento de processos.

Para uma indústria entrante no mercado, com uma estrutura ainda escassa, necessita-se uma busca por padrão de processos e, principalmente, elevada eficiência produtiva. A eficiência de um sistema pode ser definida como “a capacidade desse sistema de utilizar, da melhor maneira possível, os recursos disponíveis e de aproveitar, ao máximo, as condições ambientais para obter o desempenho ótimo em alguma dimensão” (MARIANO, 2017). Conclui-se que, no início de suas operações, uma indústria deve buscar investir na otimização dos seus recursos para se manter competitiva em um setor sujeito a elevados níveis de competitividade.

Com o intuito de compreender os pontos que impactam na eficiência produtiva, Mariano (2017) conduziu estudo que sugere que as principais limitações estão relacionadas a problemas técnicos e problemas de escala. O primeiro implica em causas de treinamento e

capacidade dos colaboradores, além do desempenho das máquinas e qualidade de matéria-prima. O segundo impacta nas razões pelas quais a empresa não produz de forma proporcional à sua capacidade.

Para a maximização da eficiência produtiva, percebe-se a necessidade de combater os problemas de escala, que normalmente estão ligados ao sequenciamento da produção, padronização de processos e alocação dos recursos. Para resolver essas questões, é necessária uma estrutura forte de processos, principalmente para empresas em estágio inicial ou de pequeno porte. A partir disso, com essa padronização efetuada, se resultará em um melhor aproveitamento de recursos e menor ociosidade de máquinas, fatores que tornam a indústria mais competitiva e eficaz.

No geral, a maioria das empresas encontram dificuldades para solucionar os problemas de escala. A principal razão está na falta de padronização de processos, tanto os que envolvem o *backoffice*, quanto os diretos da produção. Sem a estruturação adequada, comprometem-se as atividades de gerenciamento e desenvolvimento do setor produtivo da empresa. A falta de padrão implica ainda na falta de dados para controle, variação de qualidade e dificuldade de mapear os erros e desperdícios, tornando complexa a criação de planos de ação para solucioná-los. Além disso, a escassez de ferramentas e qualidade de materiais são outros quesitos que impactam substancialmente na eficiência dos processos produtivos, principalmente nas instituições de pequeno porte.

O presente artigo analisa o processo produtivo de uma nova indústria que detém um baixo índice de eficiência por meio da simulação computacional afim de identificar e entender os gargalos produtivos existentes, quantificar os seus impactos e buscar soluções para os mesmos, além de estabelecer possíveis ações em caso de um potencial aumento da demanda. Para tanto, serão testados cenários que passam pela aquisição de novos maquinários. Ademais, busca-se entender possíveis combinações (mix) de produtos que diminuam a ociosidade das máquinas e, conseqüentemente, melhorem a eficiência produtiva. Ao final, pretende-se comparar o cenário atual com cenários alternativos, possibilitando-se avaliar como as mudanças de recursos impactam na produtividade da empresa analisada.

A simulação proposta será realizada no *software* Promodel, através do qual pretende-se gerar uma representação fidedigna do atual sistema produtivo e de cenários que contenham diferentes recursos. Os resultados dessa simulação geram análises e dados confiáveis para a tomada de decisão dos colaboradores da empresa, tendo-se em vista que a maioria das decisões

são atualmente tomadas de forma empírica. Com as conclusões retiradas do trabalho, a indústria poderá evoluir ao proporcionar que seus gestores tomem decisões mais eficazes, apoiadas em um mix de produtos mais adequado.

O artigo está estruturado em cinco seções: a introdução, que situa o objeto de estudo tema do trabalho; o referencial teórico conceitua os principais temas abordados e explica como outros pesquisadores solucionaram problemas semelhantes; o método que explica como a pesquisa foi estruturada e executada; a análise dos resultados obtidos que investiga os dados gerados do que foi executado e, por fim, a conclusão, que contempla os resultados e aprendizados gerados ao final do trabalho.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção serão abordados os conceitos e características da simulação computacional aplicados em fluxos produtivos. Na primeira parte uma descrição sobre a Teoria das Filas e, por fim, serão abordados os fundamentos da simulação, conceitos básicos, os tipos, as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Já na segunda parte, será abordado estudos que utilizaram os mesmos meios para solucionar os problemas explorados, parte que se busca compreender mais a parte prática da simulação e como outros autores trabalharam com ferramentas e problemáticas similares.

### **2.1. TEORIA DAS FILAS**

A teoria das filas é um ramo da matemática aplicada que estuda o comportamento de sistemas onde existe uma fila de espera para algum tipo de serviço. Ela é usada para modelar e analisar o desempenho de sistemas em que as chegadas dos clientes são aleatórias e os tempos de atendimento são também aleatórios.

Segundo Adeniran, Burodo e Suleiman (2021) define-se o conceito de uma fila, que é uma linha de espera em que os clientes aguardam pelo atendimento de um serviço. Em seguida, apresenta-se o conceito de processo de chegada, que é a distribuição probabilística que descreve a taxa de chegada dos clientes ao sistema. O tempo de serviço é outra variável importante, e representa a quantidade de tempo que um cliente leva para ser atendido.

A taxa de serviço, ou a taxa de atendimento, é definida como a taxa em que os clientes são atendidos pelo sistema. Um sistema pode ser considerado eficiente quando a taxa de serviço é maior do que a taxa de chegada, o que significa que o tempo médio de espera dos clientes será menor. Existem outras medidas de desempenho, sendo a mais comum o tempo médio de

espera na fila, que é o tempo médio que um cliente leva para ser atendido pelo sistema, incluindo o tempo que ele passa na fila. Outras medidas de desempenho incluem o número médio de clientes na fila, o tempo médio de serviço e a taxa de utilização do sistema.

A teoria das filas é aplicável em diversas áreas, como engenharia, finanças, logística, entre outras. Segundo Nor Aziati e Hamdan (2017) existe uma grande aplicabilidade da teoria das filas em diferentes contextos. Há diversas áreas em que a teoria das filas é usada, como sistemas de transporte, redes de computadores, sistemas de produção, saúde, entre outras. Em resumo, com um entendimento sólido dos principais conceitos da teoria das filas, é possível identificar gargalos, melhorar a eficiência e reduzir os tempos de espera em diferentes tipos de sistemas.

De uma forma geral, a espera em filas pode ter um impacto significativo no comportamento do cliente no futuro. Se um cliente experimenta longos tempos de espera em uma fila, ele pode ser sensibilizado a ponto de não querer tolerar outra fila semelhante no futuro, mesmo que decida concluir a compra naquele momento. Esse efeito pode levar a uma diminuição da demanda ao longo do tempo, afetando negativamente as vendas em filiais que enfrentam esse problema. Embora muitas empresas não percebam essa perda no curto prazo, ela pode se tornar aparente em longo prazo. Como sugere Mello (2005), é importante que as empresas projetem seus serviços de forma a tornar os produtos intangíveis "visíveis" e gerenciáveis, garantindo assim sua qualidade.

## **2.2. FUNDAMENTOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

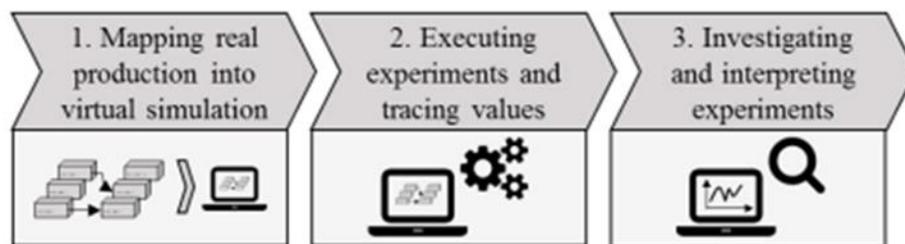
Um sistema é um conjunto de entidades que se envolvem em ações e interações com o objetivo de alcançar um propósito lógico (SCMIDT e TAYLOR, 1970). Um modelo é uma representação do sistema com ideias e objetivos que podem ser diferentes do formato original. Segundo Law e Kelton (1991), experimentos em sistemas matemáticos reais podem ser realizados no próprio sistema e produzir comportamentos semelhantes. Para complementar esta definição, os autores identificam duas abordagens possíveis: simulação e soluções analíticas. Devido à complexidade das soluções analíticas, a simulação é a alternativa mais utilizada (LAW e KELTON, 1991).

Aragão (2011) afirma que, para se elaborar um projeto envolvendo simulação, é necessário classificar claramente o que é um sistema, pois através da sua definição é possível identificar quais as informações que poderão ser abstraídas e quais informações serão relevantes ao estudo a ser realizado. Um sistema, de acordo com Law e Kelton (2000), é

definido por ser uma coleção de entidades, ou seja, pessoas ou máquinas que atuam e interagem em conjunto para o cumprimento de determinada lógica do processo que está sendo trabalhado.

