



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MATEUS JOSÉ DE SIQUEIRA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA
IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS EM UMA LINHA DE MONTAGEM: UM
ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO.**

SUMÉ - PB

2024

MATEUS JOSÉ DE SIQUEIRA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA
IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS EM UMA LINHA DE MONTAGEM: UM
ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO.**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Professor Dr. Daniel Augusto de Moura Pereira

SUMÉ - PB

2024



S586m Silva, Mateus José de Siqueira.

Modelagem, simulação e análise de cenários para identificação de gargalos em uma linha de montagem: um estudo de caso em uma fábrica de baterias de chumbo ácido. / Mateus José de Siqueira Silva. - 2024.

75 f.

Orientador: Professor Dr. Yuri Daniel Augusto de Moura Pereira.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Produção.

1. Modelagem. 2. Simulação de eventos discretos. 3. Análise de cenários. 4. Identificação de gargalos de produção. 5. Linha de montagem - baterias. 6. Baterias de chumbo-ácido. 7. Software AnyLogic. 8. Teoria dos sistemas. 9. Pesquisa operacional. I. Pereira, Daniel Augusto de Moura. II. Título.

CDU: 658.5(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

MATEUS JOSÉ DE SIQUEIRA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA
IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS EM UMA LINHA DE MONTAGEM: UM
ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO.**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA:

**Professor Dr. Daniel Augusto de Moura Pereira
Orientador – UAEP/CDSA/UFCG**

**Professor Dr. Marcos dos Santos
Examinador Externo – UFF**

**Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva
Examinador Interno – UAEP/CDSA/UFCG**

Trabalho aprovado em: 10 de outubro de 2024.

SUMÉ - PB

Dedico este trabalho aos meus pais, que são meus principais exemplos de força, perseverança e valores, sendo eles a base de tudo que conquistei até aqui.

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a Deus, pois nos momentos mais difíceis, foi nele que busquei forças para continuar e alçar voos cada vez mais altos. Ele segue abençoando minha vida com pessoas maravilhosas, que cuidam de mim por onde passo.

Agradeço ao meus pais, Mucio Siqueira e Marcia Siqueira, que representam o alicerce na minha vida, tudo que me ensinaram formam a pessoa que sou hoje, todas as decisões difíceis, todos os momentos de angústia, toda a saudade por estarmos distantes fisicamente, e mesmo distantes, seguimos juntos, trabalhando juntos e crescendo juntos, agradeço por sempre depositar confiança em mim e apoiar todas os meus sonhos.

A minha namorada e amiga, Mariane Pessoa, que a faculdade me apresentou e o SIMEP nos aproximou, agradeço por ser meu ponto de paz, por todo amor, carinho e por sempre me incentivar, sendo meu pilar nos momentos mais difíceis. Agradeço por ter feito da sua família a minha família. Os dias ao seu lado são mais felizes.

Agradeço aos meus amigos, Bruno Pereira e Pedro Tomaz, por sempre estarmos juntos nessa jornada, vivendo todos os desafios da graduação, e aos meus amigos de laboratório, Guilherme Araújo e João Cavalcante. Juntos nós quatro tivemos muitos momentos de conquista e risadas. Também ao meu amigo Luiz Antônio, ao qual devo muitos aprendizados durante o curso e muitas boas conversas.

Agradeço aos meus professores, em especial a Daniel Moura, que mais que meu orientador, ao longo do período de graduação se tornou um grande amigo. Obrigado por todo ensinamento, tanto pessoal, quanto profissional e por todas as oportunidades de podermos trabalhar juntos. Agradeço também ao meu professor Yuri, grande contribuinte para os conhecimentos adquiridos e por ser um conselheiro se tornando também um grande amigo.

Agradeço a Paulo Marcelo, meu primeiro orientador no mundo profissional e hoje grande amigo, e aos amigos da república dos coronéis, juntos vivemos muitos momentos felizes.

Por fim, agradeço a todos os docentes do curso de Engenharia de Produção da UFCG/CDSA, que compartilharam seus conhecimentos e colaboraram com minha formação acadêmica.

RESUMO

A crescente concorrência entre as empresas e o aumento significativo no mercado de baterias, impulsionam estratégias para aumento de volume de produção. Este trabalho apresenta uma análise detalhada da linha de produção de baterias de chumbo-ácido, com foco na identificação de gargalos e no aumento da capacidade produtiva. A pesquisa utiliza a simulação de eventos discretos, implementada no software AnyLogic, como ferramenta para modelar o fluxo de produção, identificar pontos críticos e testar diferentes cenários de melhoria. O processo de montagem foi estudado em suas etapas finais, buscando maior compreensão das limitações atuais do sistema. A partir dos dados coletados, foram simuladas quatro condições operacionais distintas, incluindo a alteração de tempos de ciclo em máquinas automáticas, aumento da capacidade de postos manuais e o aumento de capacidade física de esteiras. O estudo revelou que o gargalo principal se encontrava no equipamento de teste de vazamento, e que a redução de seu tempo de ciclo gerou um aumento na capacidade de produção, com ganhos de até 127 baterias por turno. Conclui-se que a aplicação da simulação permitiu um entendimento mais profundo do sistema produtivo e promoveu insights valiosos para a tomada de decisões estratégicas, especialmente em relação ao aumento da capacidade nominal da linha de produção.

Palavras-chave: Simulação de Eventos Discretos; Identificação de Gargalos de Produção; Baterias de Chumbo-Ácido; AnyLogic.

ABSTRACT

The growing competition among companies and the significant increase in the battery market drive strategies to increase production volume. This paper presents a detailed analysis of the lead-acid battery production line, focusing on identifying bottlenecks and increasing production capacity. The research uses discrete event simulation, implemented in AnyLogic software, as a tool to model the production flow, identify critical points and test different improvement scenarios. The assembly process was studied in its final stages, seeking a greater understanding of the current limitations of the system. From the data collected, four different operating conditions were simulated, including the change in cycle times in automatic machines, increase in the capacity of manual stations and the increase in the physical capacity of belts. The study revealed that the main bottleneck was in the leak test equipment, and that the reduction in its cycle time generated an increase in production capacity, with gains of up to 127 batteries per shift. It is concluded that the application of the simulation allowed a deeper understanding of the production system and promoted valuable insights for strategic decision making, especially in relation to the increase of the nominal capacity of the production line.

Keywords: Discrete Event Simulation; Identification of Production Bottlenecks; Lead-Acid Batteries; AnyLogic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do trabalho.....	18
Figura 2 – Integração dos conceitos de modelagem de sistemas.....	21
Figura 3 – Áreas da Pesquisa Operacional.....	22
Figura 4 – Ilustração de sistema e modelo.....	24
Figura 5 – Ilustração das etapas básicas de um processo de simulação.....	28
Figura 6 – Categorização da pesquisa.....	36
Figura 7 – Etapas do estudo.....	38
Figura 8 – Etapas do processo de montagem de uma bateria.....	41
Figura 9 – Etapas de modelagem dos dados.....	42
Figura 10 - Ilustração do banco de dados utilizado no experimento.....	43
Figura 11 – Teste de <i>outlier</i> SLR.....	46
Figura 12 – Teste de <i>outlier</i> LVB.....	46
Figura 13 – Teste de <i>outlier</i> TVZ.....	47
Figura 14 – Análises probabilística das amostras.....	48
Figura 15 – Modelo conceitual do sistema.....	49
Figura 16 – Modelo de simulação.....	50
Figura 17 – Quadro de representação gráfica da simulação.....	52
Figura 18 – Representação em 2D da linha de montagem.....	53
Figura 19 – Gráfico de barras para coleta estatística do modelo.....	53
Figura 20 – Histograma para coleta de tempo médio de espera.....	54
Figura 21 – Histograma de tempo gasto para entrada e saída de etapa.....	54
Figura 22 – Ociosidade por atividade.....	55
Figura 23 – Subutilização da esteira da Seladora.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análises estatísticas básicas dos tempos de ciclo.	45
Tabela 2 – Parâmetros da simulação.	51
Tabela 3 – Resultados obtidos na simulação do cenário atual.....	56
Tabela 4 – Parâmetros da simulação aumento de capacidade da esteira.	58
Tabela 5 – Resultados obtidos na simulação aumento de capacidade na esteira.....	59
Tabela 6 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo SLR).	61
Tabela 7 – Resultados obtidos na simulação (Redução SLR).	61
Tabela 8 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo TVZ).	63
Tabela 9 – Resultados obtidos na simulação (Redução TVZ).	63
Tabela 10 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo TVZ).	65
Tabela 11 – Resultados obtidos na simulação (Redução TVZ).	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LVB	Levantamento de Borne
PO	Pesquisa Operacional
SED	Simulação de Eventos Discretos
SIC	Solda <i>Intercell</i>
SLR	Seladora
TVZ	Teste de Vazamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivos gerais.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 TEORIA DOS SISTEMAS.....	19
2.2 PESQUISA OPERACIONAL	21
2.3 SIMULAÇÃO.....	23
2.3.1 Etapas de um processo de simulação	26
2.3.2 Elementos de um sistema de simulação	28
2.4 <i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO	30
2.5 TRABALHOS RELACIONADOS	32
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	36
3.2 ETAPAS DA PESQUISA.....	37
4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	40
4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	40
4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	40
4.2.1 Modelagem dos dados para experimento.....	41
4.2.1.1 Coleta de dados.....	42
4.2.1.2 Tratamento dos dados	44
4.2.1.3 Inferências.....	47
5 RESULTADOS	49
5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO.....	49
5.2 CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA.....	55
5.3 PROPOSTAS DE ALTERAÇÃO NA LINHA DE MONTAGEM	57
5.3.1 Análise do aumento de capacidade da esteira da seladora	57
5.3.2 Análise de cenário com redução de tempo de ciclo na SLR.....	60
5.3.3 Análise de cenário com redução de tempo de ciclo no TVZ	63

<i>5.3.4 Analise de cenário com aumento de capacidade no posto LVB</i>	<i>65</i>
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Para Costas (2015) a complexidade e o dinamismo que caracterizam o contexto em que as empresas operam hoje em dia têm desenhado um novo ambiente competitivo. Nele, o desenvolvimento das tecnologias da informação, a diminuição dos custos de transporte e a quebra de barreiras entre mercados, entre outros motivos, levaram à percepção de que a concorrência entre as empresas não está mais restrita ao produto em si, mas vai muito além.

No âmbito de negócios vivenciado atualmente pelas organizações, em que as mudanças são constantes, cada empresa precisa responder rapidamente à flutuação da demanda e gerenciar suas capacidades de maneira mais eficiente (Monden, 2015). Com a ampliação do desenvolvimento tecnológico tanto dentro quanto fora das organizações, esse elemento começou a impulsionar a produtividade em geral, diminuindo os custos de produção e oferecendo soluções para aprimorar o relacionamento com fornecedores e clientes por meio de novos modelos de negócios (Santos et al., 2018).

Para gerenciar sistemas de produção são necessárias as mais diversas ferramentas que irão auxiliar nas tomadas de decisão, tendo como principais objetivos, satisfazer os clientes, minimizar os custos e potencializar os resultados, fatores cruciais para manter a competitividade de uma instituição (Salam e Khan, 2016).

Segundo Santos (2013) a Pesquisa Operacional (PO) utiliza modelos matemáticos e/ou lógicos para resolver problemas reais, possuindo um caráter altamente multidisciplinar. Dessa forma, conforme o tipo e a complexidade do problema a ser analisado, são selecionados os modelos mais adequados àquela realidade. Dentre as inúmeras técnicas utilizadas por a Pesquisa Operacional podemos citar:

- Programação linear;
- Programação inteira;
- Programação dinâmica;
- Programação não linear;
- Filas;
- Simulação.

No campo das engenharias, a aplicação da técnica de simulação tem gerado inúmeros benefícios, como a previsão de resultados ao realizar uma ação específica, a mitigação de riscos na tomada de decisões, a identificação de problemas antes que eles ocorram, a eliminação de procedimentos em arranjos industriais que não acrescentam valor à produção, a condução de análises de sensibilidade, a redução de custos com recursos como mão de obra, energia, água e infraestrutura, além de permitir a avaliação da integridade e viabilidade técnica e econômica de um projeto (Silva, 2005).

Inúmeras definições para simulação estão disponíveis na literatura. Segundo Shannon (1992) a simulação é uma ferramenta que projeta sistemas reais e permite a realização de experimentos para com esses sistemas, possibilitando o entendimento do mesmo e a realização de experimentos, para se avaliar estratégias para suas operações. Já para Freitas (2001), a simulação consiste na utilização de técnicas matemáticas, aplicada a computadores digitais, que permite imitar o funcionamento de operações e sistemas do mundo real.

Um modelo de simulação descreve matematicamente um sistema, cujo estado pode ser representado, em um dado momento, por um conjunto de variáveis estocásticas e determinísticas, conhecidas como variáveis de estado. Os modelos de simulação podem ser classificados como discretos ou contínuos. Nos modelos discretos, as variáveis de estado permanecem constantes durante intervalos de tempo e mudam seus valores apenas em pontos específicos, chamados tempos de ocorrência de eventos. Já nos modelos contínuos, as variáveis de estado podem alterar seus valores continuamente ao longo do tempo (Freitas, 2001).

A Simulação de Eventos Discretos (SED) é uma técnica amplamente utilizada na Pesquisa Operacional para modelar e analisar sistemas complexos, onde os eventos ocorrem em momentos específicos e impactam o comportamento geral do sistema (Law, 2014). Não sendo uma técnica puramente de otimização, mas sim de avaliação de cenários e quando associada a otimização de processos e auxílio na tomada de decisão se torna uma poderosa ferramenta para resolução de problemas.

Em uma simulação, quanto mais precisos forem os dados de entrada do problema, mais eficiente será a simulação e, conseqüentemente, seus resultados se aproximarão mais da situação real, tornando-se uma eficiente ferramenta na tomada de decisão. Portanto para este trabalho, utiliza-se a SED com o objetivo de analisar possíveis gargalos no final de uma linha de montagem de baterias de chumbo ácido.

1.1 JUSTIFICATIVA

A SED é atualmente uma das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis para o planejamento, projeto e controle de sistemas complexos (Shannon, 1992). Rodič (2017) afirma, que a Simulação a Eventos Discretos, no decorrer dos anos, se consolidou nos campos práticos e científicos e relata que a sua utilização vem passando por evoluções constantes. Greasley e Owen (2016) destacam as diversas vantagens associadas à utilização da SED, como por exemplo, permitir investigar comportamentos de sistemas complexos, por meio de auxílio computacional e experimental.

Quando analisados processos através de simulação, é possível identificar possíveis problemas e pontos a serem otimizados capturando detalhes de operação sem a necessidade de muitas simplificações, comparando o sistema atual com cenários futuros, direcionando os esforços para onde se gera maior ganho produtivo.

A crescente demanda global por transporte sustentável e energia mais limpa tem impulsionado a procura por veículos elétricos a bateria. Os desafios enfrentados pelos consumidores, como a autonomia dos veículos, os preços iniciais mais altos, a disponibilidade limitada de modelos e a falta de conhecimento, estão sendo abordados por meio de atividades promocionais e legislação governamental. Essas iniciativas impactarão a demanda por veículos elétricos, estimulando o mercado. Além disso, o aumento na capacidade global de produção de baterias tem contribuído para alcançar economias de escala na indústria de baterias automotivas, outro fator importante para o crescimento do mercado (“Mercado de baterias automotivas- Participação, tamanho e crescimento da indústria”, [s.d.]).

Tendo em vista tal crescimento industrial e mercadológico na produção de baterias para o mercado automotivo, a concorrência no mercado agora se volta para qual organização será capaz de preencher a maior fatia, atendendo essa demanda. Com isso, identificar pontos de otimização em seus processos mais críticos, irá contribuir com a obtenção de uma maior porcentagem de mercado.

Diante do cenário exposto, esse trabalho é motivado por a utilização de simulação de eventos discretos, em uma linha de montagem de baterias de chumbo ácido de 135 a 180 amperes, para a identificação de gargalos possibilitando ganho de volume de produção total de acumuladores por turno.

1.2 OBJETIVOS

Com o foco na resolução do problema exposto, definiu-se os objetivos a serem alcançados neste estudo.

1.2.1 *Objetivos gerais*

Desenvolver uma simulação de eventos discretos voltada para o final de uma linha de montagem de acumuladores de chumbo ácido, possibilitando a visualização de gargalos na produção e a proposição e análise de diferentes cenários para o aumento da capacidade nominal de produção da linha.

1.2.2 *Objetivos específicos*

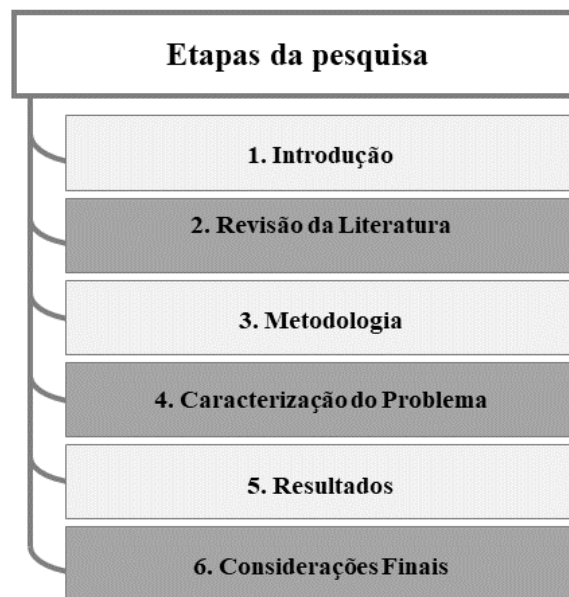
Para alcançar o propósito descrito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o processo completo de montagem de baterias de chumbo ácido a fim de obter uma compreensão maior sobre o sistema e suas características;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre simulação de eventos discretos e gargalos de produção;
- Elaborar modelos conceituais do fluxo do processo de montagem de baterias;
- Implementar o modelo de simulação computacional utilizando o *software AnyLogic*;
- Avaliar pontos gargalos na linha de produção;
- Propor e simular diferentes cenários que possibilitem o aumento de capacidade da linha de produção.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, cada um desempenhando um papel essencial na organização e apresentação da pesquisa. A disposição dos capítulos segue uma sequência lógica, destinada a proporcionar uma compreensão completa do estudo realizado. A Figura 1 ilustra a sequência da estruturação dos capítulos.

Figura 1 – Estrutura do trabalho.



Fonte: Autoria própria (2024).

A segunda seção oferece uma revisão concisa da literatura, abordando os principais conceitos relacionados a simulação de eventos discretos, com ênfase em aumento de capacidade em linhas de produção. A terceira seção descreve a metodologia adotada para a realização do estudo.

Na quarta seção, é apresentada uma descrição da empresa e do problema estudado, destacando os principais fatores e variáveis a serem consideradas. Além da análise estatística do processo em estudo.

Na quinta seção, são detalhadas as etapas de desenvolvimento da simulação, contando com a estruturação da coleta de informações dos cenários propostos e o estudo do cenário atual do sistema, bem como as análises futuras a serem realizadas. Por fim, a sexta seção traz as considerações finais desta pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão discutidos os principais fundamentos teóricos da pesquisa, abordando o uso da ferramenta de simulação tanto de forma independente quanto em conjunto com outras ferramentas em diferentes áreas. O foco será na aplicação da simulação para a identificação de gargalos em sistemas produtivos.

2.1 TEORIA DOS SISTEMAS

Lieber (2001) define sistema como sendo uma forma lógica de apreensão da realidade. Ao formular sistemas, o objetivo não é criar um "reflexo" do mundo real, mas sim descrever ou destacar certos "traços" da realidade que, em conjunto, permitem perceber uma condição de ordem e propor uma forma operativa voltada para um objetivo específico. Nesse contexto, um sistema pode ser definido como uma "coleção de entidades" ou coisas que estão inter-relacionadas ou conectadas de modo a "formar uma unidade ou um todo" ou a "permitir a realização de um fim lógico através dessas interações conjuntas". Cada componente se relaciona com, pelo menos, alguns outros, de maneira direta ou indireta, de forma mais ou menos estável, durante um determinado período, formando uma rede causal. As entidades podem ser pessoas, máquinas, objetos, informações ou até mesmo outro sistema, como um subsistema. Essas entidades podem ser inerentes (internas) ao sistema ou transientes (em movimento) em relação a ele. O sistema estabelece uma fronteira, e tudo o que está fora dessa fronteira é denominado ambiente do sistema.

Sistemas são estruturas autônomas e complexas, com limites definidos pela interação entre seus componentes e pelos processos internos (Barioni et al., 2002). Esses limites estabelecem as variáveis de entrada, de saída e/ou os parâmetros dos componentes do modelo. A complexidade de um sistema é determinada pela quantidade de níveis de organização que ele possui, sendo esses níveis identificados pela emergência de propriedades que não estavam presentes no nível de organização imediatamente inferior ou adjacente (Lovatto, 2002). Para De Moraes (2004) um sistema é considerado complexo quando possui mais possibilidades do que pode realizar em um determinado momento, forçando assim, que para que o sistema

continue operando, ele deva selecionar algumas de suas possibilidades tendo em vista que à medida que o número de elementos internos aumenta o número de relações entre eles cresce exponencialmente, tal fato, contribui para que muitas interações entre o sistema, permaneça em potencial para o futuro.

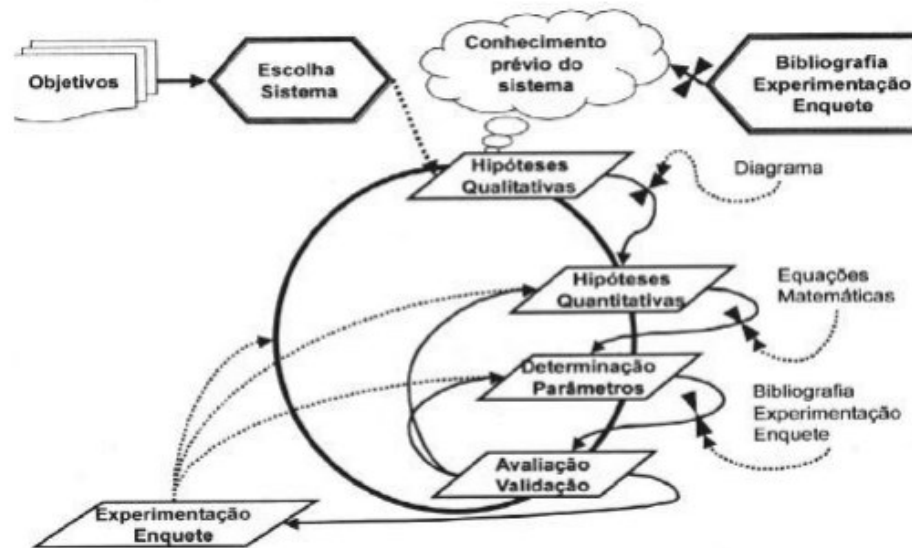
Luhmann (1999) cita que na sociedade muitas coisas são planejadas, por exemplo, círculos escolares, sistemas de tráfego em cidades, fluxos em processos produtivos, campanhas eleitorais, mas esse planejamento não garante que os efeitos aconteçam como pretendido, o que o levou a concluir que o sistema só evolui quando foge do planejado.