Segundo Ranke (2022) a simulação permite a reprodução simplificada de sistemas reais, com benefícios para o planejamento e gerenciamento da produção. É usada para criar um modelo e executar múltiplos experimentos que investigam opções de comportamento, suportando a tomada de decisão contínua. Vários experimentos são necessários ao investigar sistemas complexos e processos dinâmicos com probabilidade de transição, tendo cada experimento fatores de entrada diferentes e pode se comportar de forma distinta. Com isso, a simulação fornece novas informações sobre sistemas complexos e é especialmente útil para simular o fluxo de materiais em sistemas de produção (MESQUITA e TOMATONI, 2022). É possível observar na Figura 1 as etapas da simulação nas suas três etapas principais: mapear o atual fluxo; executar experimentos de cenários e investigar e interpretar os resultados.

Figura 1 – Esquema das etapas para prever demanda usando simulação



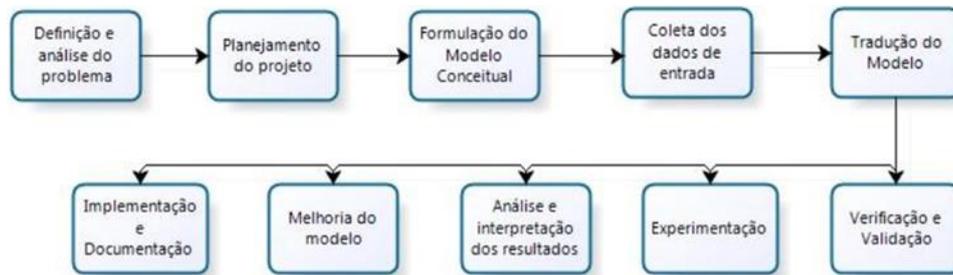
Fonte: Adaptado de Ranke (2022)

Resumidamente, a simulação computacional busca revelar a dinâmica de um sistema já existente ou planejado, para avaliar suas interações e possíveis resultados, conforme o usuário deseje (PEIXOTO e PINTO, 2006). Outro ganho dessa ferramenta é trazido por Aragão (2011), no qual a modelagem de sistemas utilizando a simulação computacional tem se tornado um grande aliado para o trabalho de melhoria da qualidade e gerenciamento da produção, tendo em vista que a utilização dessa técnica possibilita a visualização do funcionamento da produção, o que facilita aos especialistas e aos envolvidos na gestão a tomada de decisão.

Em relação ao sistema que se analisa em um estudo de simulação, conforme Biava e Davalos (2014), uma das principais etapas ocorre em sua modelagem, que consiste em um processo de elaboração e descrição do problema e envolve uma certa abstração no processo. Para Pidd (1996), um modelo pode ser definido como uma representação externa e explícita de parte da realidade que é vista pela pessoa tendo em vista o objetivo de usar o modelo para

conseguir entender, mudar, gerenciar e controlar conforme um procedimento aplicado (exemplificado na Figura 2).

Figura 2 - Procedimento aplicado em um estudo de simulação



Fonte: Adaptado de Banks e Carsen (1984 apud Biava, I. Davalos, R. V., 2014)

Ademais, segundo Castilho (2004), o ato de se reproduzir o comportamento de sistemas reais, de forma que análises de diferentes cenários sejam realizadas por meio da simulação, proporciona a compreensão dos efeitos de cada uma das possíveis decisões que podem ser tomadas em determinada operação do processo, guiando a escolha da decisão para a resolução de um problema específico do sistema estudado. Dessa maneira, a simulação constitui um grande método de apoio à tomada de decisão em diferentes áreas do mercado, lembrando do apoio de determinados softwares para a estruturação dessa análise.

Por fim, é necessário compreender quando que se deve utilizar a simulação, ao invés de metodologias mais simples e diretas, como modelagens analíticas. Para Piacentini (2015), a simulação se apresenta muito apropriada em situações de alta complexidade, pela quantidade de variáveis e interações, que inviabiliza o uso de técnicas de otimização ou de modelagem analítica. Além disso, conforme trazido por Winston (2004), ela avalia diferentes cenários, desde testes de mix de produtos, mudanças de gargalos produtivos e adição de maquinário. Tudo isso é possível de se fazer sem ter que parar a produção ou simular com metodologias mais arcaicas, sem a possibilidade de maior interação e relações internas do sistema.

### 2.3. TIPOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

De acordo com Sokolowski e Banks (2009), a simulação determinística é a abordagem mais comum de simulação, usada quando as condições iniciais e os valores dos parâmetros são conhecidos com certeza e a modelagem matemática das relações dinâmicas é precisa. Já para Banks (2005), esse modelo traz resultados muito precisos e possíveis de serem repetidos, sendo baseados em leis ou regras.

A simulação estocástica, por sua vez, é um método de simulação que lida com a incerteza no comportamento de um sistema. Segundo Graham e Talay (2013), a simulação estocástica é baseada em amostras aleatórias da distribuição de probabilidade do processo modelado, e seu objetivo é obter a probabilidade de determinados eventos acontecerem em um determinado tempo. Diante disso, esse método é especialmente útil para sistemas complexos, onde a análise matemática direta é difícil ou impossível, e para a previsão de comportamentos futuros do sistema.

Outra forma de classificar a simulação pode ser em outras duas categorias: discreta e contínua. De acordo com Banks (2005), a simulação discreta é aquela em que "o tempo avança em incrementos discretos". Por outro lado, na simulação contínua, "o tempo é modelado como uma função contínua" (Law e Kelton, 2000).

A simulação discreta é amplamente utilizada para modelar sistemas que operam em intervalos de tempo discretos, como sistemas de produção, transportes, filas de espera, entre outros. Já a simulação contínua é aplicada em sistemas cujas características mudam continuamente ao longo do tempo, como processos físicos, biológicos e químicos, segundo Banks (2005). No entanto, a distinção entre simulação discreta e contínua pode não ser tão clara em alguns casos. Conforme afirma Robinson (2004), "a separação entre simulação discreta e contínua não é uma linha nítida, e muitos sistemas têm elementos tanto discretos quanto contínuos".

#### **2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

A utilização da simulação computacional, como qualquer metodologia e ferramenta, trará vantagens e desvantagens do seu uso. Segundo Pegden, Shannon e Sadowski (1995), a simulação oferece diversas vantagens, como a possibilidade de aplicar o modelo múltiplas vezes para avaliar políticas e projetos propostos, avaliar sistemas que ainda não existem mesmo com dados de entrada limitados e identificar gargalos, o que é de grande importância no gerenciamento operacional de sistemas. Além disso, Pidd (2004) comenta sobre a capacidade da simulação em avaliar sistemas que não existem ainda, destacando que, apesar do custo de mão de obra especializada e tempo gasto na programação do modelo para a simulação, os inúmeros testes que podem ser realizados em poucos segundos após a programação trazem benefícios significativos para a empresa.

Como relatado por Teerasponpong e Sopadang (2021) a simulação tem a intenção de gerar, testar e estudar variadas hipóteses, sendo uma imitação da realidade de um processo em meio virtual. Todavia, como retratado por Piacetini (2015), o impacto negativo no fluxo produtivo dessa análise é mínimo, já que não existe uma parada da produção para testar esses impactos, tudo é feito virtualmente, sem perdas de produtividade. Os pontos que podem trazer pequenas paradas ou danos são os insumos para abastecerem as simulações, como tempos de processo, processos, *inputs*, metrificacão de matéria-prima e outros itens.

Outra vantagem está na possibilidade de comprimir o tempo. De acordo com Law e Kelton (1991), como a modelagem é realizada por computadores, a simulação pode avaliar sistemas de longos períodos em um tempo reduzido. Chung (2003) afirma que essa compressão de tempo possibilita a realização de múltiplas replicações da simulação, o que leva a resultados mais confiáveis estatisticamente. Além disso, os sistemas de simulação oferecem uma melhor visualização do sistema por meio de pacotes de animação, maior versatilidade do modelo para análises complementares e baixo custo de implementação da ferramenta em relação aos benefícios obtidos (Dalton, 2008). Peixoto e Pinto (2006) ainda destacam a relativa facilidade de construção de modelos de simulação em comparação com a modelagem matemática tradicional, como modelos de otimização.

Todavia, por mais que seja uma ferramenta muito funcional e que esteja na rotina de análises das empresas, existe alguns entraves que dificultam ainda mais a exploração dos resultados e das funcionalidades da simulação computacional. O primeiro ponto trazido por Amaran (2016) é a complexidade e os altos custos de se trabalharem com esses softwares que modelam as situações desejadas. Ou seja, além de necessitar de licenças muito caras, quanto mais específico e dificultoso, maior quantidade e maior qualificação de mão de obra serão necessárias para modelar esses sistemas.