O sistema precisa se adaptar a uma dupla complexidade: a do ambiente e a sua própria. Se o sistema não buscase reduzir a complexidade do ambiente por meio da seleção de elementos, e a sua própria complexidade, ao se auto diferenciar, acabaria sendo diluído no caos, incapaz de lidar com o excesso de possibilidades. Se o sistema tentasse abarcar tudo, não se diferenciaria do ambiente, deixando de ser um sistema. Para evitar ser confundido com o ambiente, o sistema deve constantemente reafirmar sua distinção. A diferença entre sistema e ambiente é uma condição lógica para a autorreferência, pois não seria possível falar de um "si mesmo" se não houvesse algo além desse "si mesmo" (Luhmann, 1997).

As propriedades emergentes de um sistema, entre ao menos dois de seus componentes, explicam o porquê da resposta de um componente isolado face a uma determinada ação, nem sempre é igual a observada quando encontrada no interior do sistema. (Barioni, 2002). A quantidade e organização hierárquica dos componentes e processos que ocorrem no interior do sistema e suas propriedades emergentes, vão modular as mudanças de comportamento e respostas em função das alterações de seus limites (Barioni et al., 2002; Lovatto, 2002).

A técnica de modelagem de sistemas pode estimar a reação face a ação na qual ele está sujeito, orientando assim a execução de entendimento das áreas das quais se existe carência de informações em um processo produtivo (Lovatto, 2002). A utilização de conhecimentos multidisciplinares para realizar a modelagem do sistema auxilia na identificação das áreas carentes de informação, motivando assim a busca por conhecimento (Medeiros 2003). A Figura 2 ilustra o conceito de modelagem de um sistema.

Figura 2 – Integração dos conceitos de modelagem de sistemas.



Fonte: Lovatto (2002)

A Figura 2 ilustra como funciona o conceito de modelagem de um sistema, trazendo consigo a importância da definição de objetivos e do conhecimento prévio sobre o sistema, para então gerar hipóteses qualitativas. As hipóteses quantitativas precedem a determinação de parâmetros no sistema e a avaliação/validação do mesmo, tais fases na modelagem estão atreladas a experimentação, que por sua vez, volta ao início do ciclo, gerando mais conhecimento sobre o sistema e novas hipóteses qualitativas.

2.2 PESQUISA OPERACIONAL

A tomada de decisão faz parte da rotina empresarial e é crucial para o cumprimento das demandas institucionais e a obtenção dos resultados desejados. Assim, para desenvolver estratégias competitivas que proporcionem altos ganhos organizacionais, o uso de métodos quantitativos no apoio ao processo decisório torna-se essencial para otimizar as definições operacionais e de mercado (Silva, 2008).

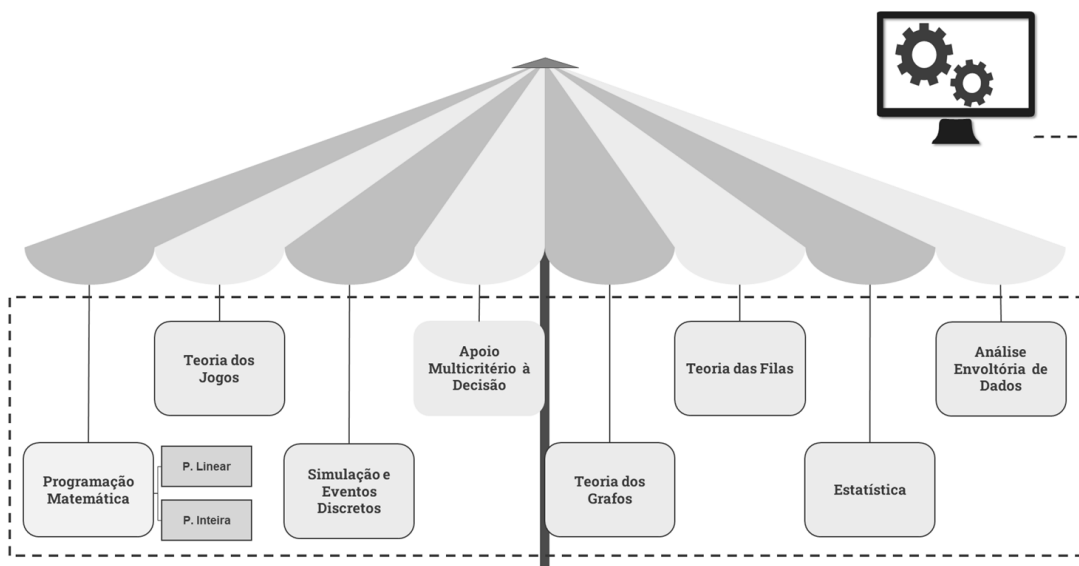
Segundo Kimbal e Morse (1951), “a Pesquisa Operacional é um método científico de prover setores executivos com uma base quantitativa para decisões relativas às operações sob o seu controle”. Para a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, a PO, em forma de

ciência, busca a resolução de problemas reais, tendo como foco a tomada de decisão, elaborando, analisando e aplicando métodos analíticos avançados, buscando obter soluções favoráveis nas mais diversas áreas da atuação humana (SOBRAPO, 2022). Arenales *et al.* (2007) complementa afirmando que a Pesquisa Operacional envolve o estudo e o desenvolvimento de metodologias científicas para analisar situações propostas e apoiar a tomada de decisões, permitindo antecipar e comparar os métodos sugeridos.

Existem três princípios fundamentais para a aplicação da Pesquisa Operacional: o primeiro é compreender as características da situação proposta e representá-las em um modelo matemático; o segundo é desenvolver matematicamente modelos e/ou métodos para resolver a situação em questão; e o terceiro é envolver a área beneficiada para entender o problema e explicar os resultados alternativos do modelo, destacando os impactos relevantes para a aplicação prática da Pesquisa Operacional (Arenales *et al.*, 2007).

A PO é uma ciência com uma base multidisciplinar, se estabelecendo sobre o conceito da teoria de sistemas viabilizado pela junção de ações e elementos, antes operando de forma individual, mas quando unificado possibilita maior produtividade e retorno frente aos objetivos, sua multidisciplinaridade possibilita a aplicação nas mais diversas áreas de pesquisa, um dos pontos mais interessantes sobre dá PO é o conjunto de subáreas de aplicação (Santos *et al.*, 2023). A Figura 3 ilustra algumas das mais diversas áreas da pesquisa operacional.

Figura 3 – Algumas das mais diversas áreas da Pesquisa Operacional.



Fonte: Santos *et al.* (2023)

Dentre as subáreas apresentadas na simbologia do “guarda-chuva”, a teoria das filas e a simulação são muito utilizadas para entendimento de problemas e análise de possíveis soluções, sendo a primeira utilizando de modelagem matemática para compreender as relações de probabilidade e ações que levam a formação de filas (Sundarapandian, 2009). Já a simulação proporciona uma modelagem de um sistema baseada na sequência de eventos dentro de um período de tempo integrando o estudo dos dados mediante a estatística (Santos *et al.*, 2015).

2.3 SIMULAÇÃO

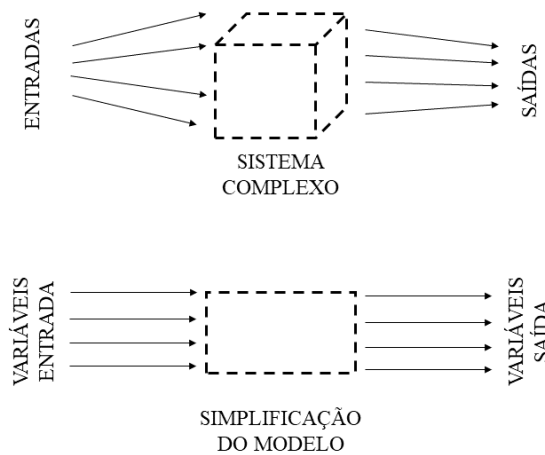
Segundo O'Kane et al. (2000), os modelos de simulação tornaram-se uma das técnicas mais populares empregadas a análises de sistemas industriais complexos. Ainda segundo este autor, a fase operacional compreende as maiores potencialidades de se obter os melhores resultados com o uso da simulação. Para Shannon (1975), a simulação não se trata de uma teoria, mas sim de uma metodologia de resolução de problemas. Ela é um método de modelagem utilizado para representar e analisar um processo real (físico) ou proposto, seja em um ambiente virtual (no computador) ou em protótipos (ensaios). A simulação consiste, portanto, em reproduzir um procedimento real em menor tempo e com custos reduzidos, permitindo uma análise mais detalhada do que poderá acontecer e como corrigir possíveis erros que poderiam acarretar grandes despesas.

De acordo com Hollocks (1992), a simulação computacional é uma técnica de pesquisa operacional que consiste na criação de um programa de computador que representa uma parte do mundo real, permitindo que experimentos realizados nesse modelo prevejam o que acontecerá na realidade. Seguindo a mesma linha de pensamento, Pedgen et al. (1990) afirmam que a simulação é o processo de criar um modelo computacional de um sistema real e realizar experimentos com esse modelo para compreender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

Para Silva (1998), simular é reproduzir o funcionamento de um sistema utilizando um modelo, que permite testar diferentes hipóteses sobre o valor de variáveis controladas, as conclusões obtidas a partir dessa simulação são então usadas para melhorar o desempenho do sistema em análise. O primeiro modelo de simulação surgiu em 1940, desenvolvido pelo matemático Von Neumann. Ele cunhou o termo "Análise de Monte Carlo" para descrever uma técnica matemática utilizada na solução de problemas complexos na física nuclear, onde

soluções experimentais seriam excessivamente caras ou o tratamento analítico seria inviável devido à sua complexidade (Loesh & Hein, 2009). A Figura 4 ilustra a relação entre sistema e modelo.

Figura 4 – Ilustração de sistema e modelo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Certas características presentes em problemas a serem analisados constituem um conjunto de pressupostos que justificam o uso da simulação. Strack (1984) destaca algumas dessas características:

- Não existe uma formulação matemática completa para o problema;
- Não há um método analítico disponível para resolver o modelo matemático;
- A obtenção de resultados a partir do modelo é mais facilmente alcançada por meio de simulação do que por métodos analíticos;
- Falta habilidade pessoal para resolver o modelo matemático utilizando técnicas analíticas ou numéricas;
- É necessário acompanhar o desenvolvimento do processo desde o início até os resultados finais, exigindo detalhes específicos;
- A experimentação no sistema real é impossível ou extremamente difícil;
- Há a necessidade de estudar longos períodos de tempo ou explorar alternativas que os modelos físicos dificilmente conseguem oferecer.

Os modelos matemáticos de simulação, ou simplesmente modelos de simulação, podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos. Modelos estáticos são aqueles que representam o estado de um sistema em um momento específico ou que não consideram a variável tempo em suas formulações, já os modelos dinâmicos, são projetados para capturar as mudanças no estado do sistema ao longo do tempo durante a simulação (Pereira et al., 2015). Modelos de simulação que não incluem variáveis aleatórias são classificados como determinísticos, o que significa que, dado um conjunto conhecido de dados de entrada, haverá apenas um conjunto único de resultados de saída. Por outro lado, um modelo estocástico de simulação incorpora uma ou mais variáveis aleatórias como entrada. Essas entradas aleatórias resultam em saídas também aleatórias, que só podem ser consideradas como estimativas das características reais do modelo. (Santos, 1999).

Para Gavira (2003) um modelo de simulação estático representa um sistema em um momento específico ou um sistema onde o fator tempo não é relevante. Em contraste, modelos dinâmicos capturam a evolução dos sistemas ao longo do tempo.

Um sistema pode ser classificado como determinístico ou estocástico, dependendo da natureza das entradas, do processo e das saídas em diferentes estágios do sistema. Modelos de simulação que não contêm variáveis aleatórias são considerados determinísticos; esses modelos possuem um conjunto de entradas conhecidas que resultam em um único conjunto de saídas. Já um modelo de simulação estocástico inclui uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, o que gera saídas aleatórias, apresentando uma gama de resultados possíveis conforme uma distribuição específica de valores Gavira (2003).

Muitos processos só podem ser descritos de forma adequada por distribuições de probabilidade, como aquelas que refletem a demanda variável por produtos e serviços, além dos modelos de filas e tempos de espera (Buffa & Dyer, 1977).

Kelton *et al.* (1998) estabelece parâmetros específicos, nos quais as simulações são classificadas com base no seu comportamento mediante tais parâmetros, para assim resumir os tipos de simulação existentes. Estes parâmetros são:

- **Tempo:** Quando o tempo não exerce seu papel natural, ou seja, permanece invariável, a simulação é classificada como estática. Caso contrário, quando o tempo influencia o sistema, a simulação é dinâmica, o que é comum na maioria dos modelos operacionais.
- **Estado de mudança:** Se o estado do sistema muda continuamente ao longo do tempo, como no caso de fluxos de água em reservatórios, a simulação é

classificada como contínua, no entanto, se as mudanças ocorrem apenas em determinados pontos no tempo, como em um processo de manufatura onde as peças seguem tempos específicos, a simulação é considerada discreta.

- **Aleatoriedade:** Modelos que não possuem entradas aleatórias são chamados de determinísticos, como em uma operação com agenda rígida e tempos fixos. Por outro lado, modelos estocásticos envolvem entradas aleatórias, como em um banco onde clientes chegam de forma aleatória, exigindo serviços com tempos variados.

A correta interpretação da realidade a ser modelada irá agir diretamente na validação dos resultados encontrados com a simulação. Portanto, o correto entendimento do comportamento do sistema irá direcionar o modelador na confecção do trabalho (Leal 2003).

De acordo com Moreira (2001), os objetivos da simulação precisam ser claramente definidos, incluindo a amplitude e a profundidade desejadas para a análise, bem como os recursos disponíveis. Essa definição inicial do problema pode ser ajustada ao longo do processo de simulação. A simulação pode servir tanto como o resultado final de uma pesquisa quanto como um complemento de informações voltado a um objetivo maior.

2.3.1 Etapas de um processo de simulação

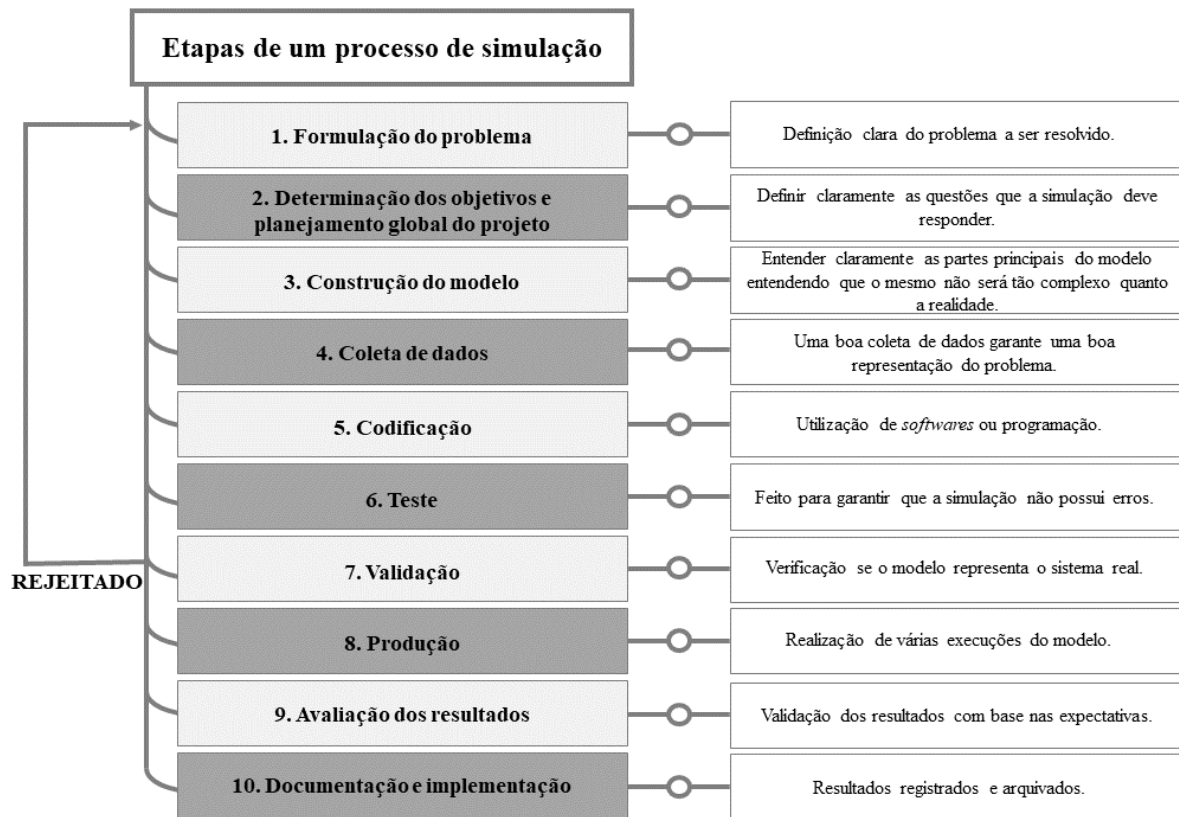
Santos (1999) caracteriza em 10 etapas básicas um projeto de simulação, são elas:

- **Formulação do problema:** Todo projeto deve começar com a definição clara do problema a ser resolvido. É essencial que essa definição seja compreendida por todos os envolvidos no projeto.
- **Determinação dos objetivos e planejamento global do projeto:** O objetivo define as questões que a simulação deve responder. Neste estágio, é importante avaliar se a simulação é a metodologia mais adequada para o problema em questão. Também é necessário estimar o tamanho da equipe envolvida, bem como os custos, o tempo necessário, entre outros aspectos.

- **A Construção do modelo:** Onde vai se caracterizar as partes principais de um sistema, trazendo a realidade para o modelo entendendo que o mesmo não será tão complexo quanto a realidade.
- **Coleta de dados:** A construção do modelo depende da coleta assertiva dos dados para se ter uma boa representação da realidade. Quando mais complexo o problema maior a quantidade de variáveis necessárias de coleta de dados.
- **Codificação:** Devido a complexidade da maioria dos problemas e sistemas, a simulação deve ser realizada com o apoio computacional, sendo necessária então a codificação ou utilização de *softwares* de simulação.
- **Teste:** Após a codificação dos programas, é necessário testá-los para garantir que não contenham erros de programação. Para isso, deve-se preparar um conjunto de dados destinado exclusivamente ao teste dos programas.
- **Validação:** Nesta etapa, verifica-se se o modelo é uma representação precisa do sistema que se deseja modelar. É aqui que ocorre a chamada calibração do modelo, onde são feitos ajustes até que os resultados ofereçam garantias de que o modelo representa de forma adequada o problema em questão.
- **Produção:** Etapa na qual é colocada em produção os dados obtidos, realizando várias execuções do modelo, variando os dados de entrada.
- **Avaliação dos resultados:** Nesta etapa, avalia-se se os resultados obtidos estão alinhados com as expectativas. Se forem encontradas discrepâncias, pode ser necessário retornar à fase de construção do modelo para realizar ajustes.
- **Documentação e implementação:** Assim como em qualquer projeto, é essencial que a simulação seja documentada de maneira clara e concisa. Os resultados obtidos também devem ser registrados e arquivados. Quando o usuário participa ativamente do processo, a implementação tende a ser bem mais simples em comparação aos casos em que o usuário não teve uma participação significativa.

A Figura 5 ilustra o fluxograma das etapas básicas de um processo de simulação.

Figura 5 – Ilustração das etapas básicas de um processo de simulação.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 5, que ilustra as etapas básicas para um processo de simulação, mostra resumidamente as 10 etapas, caracterizadas por Santos (1999), de forma resumida, facilitando o entendimento e a sequência a ser seguida.

2.3.2 Elementos de um sistema de simulação

Segundo Freitas (2008), os elementos de um sistema de simulação incluem variáveis de estado, eventos, entidades e atributos, recursos e filas de recursos, atividades e períodos de espera, tempo real simulado e tempo de simulação. As variáveis de estado fornecem informações sobre o que está ocorrendo no momento do estudo, como, por exemplo, o número de clientes esperando na fila do caixa de um banco.

Podemos definir cada elemento como:

- **Entidade:** Objeto de interesse do sistema;
- **Atributo:** A propriedade de uma entidade;
- **Atividade:** Algo a ser realizado, consumindo uma determinada quantidade de tempo;
- **Estado:** É a colocação de variáveis necessárias para descrever o sistema em um dado instante;
- **Evento:** A ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema;
- **Endógeno:** Descreve atividades que ocorrem dentro do sistema;
- **Exógeno:** Descreve atividades que ocorrem fora do sistema.

A Quadro 1 tem por propósito exemplificar os termos definidos acima.

Quadro 1 – Exemplos de elementos de um sistema de simulação.

Sistema	Entidade	Atributo	Atividade	Evento	Variáveis de Estado
Banco	Cliente	Saldo C/P	Depositar	Chegada à agência	Número de clientes esperando
Produção	Máquina	Taxa de paradas	Soldagem	Quebra	Maquina parada

Fonte: Autoria própria (2024)

O Quadro 1 mostra exemplos de cada um dos elementos citados anteriormente em um sistema de simulação, com exemplos focados em filas de um banco e em paradas de uma linha de produção.

2.4 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

A rápida evolução da computação trouxe uma grande revolução no campo da simulação. A simulação por meio de computadores começou a ser aplicada em diversas áreas, pois os computadores possibilitaram a criação de ambientes virtuais que podem ser configurados com as propriedades e parâmetros de sistemas reais, permitindo a realização de testes. O computador realiza todos os cálculos necessários dentro desse ambiente virtual, utilizando as teorias em estudo, e apresenta os resultados conforme definidos pelo modelador (PARAGON TECNOLOGIA, 2000). Com o crescente uso da simulação como ferramenta para análise de problemas, diversos softwares de simulação começaram a ser desenvolvidos, com aplicações em uma ampla gama de áreas. A maioria dessas ferramentas tem um custo significativo, o que exige das empresas a aquisição de licenças de uso. A escolha adequada do software é, portanto, um fator crucial para o sucesso de um projeto de modelagem (Saliby, 1997).