Ademais, Piacetini (2015) sugere a utilização simulação em conjunto com a otimização, ao tornar esse processo de teste de hipóteses e cenários mais certos e que se poupe mais tempo e recursos. Assim, é possível avaliar soluções e refinar problemas complexos com uma visão dinâmica e não linear (ILGIN e TUNALI, 2007). Pinho (2010) aponta outras desvantagens da simulação, como problemas de desempenho dos modelos que trabalham com um grande número de variáveis, a necessidade de escolher o software adequado para cada situação e o alto nível de treinamento necessário para uma análise correta dos dados de saída do sistema.

## 2.5. APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM SISTEMAS PRODUTIVOS

Após compreender os conceitos e estruturas por trás da simulação computacional e suas estruturas, é necessário que se explore formatos de aplicação dessa metodologia e os diferentes resultados e formatos que podem ser retirados de sua utilização.

Nor Aziati e Hamdan (2017) apresentam uma simulação do fluxo de pacientes em um departamento de atendimento ambulatorial de um hospital usando a teoria das filas. O estudo inclui a coleta de dados, a definição dos parâmetros do modelo e a validação da simulação. Os resultados mostram que a simulação pode ser útil para melhorar a eficiência do atendimento e otimizar processos em sistemas de saúde. Já Piacetini (2015) traz uma aplicação em uma distribuidora de medicamentos, que foca o estudo na teoria das filas. O objetivo do trabalho é analisar o tempo de espera dos clientes, propor melhorias para o sistema e reduzir custos de estoque e ineficiência de programação. Em outro estudo, Tsiamas e Rahimifard (2021) analisam uma cadeia de suprimentos de alimentos, que aplica simulação computacional para direcionar as tomadas de decisão, diminuir o percentual de incertezas e tornar os processos mais diretos, sem interrupções e com menos desvios. Os resultados conduziram a um sistema com menos eventos disruptivos, simplificação de processos para gerenciar os recursos e com respostas mais eficazes e rápidas aos gatilhos de incerteza.

Já Coelho, Relvas e Barbosa-Póvoa (2020) buscam aprofundar a logística interna de uma empresa através da simulação. A ideia foi aplicar a simulação para estruturar uma ferramenta que direcione as tomadas de decisões internas, que impactem na gestão, *layout* e fluxo de materiais. A ferramenta possibilita simular diferentes cenários de operação, que proporcionam dados de processos, produção e de tempo de processos que facilitam em otimizações internas, como fluxo de colaboradores e de materiais, na gestão de estoque e na otimização do *layout*. Além desse, é relatado por Ferreira, Armellini e De Santa-Eulalia (2021) um estudo do impacto e do que pode ser explorado com a simulação na Indústria 4.0. Pode ser uma ferramenta na estruturação da digitalização, a automação, a manufatura inteligente e da logística. Ademais, retrata como a simulação vai impactar em áreas de pesquisa futura, como: (i) Aplicação na manufatura aditiva (impressão 3D) e robótica colaborativa; (ii) Desenvolvimento de métodos de e verificação de modelos de simulação em ambientes complexos da Indústria 4.0; (iii) Desenvolvimento de métodos de validação e verificação de

modelos de simulação em ambientes complexos da Indústria 4.0; e (iv) Estudo do impacto da simulação na eficiência e eficácia da produção na Indústria 4.0.

No geral, observa-se a quantidade de áreas diferentes da Engenharia de Produção e, dentro delas, as diversas aplicações que a simulação computacional pode se moldar. Na sequência, será explorado mais dessa ferramenta na utilização com cenários voltados ao Planejamento e Controle da Produção.

### **3. MÉTODO**

Esta seção é composta por três subseções: descrição do cenário, classificação da pesquisa e etapas do método proposto. Na primeira parte, será realizada uma breve descrição da empresa e do sistema produtivo a serem abordados, apresentando em detalhes o contexto em que o estudo será desenvolvido. Na segunda parte, serão delineadas as propriedades do método de trabalho utilizado. Na terceira parte, serão descritas as etapas necessárias para a implementação do método proposto.

#### **3.1. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO**

A V.elo Sailing é uma empresa especializada na construção de cabos náuticos de alta performance, focada para velejadores profissionais e amadores. Suas operações se iniciaram em abril de 2022; diante disso, a estruturação de processos e operações ainda está em fase inicial, com oportunidades de desenvolvimento e aprimoramento. Contém como estrutura física um pavilhão para as operações fabris em Canoas, que permite executar tanto atividades de operação quanto administrativas. É considerada uma microempresa pela classificação do Senai, por ser uma indústria com menos de 19 funcionários.

O processo começa na etapa de torção, na qual os fios de matéria-prima (base do cabo) são torcidos. Na sequência fica a espula, que consiste em adaptar os fios torcidos para uma nova estrutura, gerando bobinas menores que entrarão nas trançadeiras de alma. Essas máquinas irão trançar os fios e montar a alma do cabo, que é o seu miolo. A etapa de impregnação do coating vem na sequência, visto que alguns cabos recebem uma resina na sua estrutura. Por último, ocorre a trança da capa, que irá receber fios envolta da alma, finalizando o processo. A sequência de etapas pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do Sistema Produtivo da V.elo Sailing



Fonte: Elaborado pelo Autor

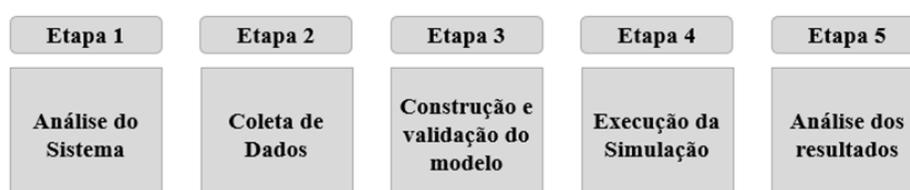
### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa em questão classifica-se, em relação à natureza, como aplicada, já que analisa um sistema produtivo existente e específico. Em relação à abordagem é considerada quantitativa, por trabalhar diretamente com a geração e simulação de dados, principalmente fundamentada por preceitos e métodos matemáticos. Quanto aos objetivos é considerada uma pesquisa explicativa, porque os cenários simulados na programação terão seus efeitos diretamente ligados as variáveis moldadas no modelo. Por fim, é uma pesquisa-ação, já que o estudo é feito pelo autor, juntamente da colaboração da empresa, que possibilita gerar novos conhecimentos e melhorias de processos para a organização (THIOLLENT, 1997).

### 3.3. ETAPAS DO TRABALHO

O método de trabalho da abordagem proposta será baseado em metodologias já estabelecidas para simulação computacional, fundamentadas principalmente em Law e Kelton (1991). A partir disso, são sugeridas 5 etapas operacionais: Análise do sistema; Coleta de dados; Construção e validação do modelo; Execução da simulação e Análise dos resultados (tais etapas são apresentadas na Figura 4 e detalhadas na sequência).

Figura 4 – Etapas do trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor

### Etapa 1: Análise do sistema

Nesta etapa é estudado o fluxo produtivo da empresa que dará origem ao modelo de simulação, compreendendo desde a área de torção até a trança da capa. Para tanto, são analisadas as variáveis que influenciam o funcionamento do sistema, ao compreender o impacto de cada processo no fluxo produtivo. Ao final, se encerrará com um mapeamento desse macroprocesso (incluindo máquinas e roteiros de produção), o que auxiliará na construção da modelagem.

### Etapa 2: Coleta de dados

Nesta fase são coletados e tratados 3 blocos principais de informações: os tempos de setup das máquinas, os tempos de ciclo dos produtos nas máquinas e a capacidade das máquinas trançadeiras e torcedeira. As coletas de tempo são realizadas por meio de cronoanálises, enquanto a capacidade das máquinas é definida por cronoanálise e avaliação de dados históricos.

Essa etapa também contempla o tratamento dos dados, estimando-se médias, desvios-padrões e os variados tipos de ciclo e setups, que podem se diferenciar por características próprias do sistema produtivo estudado. A análise dos dados coletados e eliminação de eventuais dados espúrios também é realizada nessa fase, de maneira a não contaminarem a geração de dados na simulação. Por fim, as distribuições estatísticas seguidas por cada conjunto de dados são determinadas através de testes estatísticos (e.g. Kolmogorov-Smirnov) e análise de papel de probabilidade.

### Etapa 3: Construção e validação do modelo

A fase de construção e validação do modelo compreende a integração de elementos que incluem locais (máquinas nas quais o processamento será realizado), entidades (produtos a serem analisados) e processos (descrição e vinculação das etapas a que os produtos são submetidos). Essa modelagem se dará no *software* ProModel, visto que o software contempla todas as necessidades para esse estudo. Ressalta-se que somente alguns produtos serão analisados por conta de limitações na versão de demonstração do ProModel. Assim, serão

escolhidos os produtos mais representativos e com tempos de ciclo próximos da média para maximizar as conclusões oriundas das simulações.