Para Law e Kelton (1991) existem duas grandes classes de *softwares* de simulação:

- Linguagens de simulação: São ferramentas computacionais de uso geral, mas com funcionalidades especializadas para certos tipos de aplicações em simulação. A principal vantagem dessas linguagens é a grande flexibilidade, permitindo a modelagem de praticamente qualquer tipo de sistema. Por outro lado, as desvantagens incluem a necessidade de conhecimentos específicos de programação e o tempo necessário para a construção de modelos.
- Simuladores: São ferramentas computacionais que facilitam a modelagem de sistemas específicos com mínima necessidade de programação. As vantagens dos simuladores incluem o tempo reduzido para a construção do modelo e a facilidade de uso, com interfaces amigáveis, menus intuitivos e gráficos adaptados ao sistema em questão. A principal desvantagem, no entanto, é a limitada flexibilidade para modelagem de sistemas fora do escopo para o qual foram projetados.

Machado (2020) ressalta que os softwares são amplamente utilizados na simulação de projetos, sendo reconhecidos tanto no ambiente acadêmico quanto no profissional pela qualidade que oferecem. Pesquisadores apreciam essas ferramentas pela ampla gama de recursos disponíveis.

Para Paegas (2017) a programação baseada em agentes é altamente diversificada na prática, tornando inviável a criação de uma linguagem universal, no entanto, o software incorpora certos padrões de design que simplificam o processo de programação para os desenvolvedores. Esses padrões se manifestam em áreas como a arquitetura do modelo, a sincronização dos agentes, o tipo de espaço utilizado, a mobilidade e a animação espacial. Eles também se aplicam às conexões entre os agentes, assim como à criação e destruição dinâmica desses agentes.

Alguns dos softwares mais utilizados pelo mercado são: AnyLogic, ARENA e FlexSim. De acordo com a Rockwell Automation (2022), o ARENA é amplamente empregado para a modelagem e simulação discreta de sistemas, com aplicações em diversas áreas, como aeroportos, cadeias de suprimentos e varejo. O FlexSim é uma ferramenta de simulação discreta, que oferece tanto uma versão paga, quanto uma gratuita para aprendizado pessoal. Conforme Diamond et al. (2002), o FlexSim se destaca entre os softwares disponíveis no mercado, oferecendo a possibilidade de desenvolver modelagens em ambientes 2D e 3D, sendo aplicável em simulações industriais, de logística e transportes.

O AnyLogic é reconhecido como um dos softwares mais completos e amplamente utilizados no mercado. De acordo com a AnyLogic Company (2022), o *software* trata-se de uma ferramenta de modelagem e simulação multicritério, desenvolvida e oferecida pela The AnyLogic Company, que permite aos usuários representar e modelar virtualmente qualquer sistema ou processo empresarial. Segundo Wang et al. (2013), o AnyLogic é baseado em tecnologias da linguagem Java e incorpora os três modelos mais utilizados em simulação: eventos discretos, agentes e sistemas dinâmicos. Além disso, é uma ferramenta projetada para criar um ambiente virtual que simula o ambiente real, abrangendo o comportamento de sistemas complexos.

Segundo De Lima e De Carvalho (2017), o *AnyLogic* é uma interface gráfica que permite modelar ambientes complexos como manufatura, lógica de negócios, recursos humanos entre outros. Este software não só atende às demandas contemporâneas, como também se destaca como uma ferramenta abrangente e robusta para enfrentar os desafios e dificuldades reais enfrentados por empresas e indústrias.

Ao oferecer uma abordagem multifacetada através de diferentes métodos de simulação, o AnyLogic se consolida como uma solução completa para a compreensão aprofundada dos processos organizacionais, possibilitando uma análise detalhada para identificar áreas de melhoria e otimização AnyLogic (2020).

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

A simulação de sistemas nas indústrias tem sido amplamente utilizada nas últimas décadas para o entendimento e otimização de processos, sendo essencial na identificação de gargalos em linhas de produção. Essa prática permite uma alocação mais eficiente de recursos e a redução de custos operacionais. Neste tópico, serão apresentados alguns estudos que empregaram simulação computacional para otimizar processos e mitigar gargalos industriais.

Verma e Verma (2021) propuseram a utilização de simulação computacional, utilizando o software AnyLogic, aliada a metodologia Six Sigma, para analisar e identificar problemas nas linhas produtivas de uma indústria de médio porte. Após a realização e validação dos dados reais e experimentais, o resultado obtido foi positivo, minimizando assim o tempo de produção dos artigos relacionados a indústria.

Visando otimização de tempo total de produção Fauadi *et al.* (2022) utiliza de simulação de agentes discretos para otimizar as ações da manutenção, preditiva e corretiva, considerando três fatores principais, maximizar o rendimento da manutenção, minimizar atrasos de produção e otimizar o sistema de manufatura.

Kampa, Golda e Paprocka (2017) propuseram a utilização de simulação em uma linha de manufatura para realizar um comparativo entre a mão de obra humanizada e robótica, com o estudo focado em determinar a diferença real entre a eficiência de humanos e robôs em uma linha de prensagem. Para tal análise, foram desenvolvidos 3 modelos de simulação no *software* ARENA considerando os parâmetros de disponibilidade e confiabilidade de máquina, operadores, utilizando o indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) para avaliar o desempenho de cada um.

Utilizando a simulação de eventos discretos para controle de chão de fábrica, Smith *et al.* (1994), utiliza da simulação como uma ferramenta de análise, avaliação e gerador de tarefas de controle no chão de fábrica, utilizando de uma linguagem especial do *software* ARENA para realizar a interação direta com o sistema de gestão.

Pontes *et al.* (2006), utiliza o *software* ARENA com o objetivo de identificar e analisar o recurso gargalo em uma linha de montagem de componentes automotivos. A análise dos cenários propostos permite a visualização um melhor desempenho quando comparados ao processo atual, avaliando os critérios de atravessamento total de material e quantidade total de objetos produzidos, demonstrando assim a eficiência da simulação na eliminação de gargalos em linhas de montagem.

Dos Santos et al. (2017), visa por meio da utilização das ferramentas de simulação, otimizar o tempo de seleção de estagiários para uma instituição do setor público, fazendo as análises de pontos gargalos e taxa de ociosidade dos operadores da instituição. As análises realizadas permitiram verificar os pontos gargalos no processo e a sobrecarga de alguns setores para a tomada de decisão de qual pessoa escolher, sendo feita então o redimensionamento de recursos, promovendo assim uma maior assertividade na distribuição de demandas e um *lead time* menor para seleção do candidato.

Oliveira (2007) propôs um estudo de simulação para avaliar um novo sistema de manufatura em fase de desenvolvimento focado no setor de autopeças. A simulação se fez eficaz por possibilitar a visualização de mudanças feitas no sistema, prevendo possíveis riscos a eficiência e os desafios a serem enfrentados após seu *start*.

Tendo em vista o desenvolvimento de um modelo de simulação para melhoria do gerenciamento/equipamentos gargalos em uma linha de produção de aço laminado, Fernandes (2007) utilizou o *software* ARENA determinando assim o maquinário gargalo na linha e propondo aliado a programação linear a otimização do fluxo de produção e o sequenciamento a ser seguido.

De Souza (2019) utilizou o *software* ARENA para modelar o processo produtivo e analisar seu comportamento, tendo como objetivo a redução do máximo tempo ocioso. Para tal análise foram gerados cenários, alterando os níveis de demanda da empresa e os tempos de processamento na produção. Tais cenários tinham como base a atualização de maquinários e possíveis contratações para atender a demanda de pedidos futuros. A simulação se mostrou eficiente pois possibilitou a redução de volume de estoque na companhia e o aumento das estações de trabalho.

Souza e Rodrigues (2022) realizaram uma simulação de sistema em um supermercado fictício com o objetivo de otimizar o atendimento nas filas dos caixas, reduzindo o tempo médio de espera e o tamanho das filas utilizando o *software* AnyLogic. Os resultados obtidos após 15 minutos de modelagem indicaram a necessidade de adicionar um terceiro caixa para alcançar os objetivos propostos de melhoria de eficiência no atendimento. O estudo ressalta a importância da simulação de sistemas como ferramentas valiosas na tomada de decisões para resolver problemas futuros e sustentar discussões e questionamentos sobre esses métodos.

Dionízio e Herculani (2019) exploraram a otimização do tempo total gasto no processo de suprimento de refrigerantes em uma rede de supermercados por meio de um modelo de simulação. Com o desenvolvimento desse modelo, os autores identificaram gargalos na operação e propuseram soluções para os problemas detectados. O estudo utilizou dados reais

coletados na empresa, adotando o *software* ARENA para o desenvolvimento do modelo, escolhido pela sua facilidade de uso e ambiente gráfico intuitivo.

Cavalcante (2019) destaca que os recursos disponíveis estão se tornando cada vez mais escassos, tornando essencial a produção com a minimização do uso desses recursos. Nesse contexto, o autor procurou integrar simulação e *machine learning* (ML) para abordar um dos problemas clássicos da manufatura: a seleção de fornecedores. Com base nisso, o autor desenvolveu cenários nos quais realizou experimentos para avaliar o desempenho do modelo na tomada de decisões relacionadas aos fornecedores. Os resultados indicaram que a aplicação de ML foi eficaz no apoio à tomada de decisão, proporcionando alta precisão na previsão do desempenho dos fornecedores em relação ao cumprimento dos prazos de entrega.

Becker (2016), a teoria das restrições (TOC) é amplamente aplicada em ambientes fabris, mas, raramente utilizada em outros contextos. Nesse cenário, a autora desenvolveu um modelo de simulação para testar os efeitos da TOC na cadeia de suprimentos do varejo. Ela modelou diferentes situações para comparar o cenário atual com um cenário onde a nova estratégia fosse aplicada. Com a implementação dessa estratégia, o modelo apresentou resultados positivos, incluindo a redução no percentual de rupturas, o aumento do capital de giro e um incremento no lucro líquido.

O Quadro 2 traz, como resumo dessa pesquisa, as principais informações dos 9 artigos selecionados, destacando o *software* de simulação utilizado por cada um dos autores e a área de desenvolvimento do projeto.

Quadro 2 – Trabalhos relacionados, área de estudo e *softwares* utilizados.