No que diz respeito aos cenários alternativos a serem avaliados, pretende-se testar um cenário com diferentes paradas de produção, que basicamente são desvios que acarretam a diminuição da produtividade. A partir disso, ao confirmar que o sistema está verossímil com o atual, pode se trabalhar com distintos cenários, os quais incluem adição de uma nova máquina torcedeira, adição de uma nova máquina espuladeira e adição de novas trançadeiras. Tais arranjos alternativos permitirão identificar e mensurar os impactos dos gargalos produtivos em cada ponto.

#### Etapa 4: Execução da simulação

Nesta etapa será possível analisar os primeiros resultados dos cenários já estipulados. A partir disso, serão analisadas as consequências de cada situação simulada e, a partir disso, se trabalha com novos cenários, para aprimorar ainda mais a pesquisa. Essa variação de situações enriquece a pesquisa e facilita as tomadas de decisão dos gestores. A ideia é aprimorar os cenários principais, entendendo como o mix de produtos se comporta em cada parte trabalhada. Uma ideia é ver o impacto também de um novo cenário, que seria um aumento de produção sem aumentar máquinas, mas ao alterar a composição dos turnos de trabalho.

#### Etapa 5: Análise dos resultados

A última etapa se refere ao estudo dos resultados gerados das simulações. Assim, se busca compreender como o sistema produtivo se comportou em cada situação, especialmente em termos da geração de gargalos produtivos. A partir disso, avaliam-se mudanças sugeridas por cenário, principalmente impactos em termos de layout e financeiros. Tais alterações podem incluir aquisição de novos maquinários, mudanças de processo ou mudanças de mix de produtos. Ao final, somente será viabilizada uma mudança se esta for viável em termos financeiros, assegurando um retorno alinhado à gestão estratégica da corporação.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 GERAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO**

A primeira etapa de execução do trabalho é a análise do sistema, que consiste em compreender os processos, máquinas e produtos a serem modelados e de que forma eles se relacionam. Com isso, foi definido que seriam simulados os fluxos produtivos dos produtos PESP8 e PESP10, os quais respondem pelos maiores percentuais de participação na produção

e por terem fluxos distintos entre si (que possibilitam trabalhar com maquinários e rotas de produção diferentes).

Como na linha produtiva há pouca variação de máquinas por etapa, no modelo estudado foi possível estabelecer diferentes rotas para a trança da capa, sendo esse o processo mais impactante em relação à qualidade e construção do produto. O resto da produção do PESP8 e PESP10 segue a mesma linha lógica. Cada etapa de produção é demonstrada na Tabela 1.

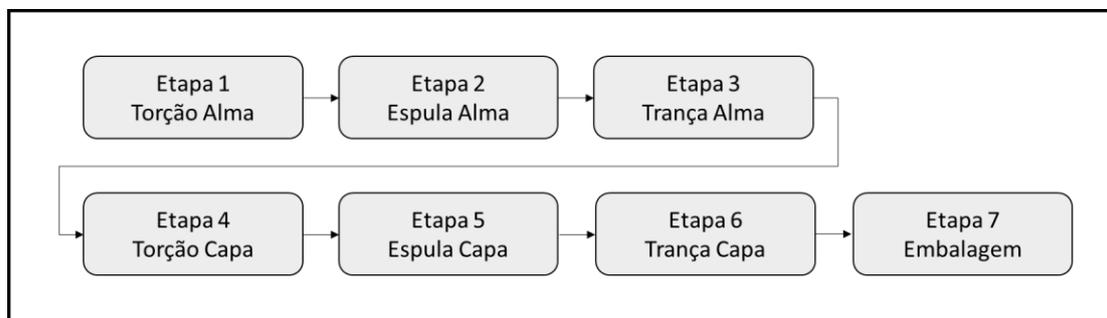
Tabela 1 - Relação dos processos, máquinas e produtos que serão simulados

Nome Etapa	PESP8	PESP10
Torção Alma	TOR01	TOR01
Espula Alma	ESP01	ESP01
Trança Alma	TRAN02	TRAN02
Torção Capa	TOR01	TOR01
Espula Capa	ESP01	ESP01
Trança Capa	TRAN03	TRAN04
Embalagem	BOB01	BOB01

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a produção desses cabos é necessária a confecção de dois subprodutos, que juntos formam o produto final. Primeiramente é feita a alma, que é o preenchimento interno. Ela deve passar pelas etapas de torção, espula e trança. Posteriormente é feita a capa, que constitui o revestimento externo e passa pelas mesmas três etapas produtivas (com o adendo que na trança ele deve estar junto da alma, para resultar no cabo pronto). A parte da embalagem já engloba ambos os subprodutos. Todas essas etapas são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Etapas produtivas e processos envolvidos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Após a compreensão do fluxo produtivo, se inicia a segunda etapa da simulação, que consiste na coleta de dados. Foram realizadas 6 coletas de tempos dos dois produtos. Tal coleta

corroborou a hipótese de que o ritmo de produção se apoia nos mesmos tempos dentro de cada produto, não existindo variação dentro da produção de mesmos itens. Isso é devido a uma regulagem padrão que impede a alteração desses tempos. Como não há amplitude de tempos entre amostras, não há necessidade de mais coletas. Os tempos de setup, por sua vez, têm variações muito pequenas, que impactam cerca de 1% no tempo de produção final; assim, decidiu-se considerar um tempo fixo padrão para os dois casos. Cada etapa de produção com seus tempos finais considerados para o estudo podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempos (mins) dos processos dos produtos PESP8 e PESP10

<b>Tempos dos Processos</b>					
<b>Etapa</b>	<b>Nome Etapa</b>	<b>Máquina</b>	<b>PESP8</b>	<b>Máquina</b>	<b>PESP10</b>
Etapa 1	Torção Alma	TOR01	90	TOR01	90
Etapa 2	Espula Alma	ESP01	30	ESP01	30
Etapa 3	Trança Alma	TRAN02	115	TRAN02	105
Etapa 4	Torção Capa	TOR01	145	TOR01	220
Etapa 5	Espula Capa	ESP01	40	ESP01	60
Etapa 6	Trança Capa	TRAN03	180	TRAN04	230
Etapa 7	Embalagem	BOB01	15	BOB01	15
<b>Total</b>			<b>615</b>	<b>-</b>	<b>750</b>

Fonte: Elaborado pelo Autor

Também foram coletadas as capacidades produtivas das máquinas. Em todas as trançadeiras (identificadas com o código “TRAN”) a capacidade é 1 unidade, já que só é possível fazer um cabo por vez. Na Espuladeira e Bobinadeira, máquinas responsáveis pela espula e embalagem respectivamente, também deve-se fazer um item por vez. A única máquina no modelo atual que possibilita dois cabos por vez é a Torcedeira (código “TOR01”). As capacidades e os processos envolvidos em cada máquina estão destrinchados e podem ser vistas na Tabela 3.

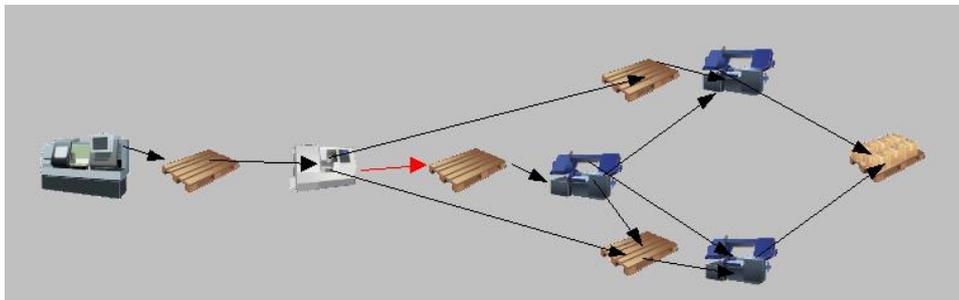
Tabela 3 - Máquinas com seus respectivos processos e capacidades produtivas

<b>Máquina</b>	<b>Processo 1</b>	<b>Processo 2</b>	<b>Capacidade</b>
TOR01	Torção Alma	Torção Capa	2
ESP01	Espula Alma	Espula Capa	1
TRAN02	Trança Alma	-	1
TRAN03	Trança Capa	-	1
TRAN04	Trança Capa	-	1
BOB01	Embalagem	-	1

Fonte: Elabora pelo Autor

Com todos os dados coletados, começa a estruturação da simulação no software Promodel. Primeiramente, são criadas as entidades de almas, capas e produtos finais, totalizando 6 ao total. Depois, são projetados as estações de trabalho, que se referem às máquinas: Torcedeira (TOR01), Espuladeira (ESP01), trançadeira de alma (TRAN02), trançadeiras de capa (TRAN03 e TAN04) e Bobinadeira (BOB01) com seus estoques intermediários. Por fim, são definidos os processos (simbolizados pelas setas). Estes basicamente serão os caminhos seguidos pelas entidades entre cada local, além das regras envolvidas, como a necessidade da disponibilidade de alma para se iniciar a produção de uma capa. Por fim, os tempos de processamento e de setup de cada etapa produtiva. O modelo do fluxo produtivo pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de simulação



Fonte: Software Promodel

Na sequência é necessário programar o funcionamento dos recursos, que são elementos que podem ser usados para realizar operações, como os operadores. No caso desse trabalho, foi decidido não utilizar os recursos, já que seu objetivo é aumentar a eficiência produtiva da melhor forma possível; contudo, no cenário atual da empresa em estudo, existe ociosidade dos operadores. Ademais, caso seja necessária a contratação para melhorar a produtividade, este é um investimento que tem retorno rápido e seria liberado pelos gestores. Por fim, em relação às chegadas ao sistema (ou seja, a frequência e quantidade que os produtos chegam ao modelo), se estabeleceu uma distribuição com a qual se maximize a produção, novamente para compreender de que forma o atual fluxo produtivo se comporta em um alto nível de produtividade.

Com esses fatores alinhados, inicia-se a estruturação final dos detalhes da simulação. Estipulou-se um estudo com 378 horas de duração, que significam 22 dias trabalhados conforme os turnos da empresa (ou seja, um mês de trabalho). Por serem utilizados apenas dados determinísticos nesse momento, não foram necessárias repetições. Os resultados podem

ser vistos na Figura 6 e estão bem condizentes com a realidade do fluxo produtivo, já validado com os gestores. Importante reforçar que a capa fica com um valor zerado na contagem de produção visto que já está englobada no produto final ao fim do processo. Ressaltam-se as taxas de produção dos produtos finais PESP8 e PESP10 (75 e 74 unidades, respectivamente), além de uma alma de cada que sobrou no sistema.

Figura 6 – Resultados de quantidades de produtos e tempo médio de operação do modelo

Painel		
Nome	Total de Saídas	Tempo Médio em Operação (Min)
Capa PESP8	0,00	0,00
Capa PESP10	0,00	0,00
Alma PESP8	76,00	235,00
PESP8	75,00	380,00
Alma PESP10	75,00	225,00
PESP10	74,00	525,00

Fonte: Software Promodel

Também é importante ressaltar que os tempos médios de operação estão condizentes com a realidade. Mesmo que tenham tempos de processamento diferentes, o sistema produz praticamente a mesma quantidade entre PESP8 e PESP10 graças a um direcionamento na programação de chegadas para priorizar a produção do segundo item. Isso decorre do fato dos itens produzidos na TRAN04 terem um faturamento mais alto, o que condiciona um retorno financeiro maior para a empresa.

Na Figura 7 são apresentadas as utilizações das máquinas no sistema atual. Reforça-se a alta utilização da TRAN04, com 82,61%, justificada pelo fato do maior tempo de atravessamento do PESP10. Depois aparece a TRAN02, com 80,34%, o que se deve à necessidade de produzir as almas de ambos os produtos, além da TRAN03, com 65,52%, e da Espuladeira, com 58,19%. Nessa Figura não está a máquina Torcedeira (com utilização próxima a 100%), a qual recebe as chegadas dos pedidos em frequência infinita para expor o sistema a uma produtividade elevada. Com base nestes resultados, entende-se que o sistema de simulação proposto está validado e apto a avaliar o impacto de distintos cenários de produção (detalhados abaixo).

Figura 7 - Gráfico de utilização das máquinas



Fonte: Software Promodel

## 4.2. ESTUDO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Com o modelo já estruturado, inicia a etapa do teste de cenários alternativos, objetivando-se tornar a produção mais eficiente ou até produzir mais de outras formas, por meio da aquisição de mais maquinários ou recursos. Em um primeiro momento, serão explorados 9 cenários dentro de um estudo de aumento de produção pela adição de máquinas.

O aumento de capacidade de produção no processo em análise pode se dar através da intervenção em 5 tipos de máquinas: Torcedeira, Espuladeira, Trançadeira 02 (a qual produz as almas), Trançadeira 03 (a qual produz as capas do PESP8) e Trançadeira 04 (a qual produz as capas do PESP10). Todos os cenários, com quantidades de máquinas e resultados de produção, são apresentados na Tabela 4 e identificados por letras.

Tabela 4 – Cenários simulados e seus resultados

Cenário	Capacidade Máquina					Produção				
	TOR	ESP	TRAN02	TRAN03	TRAN04	PESP8	PESP10	Total	%	
- Padrão	2	1	1	1	1	75	74	149	1,00	
A 200% Espuladeira	2	2	1	1	1	75	74	149	1,00	
B 200% Trançadeira 02	2	1	2	1	1	75	74	149	1,00	
C 150% Torcedeira	3	1	1	1	1	91	88	179	1,20	
D 200% Torcedeira	4	1	1	1	1	91	88	179	1,20	
E 200% Trançadeira 03 + 200% Trançadeira 04	2	1	1	2	2	75	74	149	1,00	
F 150% torcedeira + 200% Trançadeira 03 e 04	3	1	1	2	2	93	92	185	1,24	
G 150% torcedeira + 200% todas	3	2	2	2	2	113	112	225	1,51	
H 200% todas	4	2	2	2	2	151	149	300	2,01	
I 300% todas	6	3	3	3	3	226	224	450	3,02	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Inicialmente, é possível englobar 3 diferentes cenários: A, B e E, que se referem respectivamente à adição de uma Espuladeira, de uma Trançadeira 02 e de duas trançadeiras que produzem as capas. Esses testes demonstraram um resultado produtivo idêntico ao modelo padrão, resultando nos mesmos 149 cabos por mês. Esse resultado é explicado pelo fato de tais

máquinas não serem os atuais gargalos produtivos, então seu investimento não traz um retorno direto na questão da quantidade de produtos finais.

Na sequência, avaliaram-se cenários que passaram a trazer impactos positivos à quantidade de itens produzidos. Um destes cenários é o C, que aumenta a capacidade da Torcedeira em 50%. Este mostra que, ao comprar mais um módulo desta máquina (que possibilita a produção de um produto), seria possível produzir três cabos simultaneamente. Com essa modificação, o resultado final de um mês seria de 91 unidades de PESP8 e 88 unidades de PESP10, que totalizam 179 cabos e um aumento de 20% do modelo atual. Isso foi proporcionado pelo aumento de capacidade produtiva do gargalo produtivo e consequente utilização do elevado percentual de ociosidade das demais máquinas, como na Figura 7. Os resultados desse novo cenário, juntamente com o tempo médio de operação, são expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do cenário com aumento de 50% da capacidade da Torcedeira

Nome	Total de Saídas	Tempo Médio em Operação (Min)
Alma PESP8	92,00	235,00
Capa PESP8	0,00	0,00
PESP8	91,00	380,00
Alma PESP10	89,00	225,00
Capa PESP10	0,00	0,00
PESP10	88,00	525,00

Fonte: Software Promodel

Na sequência, é testado o cenário B, que proporciona o aumento da capacidade da Torcedeira em 100%. Obtém-se o mesmo resultado que o cenário anterior, já que naquele o gargalo produtivo já tinha sido passado para outra máquina. Diante disso, esse cenário finalizou a simulação com os mesmos 179 produtos mensais. Desse modo, os gargalos produtivos se tornaram a Espuladeira, Traçadeira 04 e Traçadeira 02, com 1,29%, 2,20% e 3,04% de ociosidade, respectivamente. Esses resultados sinalizam que aumentar a capacidade do antigo gargalo não incrementa a produtividade, como visto na Figura 8.

Figura 8 - Gráfico de utilização das máquinas no novo cenário



Fonte: Software Promodel

Na sequência avalia-se o cenário F, que utiliza 50% a mais da capacidade da Torcedeira para possibilitar uma produtividade mais elevada no início do processo. Ademais dobra a capacidade das trançadeiras 03 e 04 (responsáveis pelas capas). Dessa forma, esse cenário resulta em 185 itens, um aumento produtivo de 24%. Verifica-se ainda a alteração do gargalo produtivo, que se transfere para a Trançadeira 02 e Espuladeira, atingindo um nível de ociosidade baixo de 0,86% e 1,29%, respectivamente.

O próximo cenário é o G, que dobra as capacidades dos últimos gargalos e chega na capacidade de 2 unidades para a Espuladeira e Trançadeira 02. O resultado desse cenário é de 225 produtos por mês, 51% a mais do fluxo produtivo padrão. Os percentuais de ocupação e ociosidade desse cenário são apresentados na Figura 9. Percebe-se a alta ocupação de todas as máquinas, com exceção da Espuladeira. A Trançadeira 02 e a Torcedeira voltam a ser os gargalos.