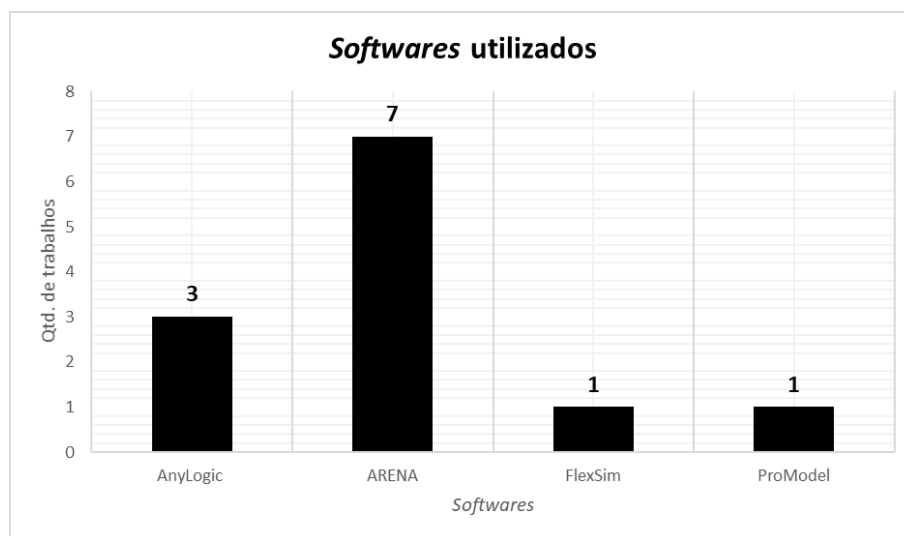
Trabalho	Área de estudo	Software
Verma e Verma (2021)	Industrial Ferramentas Cirúrgicas	AnyLogic
Fauadi <i>et al.</i> (2022)	Manutenção Industrial	AnyLogic
Kampa, Golda e Paprocka (2017)	Industrial Metalúrgica	ARENA
Smith <i>et al.</i> (1994)	Gestão Industrial	ARENA
Pontes <i>et al.</i> (2006)	Industrial Automotiva	ARENA
Dos Santos et al. (2017)	Setor Público	ARENA
Oliveira (2007)	Industrial Automotiva	ProModel

Fernandes (2007)	Industrial Metalúrgica	ARENA
De Souza (2019)	Construção Civil	ARENA
Dionízio e Herculani (2019)	Varejo	ARENA
Cavalcante (2019)	Gestão Industrial	AnyLogic
Becker (2016)	Varejo	FlexSim

Fonte: Autoria própria (2024)

O Quadro 2 apresenta os trabalhos relacionados totalizando 9 estudos dedicados a redução e identificação de gargalos em sistemas produtivos. O gráfico 1 apresenta o comparativo entre utilização de softwares nas pesquisas selecionadas.

Gráfico 1 – Utilização de *softwares* de acordo com a pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2024)

A massiva utilização do *software* ARENA se dá pela sua característica de simulação sem a utilização de linhas de códigos, com blocos já definidos e com a simulação sendo realizada através de fluxogramas, facilitando assim a interação com o usuário.

Com base nesses resultados, destaca-se o projeto que utiliza o AnyLogic no contexto acadêmico, apresentando uma abordagem inovadora, entretanto, sua utilização ainda é limitada, em grande parte devido ao fato de seu conteúdo ser apresentado em inglês, o que dificulta sua rápida disseminação.

3 METODOLOGIA

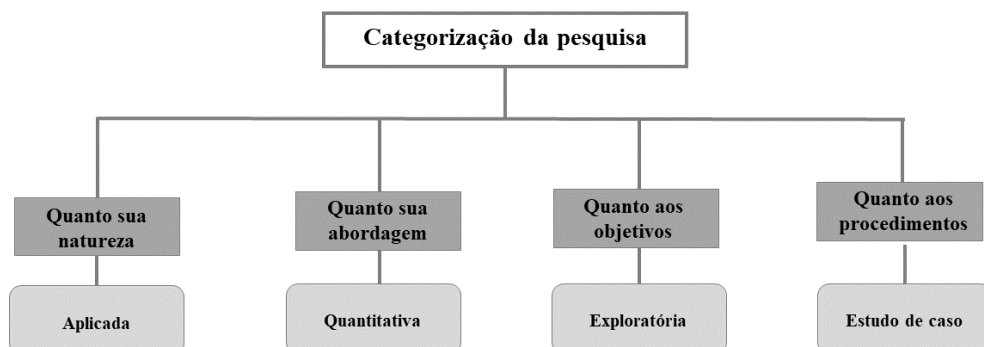
Este capítulo aborda os procedimentos metodológicos adotados para execução desse trabalho, apresentando a caracterização da pesquisa, em seguida, são apresentadas as etapas para o desenvolvimento e aplicação da simulação.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa científica consiste em uma série de procedimentos que contribuem tanto para o desenvolvimento quanto para a aquisição do conhecimento (Prodanov e Freitas, 2013). Pode-se defini-la como uma série de ações planejadas, voltadas para encontrar a solução de um problema, fundamentada em métodos racionais e sistemáticos. A pesquisa é geralmente conduzida quando surge um problema para o qual não se dispõem de informações suficientes para resolvê-lo (Silva & Menezes, 2005).

Para Gil (1999, p.42), a pesquisa tem um caráter pragmático, é um “processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos”. Dessa forma Nascimento (2016) classifica a pesquisa mediante alguns aspectos, sendo eles: Natureza, Abordagem metodológica utilizada, objetivos e procedimentos técnicos. A Figura 6 apresenta a categorização na qual este estudo se aplica.

Figura 6 – Categorização da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2024)

Para Silva (2005) a pesquisa de natureza aplicada objetiva gerar conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais. Quanto a sua natureza, este trabalho é caracterizado como aplicado pois visa a aplicação de conhecimentos práticos para desenvolver uma simulação por meio do AnyLogic, para proporcionar um melhor conhecimento do sistema ao qual está inserido.

De acordo com Silva e Menezes (2005), a pesquisa quantitativa parte do pressuposto de que tudo pode ser medido, convertendo opiniões e informações em valores numéricos para permitir sua categorização e análise utilizando métodos estatísticos. Da Silva (2005) considera que na pesquisa quantitativa tudo pode ser quantificável, requerendo o uso de recursos e técnicas estatísticas para garantir a quantificação dos resultados. Com base nas informações apresentadas, este trabalho demonstra uma abordagem quantitativa, uma vez que utiliza de dados numéricos e análises estatísticas para modelar e analisar a simulação do sistema em estudo.

Quanto ao objetivo da pesquisa Gil (1991) afirma que uma pesquisa exploratória deve oferecer uma compreensão mais aprofundada do problema, tornando-o mais claro ou auxiliando na formulação de hipóteses. Isso inclui a realização de revisões bibliográficas, entrevistas com pessoas que possuem experiência prática relacionada ao problema estudado, e a análise de exemplos que ajudem na compreensão. Tendo em vista as informações elucidadas anteriormente, classifica-se a pesquisa, em relação aos objetivos, como sendo exploratória, sabendo que foram realizadas buscas bibliográficas sobre simulação de sistemas para embasar o estudo, além de garantir maior familiaridade com as técnicas de simulação já utilizadas.

Por fim, quanto aos procedimentos, a pesquisa é caracterizada como um estudo de caso, definido por Gil (1991) como um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento. Cauchick-Miguel (2018) complementa como sendo uma pesquisa que ocorre em um cenário real e contemporâneo, desenvolvendo análises mais detalhadas do sistema em estudo.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

O desenvolvimento do estudo é dividido em 6 etapas principais, a Figura 7 ilustra as respectivas etapas.

Figura 7 – Etapas do estudo.

Fonte: Autoria própria (2024)

A primeira etapa consiste na geração de embasamento teórico sobre o problema do estudo, com isso, realizou-se uma pesquisa bibliográfica em diversas fontes, entre elas, livros, teses, artigos científicos nacionais e internacionais e periódicos. A seleção dos materiais baseou-se de acordo com sua relevância para o trabalho, focando em pesquisas com utilização de simulação, análises de gargalos em linhas de produção e otimização dos processos.

A realização de coleta de dados, segunda etapa do estudo, se deu através do sistema M3S, um sistema integrado de manufatura, que utiliza dos dados fornecidos pelos maquinários para criação de um banco de dados. As amostras coletadas compreendem o mês de abril/2024 totalizando 630 amostras de tempos de ciclo dos maquinários em estudo. Para o posto de trabalho com atividade manual, presente no sistema de estudo, foi estabelecido um método de

metrificação do ciclo para coleta das amostras. Foram coletadas 65 amostras em 3 turnos distintos, também em abril/2024, variando assim o operador responsável pela atividade, possibilitando uma amostra mais representativa para o posto nos 3 turnos de atividade do sistema.

Com os tempos de ciclo disponibilizados, foi necessária a realização de um filtro, retirando assim outliers da amostra, possibilitando uma maior veracidade dos dados, considerando o tempo de ciclo mínimo das máquinas em estudo e suas variações, representando falta de insumos, quebras e micro paradas. Para as amostras coletadas manualmente, tal tratamento não foi necessário. Após isso, realizou-se a análise dos dados para utilização como entrada no software de simulação.

Com os dados em mãos partiu-se para a quarta etapa, onde foi desenvolvida e parametrizada a simulação, no software AnyLogic, contendo os dados de entrada de agentes no sistema e os tempos de espera em cada um dos postos de trabalho, além das filas geradas na simulação. Além disso, foram definidas análises estáticas dentro do ambiente de modelagem, para realizar o acompanhamento do comportamento do sistema. Dentre elas:

- Média de ocupação das esteiras (filas);
- Taxa de ocupação dos postos de trabalho;
- Volume de produção total em diferentes cenários;
- Taxa de ocupação do posto manual;
- Histórico de tempo de espera nas esteiras;
- Máximo tamanho de produtos nas esteiras (fila máxima).

Por fim, na sexta etapa analisou-se os resultados das experimentações computacionais conduzidas, avaliando principalmente o volume de produção final da linha.

4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O estudo foi conduzido em uma empresa do mercado de baterias automotivas, Grupo Moura, fundada em 1957, aproximando-se aos 70 anos de história a empresa é consolidada como a maior fabricante de baterias automotivas da América Latina, com um volume de produção anual superior a 9,7 milhões de baterias.

Possui, atualmente, oito plantas industriais, dois centros técnicos e logísticos e mais de oitenta centros de distribuição comercial no Brasil, Argentina e Uruguai, além de distribuidores parceiros no Paraguai, Portugal e Reino Unido, atendendo a América do Sul e uma parcela do continente europeu, e também com diversos parceiros tecnológicos.

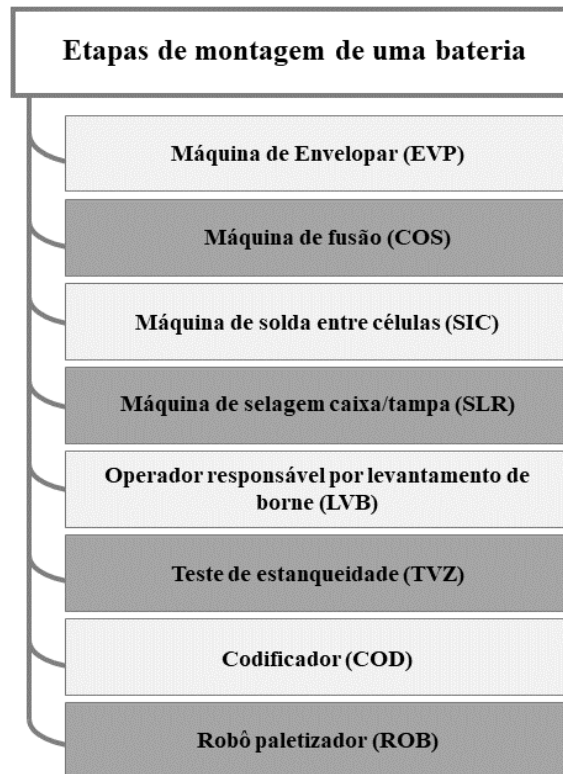
A planta industrial foco do estudo é a de baterias pesadas, localizada na cidade de Belo Jardim – PE, e a linha de produção específica do projeto é a de baterias entre 135 e 180 amperes.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com a massiva competitividade industrial vivida nos dias atuais, é de suma importância que as empresas visualizem cada vez mais perdas em seus processos e consigam otimizar sua produção, reduzindo custos diretos e indiretos, além de diminuir o *lead time* de produção de seus produtos. O crescimento eminente do mercado de baterias automotivas é uma grande oportunidade para que empresas já consolidadas e empresas ainda emergentes nesse seguimento, possam abocanhar fatias do mercado cada vez maiores, reafirmando assim a necessidade de cada vez mais aumentar sua capacidade produtiva e reduzir desperdícios.