Figura 9 – Percentuais de ocupação do cenário G

Nome	Tempo Programado (Hr)	% Vazio	% Parcialmente Ocupado	% Cheio
Torcedeira 1	348,00	0,29	0,00	99,71
Espuladeira 2	348,00	33,41	45,83	20,76
Trançadeira 2	348,00	0,89	77,75	21,36
Trançadeira 3	348,00	1,17	91,79	7,04
Trançadeira 4	348,00	2,06	72,03	25,91
Embalagens	348,00	83,84	16,16	0,00

Fonte: Software Promodel

Os últimos cenários testados foram o H e I, que se referem à duplicação e à triplicação de capacidade de todas as máquinas, respectivamente. Como era de se esperar, por serem utilizados dados determinísticos, a quantidade de cabos produzidos segue o aumento

proporcional ao aumento de maquinários. Ademais, os dados de ocupação e ociosidade se mantêm, como esperado.

### **4.3. ESTUDO DAS PARADAS DE PRODUÇÃO**

Nessa seção serão avaliados os impactos das paradas de produção na realidade da empresa. Esses pontos acontecem quando ocorre um desvio no fluxo produtivo, o que ocasiona paradas das máquinas e, conseqüentemente, diminuição da produtividade. Cada máquina terá uma especificidade nessas interrupções, focando-se em alterações de tempo, de frequência e de motivos que causam esses eventos.

Primeiramente, é necessário analisar o tipo de desvio que ocorre em cada máquina e com que frequência isso ocorre. Para compreender a quantidade de ocorrências será utilizada uma distribuição triangular, cujos parâmetros são sugeridos pelos gestores da fábrica. Isso ocorre porque não há registros claros e diretos desses desvios, visto que a produção ainda está em sua fase inicial. A distribuição triangular trabalha com três dados: o tempo mínimo de parada, a moda e o máximo.

Em relação à Torcedeira, ocorrem paradas de produção pelos seguintes fatores (listados em ordem de frequência): Fios trancarem na saída do quadro de fios (acessório da máquina para os fios entrarem tensionados); Algum problema na bobina de fios que faça com que ele saia da bobina embolado; Sensor de fim de fio não funciona e causa uma parada tardia da máquina e sujeira de óleo danifica o fio e deve ser interrompida para realizar uma limpeza e arrumar os fios danificados.

Já a Espuladeira não foi considerada nos cenários de parada de produção, visto que tais paradas praticamente nunca ocorreram. Todavia, as três trançadeiras detêm vários tipos de paradas e ocasionam pelos mesmos motivos entre elas, somente o tempo de parada que varia pelo tamanho da máquina: quanto maior a máquina, mais tempo é despendido para resolver esses problemas. As motivações das paradas dessas máquinas incluem os seguintes eventos: Quando o cabo tem fios duplos (binado) e tenha sido mal feito no processo anterior (Espula), ele pode trancar na bobina e a máquina interromper a trança; Sujeira na base da máquina interromper a trança, já que trancam os carrinhos que fazem o caminho das bobinas; Trancar o nó de montagem do cabo na saída da máquina, que acarreta em uma mudança na regulagem do cabo; e, nos casos mais extremos, interromper a trança e cabo começar a escorregar na máquina por falta de tração.

A partir da explicação dos desvios, foram estipulados os dados da distribuição triangular que serão utilizados na simulação. A Torcedeira tem o menor de reparo, já que são pontos fáceis de serem acessados, normalmente relacionados a cortar e trocar os fios. Já as trançadeiras apresentam tempos maiores, visto que, quando trancam, necessitam de um maior período para solucionar o problema, por envolverem mais recursos e ferramentas na solução. A partir disso, foram testados em todos os casos as frequências de 8 e 16 horas, representando duas e uma ocorrência por dia, respectivamente. Já na Torcedeira testaram-se de 3,8 e 16 horas, já que há a possibilidade de mais paradas, por mais que sejam mais curtas. Os parâmetros da distribuição triangular foram definidos pelos gestores e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuições triangulares e frequências utilizadas em cada máquina

Máquina	Distribuição	Frequência
Torcedeira	(0,1.0.2,0.5)	3h
		8h
		16h
Trançadeira 02	(0.25,0.5,5)	8h
		16h
Trançadeira 03	(0.5,1,5)	8h
		16h
Trançadeira 04	(0.5,1,5)	8h
		16h

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na sequência foram montados 15 possíveis cenários, dentre eles os 9 que estão na Tabela 5 e outros 6 que são combinações de paradas em mais de uma máquina. Essas combinações foram classificadas em três grupos: otimista, realista e pessimista, sendo cada um deles dividido em duas possibilidades. Todos esses cenários estão identificados na Tabela 7 e serão discutidos nos próximos parágrafos.

Tabela 7 – Resultados de todos os cenários das paradas de produção

Grupo	Código	Cenário	Ocupação	Produtos TRAN03	Produtos TRAN04	Total	%	Perda
1	E	TRAN02 freq. 16h	<b>91,84%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
	G	TRAN03 freq. 16h	<b>76,30%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
	I	TRAN04 freq. 16h	<b>95,97%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
2	F	TRAN03 freq. 8h	<b>86,83%</b>	<b>74</b>	<b>74</b>	148	<b>0,99</b>	R\$ 1.110,00
3	C	TOR freq. 16h	<b>99,71%</b>	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
	D	TRAN02 freq. 8h	<b>99,69%</b>	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
	R2	Realista 2	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
	O1	Otimista 1	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
	O2	Otimista 2	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
4	B	TOR freq. 8h	<b>99,69%</b>	<b>67</b>	<b>66</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.192,00
	H	TRAN04 freq. 8h	<b>94,50%</b>	<b>68</b>	<b>65</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.746,00
	R1	Realista 1	-	<b>67</b>	<b>66</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.192,00
5	P2	Pessimista 2	-	<b>65</b>	<b>63</b>	128	<b>0,86</b>	R\$ 29.404,00
6	A	TOR freq. 3h	<b>99,71%</b>	<b>57</b>	<b>56</b>	113	<b>0,76</b>	R\$ 49.932,00
	P1	Pessimista 1	-	<b>57</b>	<b>56</b>	113	<b>0,76</b>	R\$ 49.932,00

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados dos 15 cenários serão apresentados em 6 grupos, que são agrupados conforme o resultado do impacto na produção final. O primeiro é de três que não alteraram a produtividade de 149 cabos por mês: o E (TRAN02 com frequência de 16 horas), o G (TRAN03 com frequência de 16 horas) e o I (TRAN04 com frequência 16 horas). Tais cenários não impactaram na produção por ocorrerem de forma pontual e não se concentrarem nos gargalos do processo. Em compensação, levaram a um aumento em sua ocupação original, que anteriormente era de 80,34%, 65,52% e 82,61%, respectivamente. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.

O segundo grupo engloba somente o cenário F, que gera um baixíssimo impacto na produção, diminuindo em 1 cabo de produção no mês. Sua ocupação aumentou de 65,52% do modelo e de 76,30% do desvio ocorrendo a cada 16 horas, ou seja, ainda há uma margem considerável de utilização.

Posteriormente avalia-se o grupo de cenários C, D, R2, O1 e O2. Os dois primeiros resultam em paradas na Torcedeira e Trançadeira 02, respectivamente. Enquanto isso, R2, O1 e O2 são os testes que juntam diferentes frequências de parada em variadas máquinas, para simular cenários mais fidedignos à realidade. Os dois testes otimistas (O1 e O2) e um dos realistas (R2) se encaixam nesse grupo, resultando em um impacto de 4% de perda de produtividade ao mês por paradas de produção. Isso se explica pelo fato de 4 deles terem paradas no gargalo produtivo, sendo esse o motivo de todos os cenários resultarem no mesmo percentual. Os desvios que ocorrem no restante das máquinas não agravam a perda de produtividade, por serem menos impactantes e frequentes do que a Torcedeira. A exceção

ocorre na parada na Trançadeira 02 (cenário D), na qual não há interrupções no gargalo, mas há uma frequência alta no processo subsequente ao da Torcedeira.

O quarto grupo é formado pelos três cenários com 89% da produtividade padrão, formado pelo B, H e R1. O primeiro representa paradas na Torcedeira, o segundo na Trançadeira 04 e o último em variadas máquinas, sendo o outro cenário realista. Esse mesmo percentual de produtividade se explica porque o B envolve uma alta parada na máquina gargalo, o cenário R1 considera o mesmo B em suas paradas, e por ser a mais significativa, resulta em um idêntico percentual. Por último, o H tem uma alta frequência na TRAN 04, que por ter uma ocupação muito alta, teve o mesmo resultado produtivo.