Durante as análises feitas na linha de baterias pesadas (B32), observou-se que o fluxo não era contínuo, com o início da linha possuindo uma capacidade de processamento maior que o final de linha, gerando um retrabalho na esteira transportadora, causando assim sobrecarga operacional e aumentando o tempo total para processamento de um artigo. A Figura 8 ilustra as etapas de produção da linha e as máquinas responsáveis por cada etapa da montagem da bateria.

Figura 8 – Etapas do processo de montagem de uma bateria.



Fonte: Autoria própria (2024)

O problema observado ocorria na saída da máquina de soldagem entre células da bateria (SIC). Com o fluxo de transporte cheio, e a chegada contínua de peças para finalização do processamento, era necessária a retirada de material da esteira, totalizando ao final do turno 120 baterias não montadas, para realização de reprocessamento.

4.2.1 Modelagem dos dados para experimento

A modelagem de dados é dividida em 3 etapas. A Figura 9 ilustra as etapas necessárias.

Figura 9 – Etapas de modelagem dos dados.



Fonte: Autoria própria (2024)

Na etapa de coleta de dados, também chamada de amostragem, é onde se realiza o levantamento dos dados do sistema em estudo. A coleta deve ser focada no problema estudado no sistema.

Na segunda etapa, tratamento dos dados, se utiliza de técnicas para descrever e melhor compreender os dados levantados, investigando possíveis falhas e melhorando nosso conhecimento do sistema. As análises realizadas nessa etapa são de estatística descritiva e possíveis outliers na amostra.

A terceira e última etapa, é onde busca-se inferir qual o comportamento probabilístico da amostra, obtendo como resultado o comportamento aleatório que alimentará o *software* de simulação.

4.2.1.1 Coleta de dados

A coleta de dados para formulação da simulação, foi feita por meio de duas metodologias. A primeira foi a utilização do sistema Moura M3S, responsável por coletar informações transmitidas por as máquinas em rede, essas informações ficam disponíveis para os colaboradores observarem desde parâmetros históricos de processos, até eficiências de suas linhas de produção, possibilitando uma visão analítica em tempo real do desempenho dos maquinários. E a segunda, mais tradicional, foi a coleta manual, realizada no chão de fábrica. A observação torna-se um divisor de águas à medida que favorece o estudo de fatos e permite “[...] identificar e obter provas a respeito de objetivos sobre os quais os indivíduos não têm

consciência, mas que orientam seu comportamento” (Marconi & Lakatos, 1996, p. 79). Observando a necessidade da retirada do produto da esteira transportadora, a coleta manual dos dados se deu para avaliar a taxa de saída de baterias da máquina SIC e do posto de trabalho LVB, pois realiza uma atividade manual que não tem atribuição de coleta de dados automática como nas máquinas citadas anteriormente, ambas as coletas foram realizadas no período de abril/2024. A Figura 10 ilustra o banco de dados, estruturado e tratado em Excel, utilizados no experimento.

Figura 10 - Ilustração do banco de dados em Excel utilizado no experimento.

TEMPO DE CICLO SLR	TEMPO DE CICLO POLO	TEMPO DE CICLO TVZ
46,62	21,9	66,28
43,66	22,0	66,53
43,2	18,7	66,43
45,83	20,2	65,82
42,87	21,7	66,26
44,45	19,4	64,98
42,45	19,1	65,34
44,13	20,0	66,45
46	19,6	66,01
43,25	19,8	66,05
45,33	17,7	66,75
48,45	20,1	65,98
44,78	21,4	66,21
44,45	21,2	65,77
45,2	18,0	66,34
45,45	19,6	65,96
45,26	21,4	66,24
43,93	20,7	65,62
48,71	20,9	66,40
46,79	20,1	65,91

Fonte: Autoria própria (2024)

O banco de dados é composto por cerca de 630 amostras, somando coletas automáticas e manuais. A máquina SIC é a responsável por a definição da taxa de chegada de matérias no sistema em estudo, enquanto SLR, LVB e TVZ, são os últimos processamentos necessários para realização da entrega do produto ao macro processo posterior (Acabamento de baterias).

Após a realização da coleta de dados iniciou-se a fase de análise dos mesmos, com o intuito de entender seu comportamento estatístico para utilizar como entrada no *software* de simulação. As análises feitas foram de estatística descritiva básica e de distribuição estatística que representa o histórico de dados do sistema.

4.2.1.2 Tratamento dos dados

Ao longo desta pesquisa, a análise dos dados foi fundamental para a compreensão e interpretação das informações coletadas. Os parâmetros de tempo de ciclo dos maquinários analisados passaram por um tratamento abrangente e estruturado, para garantir uma entrada representativa no *software* de simulação.

Durante a coleta de dados é comum a ocorrência de intempéries no processo. Micro paradas, paradas por quebra, falta de insumos para processamento e atividades que não agregam valor executadas durante a operação, são alguns dos exemplos de ocorrências observadas. Visando entender o comportamento dos dados coletos, deve-se durante seu tratamento, utilizar de técnicas estatísticas de medidas de posição e medidas de dispersão, garantindo assim um melhor entendimento do conjunto de dados.

Seguindo os conceitos expostos, os parâmetros avaliados foram:

Medidas de posição:

- Média;
- Mediana;
- Moda;
- Mínimo;
- Máximo.

Medidas de dispersão:

- Amplitude;
- Desvio padrão;
- Variância da amostra;
- Coeficiente de variação.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos das análises feitas para todos os tempos de ciclo coletados.

Tabela 1 – Análises estatísticas básicas dos tempos de ciclo.

MEDIDAS DE POSIÇÃO	SLR	LVB	TVZ
Média	44,79	20,15	66,03
Mediana	44,78	20,1	66,00
Moda	44,45	19,4	66,1
Mínimo	42,45	17,7	65,00
Máximo	48,45	22,8	66,8
MEDIDAS DE DISPERÇÃO	SLR	LVB	TVZ
Amplitude	6	5,08	1,77
Desv. Pad.	1,51	1,02	0,30
Variância	2,28	1,04	0,09
CO-VAR	3%	5%	0,45%

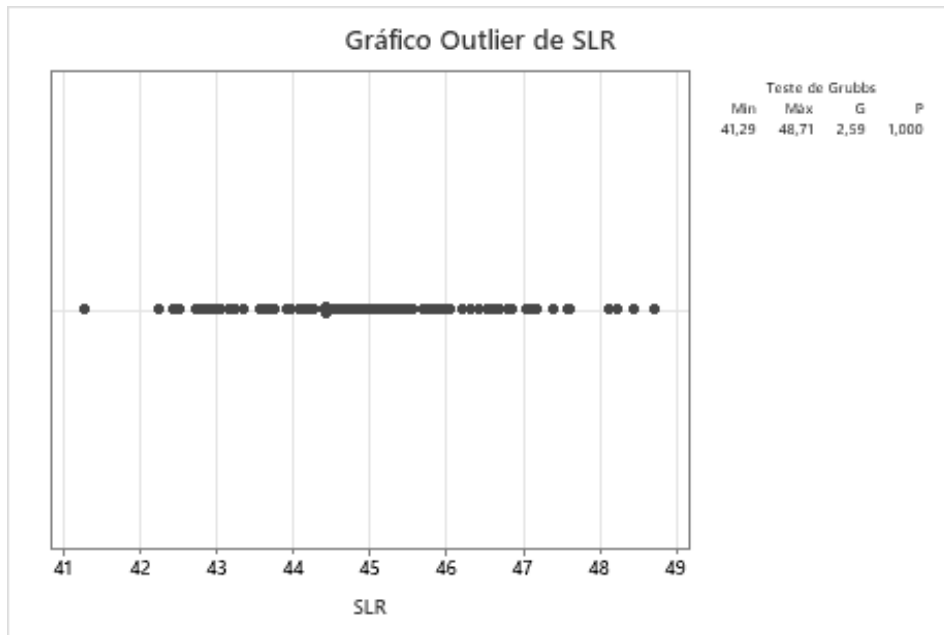
Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 1 apresenta as análises de estatística descritiva referente aos tempos de ciclo coletados dos postos de trabalho, tanto os automatizados, quanto o de atividade manual. Sendo essa análise o principal fator para o conhecimento do sistema em estudo, e possibilitando o entendimento de forma mais assertiva do bando de dados coletado.

O sistema inicia com a entrega de baterias vinda da máquina SIC, apresentando uma taxa média de chegada de 2,5 baterias por minuto, o que pode indicar, tendo em vista o fluxo do processo, uma taxa de entrega mais rápida que a suportada pelo sistema, quando avaliado o tempo máximo de ciclo da máquina SLR. Tal fator dentro da aleatoriedade estatística pode gerar o acúmulo de peças em processamento, mostrando evidenciando assim a perda no processamento de baterias.

Para uma maior assertividade no conjunto de dados aos quais serão feitas as inferências estatísticas, foi feita uma análise de outliers para cada um dos conjuntos, utilizando o método do teste Grubbs, que consiste na retirada de até um dado discrepante da amostra, garantindo que os dados permanecerão com relevância. A Figura 11 apresenta o teste de *outlier* para a amostra dos tempos de ciclo da máquina SLR.

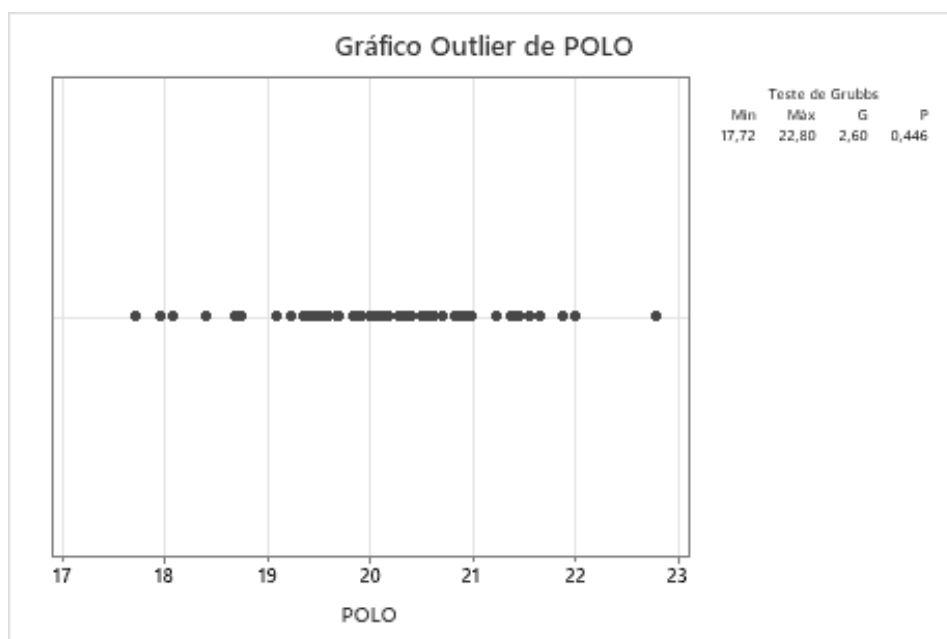
Figura 11 – Teste de *outlier* SLR.