O penúltimo grupo é composto pelo cenário P2, um dos pessimistas. Ele é similar ao R1, só é mais agravado com uma parada mais frequente na máquina gargalo. Além disso, tem frequência de parada de 8 horas em todas as trançadeiras, o que impactou em todo o fluxo produtivo, tornando em ocupações mais elevadas do que os cenários anteriores. Por todos esses motivos, a produtividade foi impactada em 14%.

Por último, os 2 cenários restantes são os que mais impactaram nos itens produzidos (A e o P1). Isso se explica pela alta frequência de paradas no gargalo (Torcedeira), com frequência de 3 horas. Então, o cenário único na Torcedeira com 5 paradas por dia (cenário A) e o Pessimista 1, que engloba essa parada do cenário A, detém um resultado de 76% de produtividade total. Essa simulação é de um caso mais extremo, o qual poderia ocorrer por conta de problemas advindos de matéria-prima e de processos, mostrando-se improvável no curto horizonte.

Na Figura 10 é possível observar o impacto das paradas de produção no estado de produção das máquinas, o que reforça a baixa ociosidade das trançadeiras pelo tempo de processamento das paradas de produção. Já a Espuladeira fica sem paradas nesse cenário, o que acarreta em um percentual de operação menor. Por fim, a Torcedeira não é retratada na imagem, mas continua com o percentual de operação em patamares próximos ao máximo, impactando somente na quantidade de produção e não nos percentuais operacionais. Na Figura 10 estão representados os tempos de operação (em verde), ociosos (em azul) e de parada de produção (em vermelho).

Figura 10 – Estudo dos locais no cenário mais extremo de paradas (cenário P1)



Fonte: Software Promodel

Ao final, todos os resultados dos 15 cenários podem ser revisitados na Tabela 7. Vale ressaltar como os impactos percentuais estão ligados às paradas no gargalo produtivo daquele cenário específico. Aliás, os cenários combinados de Pessimista, Realista e Otimista evidenciam como o fluxo produtivo da V.elo é exposto a esses desvios, ressaltando o que os gestores devem esperar em cada possibilidade.

#### 4.4. ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS

Com a finalização das simulações dos dois estudos (adição de máquinas e paradas de produção), busca-se compreender a viabilidade de ações para identificação dos gargalos produtivos e formas de aprimorar a produtividade da V.elo.

Para compreender e quantificar a viabilidade das alterações testadas foram estudados orçamentos da adição de máquinas, que representam melhores alternativas de melhora de produção de acordo com os primeiros cenários estudados. Diante disso, foram revisitados os 9 cenários na seção 4.2, com a variação de 5 máquinas diferentes em termos de quantidade. Os dados de investimento foram cotados com fornecedores que já trabalham com a V.elo. Os dados dessas possíveis compras se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 – Investimento para aquisição de cada máquina

<b>Máquina</b>	<b>Custo Máquina</b>
Torcedeira	R\$ 397.000,00
Espuladeira	R\$ 19.000,00
TRAN02	R\$ 41.340,00
TRAN03	R\$ 45.500,00
TRAN04	R\$ 68.250,00

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com os dados de investimento, necessita-se compreender o retorno que é imposto nessas alterações com foco em lucratividade. Para efetuar essa análise, utilizou-se como base um ticket médio de cabos produzidos na TRAN03 e na TRAN04. Isso foi feito para tornar a análise mais eficaz, já que outros produtos seguem o mesmo processo dos cabos simulados e não deixaria o estudo financeiro estagnado em valores dos mesmos dois itens. Além disso, utilizar um ticket médio único seria muito amplo e é importante observar a produção em duas máquinas de saída. Esses números foram encontrados por meio de uma média ponderada entre a quantidade de vendas e o valor das vendas dos cabos. Importante ressaltar que os valores compreendem rolos de cabo de 200 metros, que foi a unidade utilizada em todas as simulações. O valor referente aos cabos da TRAN03 é de R\$ 1100,00 e da TRAN04 é de R\$1664,00.

Por último, para realizar o comparativo final, foram utilizados todos os cenários da seção 4.2, juntamente com uma perda de 4% de produtividade ao utilizar o percentual recebido no cenário de paradas de produção “Realista 1” da seção 4.3. Esses dados foram aprovados pelos gestores como uma possibilidade factível face ao atual cenário produtivo da empresa. Foram então incorporados 2 novos cenários que não envolvem mudança na quantidade de máquinas, mas a adição de um 3º turno de produção (levando a um funcionamento 24 horas/dia). Esse novo cenário é interessante por não demandar investimentos em recursos de máquinas.

Com esse novo teste, foram utilizadas 528 horas de simulação no fluxo produtivo padrão, que correspondem a 22 dias trabalhados durante 24 horas. Além disso, gerou-se um cenário com uma perda de produção de 15% decorrente da perda de produtividade pelo maior desgaste das máquinas e da alocação de uma nova equipe de operadores com menor experiência. Chegou-se nesse número através de um percentual fornecido pelos fornecedores das máquinas e por comparações de produção de equipes com diferentes meses de experiência no atual fluxo produtivo. Com essa nova possibilidade, foi contabilizada uma equipe nova de dois operadores que demandaria investimento mensal de R\$4500.

Assim, com todos os cenários anteriores da seção 4.2, mais os dois novos de um 3º turno de produção, foi realizada uma comparação de produtos totais produzidos, investimento, aumento e *payback*. O investimento se refere à quantia financeira envolvida na aquisição de máquinas e da adição de mais recursos (operadores) para gerenciarem essas máquinas. O aumento é a quantia financeira envolvida no aumento de produtos produzidos em relação ao cenário padrão. Já o *payback* é o tempo (em meses) para retornar o investimento. Esses dados estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos investimentos e *payback* de cada cenário de adição de máquina e mudança de turno

Cenários	Capacidade Máquina					Produção			Dados de Investimento		
	TOR	ESP	TRAN02	TRAN03	TRAN04	Produtos TRAN03	Produtos TRAN04	Total	Investimento	Aumento	Payback
Padrão	2	1	1	1	1	72	71	143	R\$ -	R\$ -	-
200% Espuladeira	2	2	1	1	1	72	71	143	R\$ 19.000,00	R\$ -	-
200% Traçadeira 02	2	1	2	1	1	72	71	143	R\$ 41.340,00	R\$ -	-
150% Torcedeira	3	1	1	1	1	87	84	172	R\$ 397.000,00	R\$ 39.413,76	10,07
200% Torcedeira	4	1	1	1	1	87	84	172	R\$ 794.000,00	R\$ 39.413,76	20,15
200% Traçadeira 03 + 200% Traçadeira 04	2	1	1	2	2	72	71	143	R\$ 118.250,00	R\$ -	-
150% torcedeira + 200% Traçadeira 03 e 04	3	1	1	2	2	89	88	178	R\$ 515.250,00	R\$ 47.934,72	10,75
150% torcedeira + 200% todas	3	2	2	2	2	108	108	216	R\$ 575.590,00	R\$ 101.195,52	5,69
200% todas	4	2	2	2	2	145	143	288	R\$ 972.590,00	R\$ 200.793,60	4,84
300% todas	6	3	3	3	3	217	215	432	R\$ 1.945.180,00	R\$ 400.521,60	4,86
3º Turno	2	1	1	1	1	110	109	220	-	R\$ 106.521,60	-
3º Turno (com perda de produtividade)	2	1	1	1	1	94	93	187	-	R\$ 60.823,78	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, a última análise realizada foi em relação ao custo de vendas desperdiçadas com as perdas de produção. Ao utilizar os dados de ticket médio dos produtos da TRAN03 e TRAN04, estima-se um valor desperdiçado em possíveis vendas. Esses resultados foram calculados para cada cenário de parada de produção e apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de vendas desperdiçadas em todos os cenários das paradas de produção

Código	Cenário	Ocupação	Produtos TRAN03	Produtos TRAN04	Total	%	Perda
E	TRAN02 freq. 16h	<b>91,84%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
G	TRAN03 freq. 16h	<b>76,30%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
I	TRAN04 freq. 16h	<b>95,97%</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	149	<b>1,00</b>	R\$ -
F	TRAN03 freq. 8h	<b>86,83%</b>	<b>74</b>	<b>74</b>	148	<b>0,99</b>	R\$ 1.110,00
C	TOR freq. 16h	<b>99,71%</b>	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
D	TRAN02 freq. 8h	<b>99,69%</b>	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
R2	Realista 2	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
O1	Otimista 1	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
O2	Otimista 2	-	<b>72</b>	<b>71</b>	143	<b>0,96</b>	R\$ 8.322,00
B	TOR freq. 8h	<b>99,69%</b>	<b>67</b>	<b>66</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.192,00
H	TRAN04 freq. 8h	<b>94,50%</b>	<b>68</b>	<b>65</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.746,00
R1	Realista 1	-	<b>67</b>	<b>66</b>	133	<b>0,89</b>	R\$ 22.192,00
P2	Pessimista 2	-	<b>65</b>	<b>63</b>	128	<b>0,86</b>	R\$ 29.404,00
A	TOR freq. 3h	<b>99,71%</b>	<b>57</b>	<b>56</b>	113	<b>0,76</b>	R\$ 49.932,00
P1	Pessimista 1	-	<b>57</b>	<b>56</b>	113	<b>0,76</b>	R\$ 49.932,00

Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5. CONCLUSÕES

Uma indústria em fase inicial de operação demanda diversas ações de estruturação. A empresa deste estudo encontra-se nessa fase, demandando a criação de uma estrutura de trabalho e processos, bem como ações para evolução em termos de eficiência produtiva. Neste contexto, a simulação permitiu entender os gargalos produtivos, bem como seus impactos na produção e quais as maneiras viáveis para proporcionar um avanço produtivo para a V.elo.

Para isso, os cenários testados no *software* envolviam variação na quantidade de máquinas, além de paradas de produção e alteração nos turnos de trabalho. Importante frisar que todos os modelos contemplaram a produção com uma demanda máxima e sem perdas nos processos dos operadores. Isso justifica-se pela perspectiva de um forte aumento de vendas e apresenta possibilidade de contratação de mais operadores.

Os resultados demonstram que, ao ingressar em num ritmo de demanda muito alto, o primeiro passo da empresa deve ser buscar a instalação de um novo turno, que possibilitaria um funcionamento 24 horas da indústria. Isto geraria um retorno rápido nos dois cenários simulados (menos de um mês), já que não há investimentos elevados necessários (somente inclusão de custo fixo mensal de R\$ 4500, referente aos salários da equipe de 2 operadores que seriam contratados). O grande desafio está em estruturar processos e regras que possibilitem uma entrega de resultados satisfatória dessa nova equipe. Caso fosse necessária a contratação de um facilitador para este fim ainda faria sentido, já que os ganhos variariam de R\$60000 até R\$106000, cobrindo os custos de contratação.

Em relação à adição de máquinas, se for necessário aumentar a produção sem a possibilidade do terceiro turno, a melhor maneira seria adquirir uma nova máquina de cada modelo. Esta opção traz um *payback* de aproximadamente 5 meses. Esta alternativa mostra-se adequada, pois adicionar apenas uma nova Espuladeira e trançadeiras não impacta no aumento de produção, ao passo que aumentar somente Torcedeira resulta em um investimento muito alto, já que é consideravelmente maior o custo de implementação comparado às outras.

Desta maneira, fica claro que existem diversas maneiras de expandir a produção da V.elo, sendo a mais viável a criação do terceiro turno. A ideia de investir em mais maquinários não se demonstra necessária no momento, somente quando esse novo turno chegar a um teto de produção, ou se observar que as máquinas estão se desgastando de uma forma muito acelerada e que impacte na qualidade dos produtos. Por último, é chave buscar formas de otimizar o funcionamento da Torcedeira, já que ela se encontrou como gargalo produtivo em

quase todos os cenários. Assim a otimização de seus setups e a busca por minimizar os desvios no seu funcionamento são chave para evolução da empresa.

O estudo demonstrou que a simulação computacional foi uma ferramenta importante para quantificar o modelo de produção da empresa, entender as especificidades dos processos e entender os pontos de maior importância dentro do processo produtivo. Desta forma, os dados e conclusões geradas proporcionam aos gestores uma dimensão dos desvios de produção, das possibilidades de investimento para aumento de produção e uma clareza em quais pontos são os seus gargalos produtivos e o seu real impacto no resultado produtivo.

## 6. REFERÊNCIAS

- A indústria em números. Portal da Indústria, São Paulo, 12 de mai. de 2022. Disponível em: < <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/industria-em-numeros/> >
- ADENIRAN, A. M., BURODO, M. S., & SULEIMAN, S. Application of Queuing Theory and Management of Waiting Time Using Multiple Server Model: Empirical Evidence From Ahmadu Bello University Teaching Hospital, Zaria, Kaduna State, Nigeria. *Journal of Health and Medical Sciences*, 4(1), 17-33, 2021.
- AMARAN, S. et al. Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research*, v. 240, n. 1, p. 351–380, 2016.
- ARAGÃO, A. P. Modelagem e simulação computacional de processos produtivos: o caso da cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes, RJ. Campos dos Goytacazes, 2011.
- BANKS, J., CARSON II, J. S., NELSON, B. L., & NICOL, D. M. *Discrete-event system simulation* (5th ed.). Prentice Hall, 2010.
- BANKS, J., CARSON II, J.S., NELSON, B.L. e NICOL, D.M. *Discrete-Event System Simulation*. Pearson Prentice Hall, 2005.
- BANKS, J.; CARSEN, J. S., *Discret Event System Simulation*. Prendice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- BIAVA, I. DAVALOS, R. V. Um estudo de modelagem e simulação de uma linha de produção de mortadela visando incorporar estratégias competitivas. XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. PR. ENEGEP, 2014.
- CASTILHO, R. MARCOS. O uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio à tomada de decisão: aplicação em empresa de papelão ondulado. Tese de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2004.
- CHUNG, C.A. *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. CRC Press, 2003.
- COELHO, F., RELVAS, S., BARBOSA-PÓVOA, A.P. Simulation-based decision support tool for in-house logistics: the basis for a digital twin. *International Journal of Production Research*, 2018.

- DALTON, G. Simulation Study of a Semi-Automated Flexible Production Line. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Ireland, 2008.
- FERREIRA, W. P., ARMELLINI, F., & DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in Industry 4.0: A state-of-the-art review. Computers & Industrial Engineering, 2021.
- GRAHAM, C., & TALAY, D. Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation. Springer Science & Business Media, 2013.
- ILGIN, M. A., TUNALI, S. Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 34, n. 5-6, p. 594-604, 2007.
- LAW, A., KELTON D.; Simulation Modeling and Analysis. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1991.
- LAW, A.M. and KELTON, W.D. Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, Boston, 2000.
- MARIANO, E. Conceitos básicos de análise de eficiência produtiva. XIV SIMPEP, 2007.
- MELLO, P. CARLOS HENRIQUE. Modelo para projeto e desenvolvimento de serviços. Tese de Doutorado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2005.
- MESQUITA, M. A., & TOMOTANI, J. V. Simulation-optimization of inventory control of multiple products on a single machine with sequence-dependent setup times. Computers & Industrial Engineering, 2023.
- NOR AZIATI A.H., & HAMDAN Nur Salsabilah Binti. Application Of Queuing Theory Model And Simulation To Patient Flow At The Outpatient Department. Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC), 2017.
- PEGDEN, C.D.; SHANNON, R.E. & SADOWSKI, R.P.: Introduction to Simulation using SIMAN, 2ª ed. New York, McGraw Hill, 1995.
- PEIXOTO, E.C., PINTO, L.R.; Gerenciamento de estoques via previsão de vendas agregadas utilizando simulação. Revista Produção, v. 16, n. 3, p. 569-581, Set./Dez. 2006.
- PIACENTINI, C. F., GAUSS, L., MORANDI, M. I. W. M., & Lacerda, D. P. Use of Discrete Events Computer Simulation and Optimization for Production Scheduling in a Company of the Plastics Industry, 2015.
- PIB cresce 4,6% em 2021 e fecha o ano em R\$ 8,7 trilhões. Agência IBGE Notícias, São Paulo, 04 de mar. de 2022. Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/33067-pib-cresce-4-6-em-2021-e-fecha-o-ano-em-r-8-7-trilhoes>>
- PIDD, M. Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1996.
- PIDD, M., Computer simulation in management science. 5. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2004.

THIOLLENT, M. Pesquisa-ação nas organizações. S. Paulo: Atlas, 1997.

RANKE, D., BRUNS, A., FINK, R., LEHNERT, A., & BAUERNHANSL, T. Evaluation of Indicators for Simulation's Prediction Quality of Material Demand in Matrix Production Systems. *International Journal of Production Research*, 2023.

ROBINSON, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. John Wiley & Sons, 2014.

SCHMITT, J.W.; TAYLOR R.R. *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. Illinois:Homewood, 1970.

TEERASOPONPONG, S.; SOPADANG, A. A simulation-optimization approach for adaptive manufacturing capacity planning in small and medium-sized enterprises. *Expert Systems with Applications*, v. 168, 2021.

TSIAMAS, K., & RAHIMIFARD, S. A simulation-based decision support system to improve the resilience of the food supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020.

WINSTON W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4. ed. Belmont. Brooks/Cole, 2004.