Fonte: Autoria própria (2024)

O teste de Grubbs, aplicado a máquina seladora, com o mesmo nível de significância não apresentou nenhum outlier, de um total de 117 amostras. A Figura 12 apresenta o teste de outlier para o posto de trabalho de levantamento de borne.

Figura 12 – Teste de *outlier* LVB.

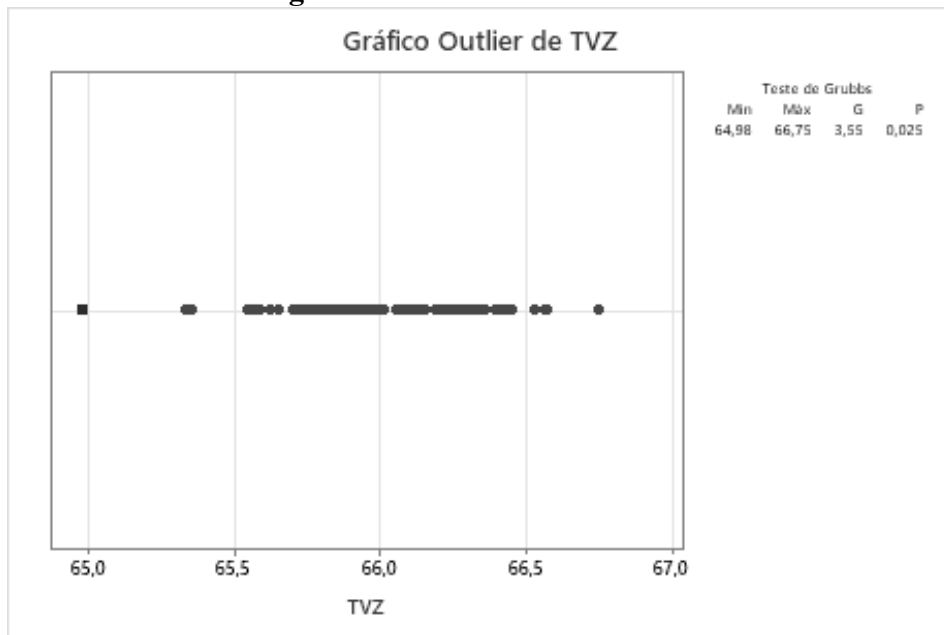


Fonte: Autoria própria (2024)

Seguindo também um nível de significância de 5%, o teste de Grubbs não identificou nenhum *outlier* na amostra dos dados de levantamento de borne.

Por último, a Figura 13, traz o teste de *outlier* para o teste de vazamento/estanqueidade (TVZ).

Figura 13 – Teste de *outlier* TVZ.



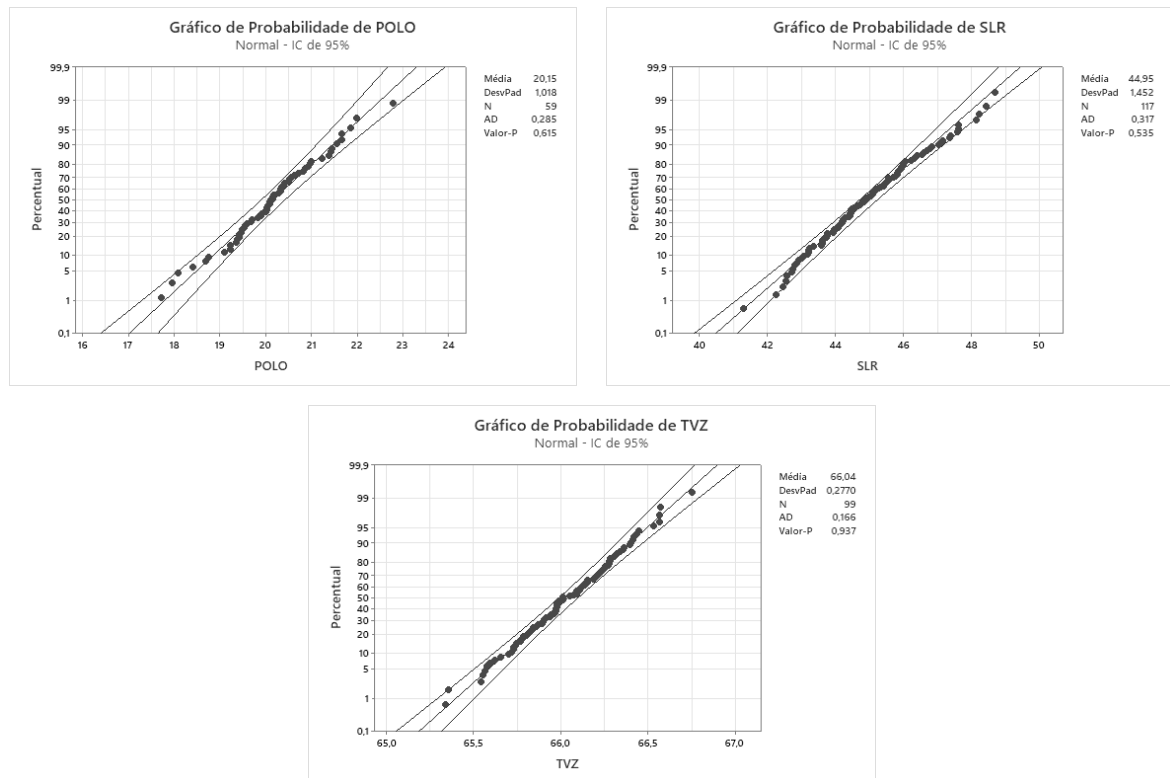
Fonte: Autoria própria (2024)

O teste de Grubbs apresentou 1 *outlier* na amostra de dados. O valor encontrado foi o valor mínimo de 64,98. Esse valor, mostra que pelo conjunto de dados do TVZ serem muito próximos, uma pequena variação, pode indicar um erro na coleta, ou na leitura dos sensores responsáveis por essa atividade, sendo assim necessária a retirada desse dado para início das inferências estatísticas.

4.2.1.3 Inferências

Após analisar a presença de *outliers* no conjunto de dados do experimento, foi feita a análise de distribuição probabilística para definir qual melhor representa o comportamento do sistema. A análise foi realizada através dos gráficos de probabilidade para análise de distribuição normal. A Figura 14 ilustra os resultados obtidos.

Figura 14 – Análises probabilísticas das amostras.



Fonte: Autoria própria (2024)

As análises probabilísticas indicaram que os tempos de ciclo coletados são representados por distribuição normal. Com os dados estruturados proporcionaram uma compreensão mais aprofundada do sistema, permitindo uma tomada de decisão mais eficaz no desenvolvimento do projeto de simulação.

5 RESULTADOS

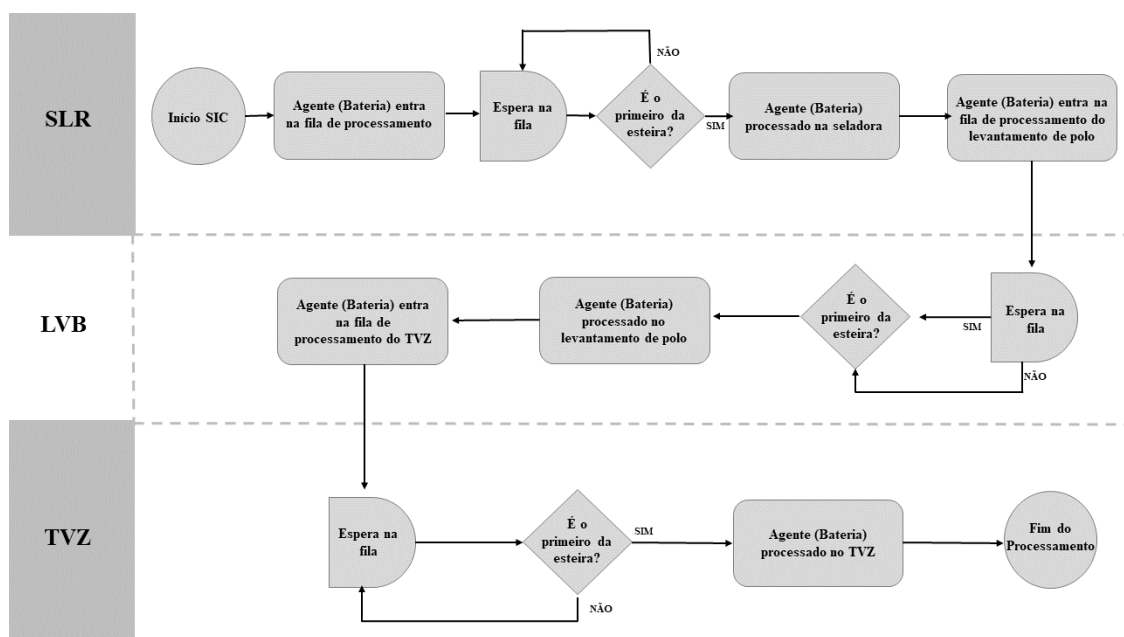
Nesta seção, é detalhado o processo de construção da simulação e os resultados computacionais obtidos, ajudando a entender os gargalos do sistema e onde pode-se otimizarlo.

5.1 MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO

A construção do modelo de simulação da linha de produção exigiu tempo e esforço significativos, a fim de obter uma compreensão aprofundada do sistema e identificar os pontos físicos e de processo que poderiam estar contribuindo para as perdas de produção.

Dessa forma, o modelo conceitual do sistema é apresentado na Figura 15, detalhando o comportamento do agente, bateria, em seu processo de montagem final. Essa representação é crucial para capturar diferentes estágios do processamento da bateria no sistema.

Figura 15 – Modelo conceitual do sistema.



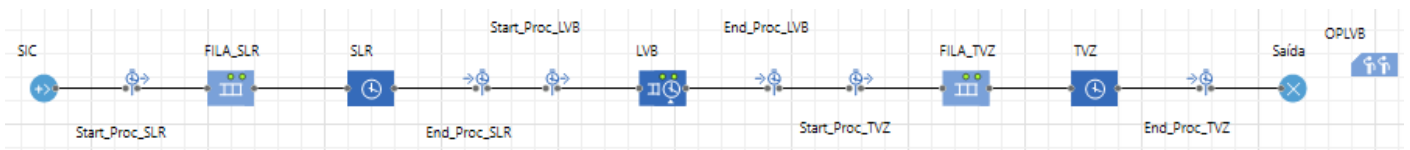
Fonte: Autoria própria (2024)

O início do sistema se dá através da máquina SIC, entregando a bateria, já soldada entre as células, para a esteira, onde será formada a fila de baterias até o próximo processo, o de selagem. A capacidade física da esteira é de no máximo 22 baterias, podendo variar, para menos, de acordo com a lógica adotada para sua movimentação.

Ao chegar na seladora a bateria é processada e entregue para a seguinte operação, a de levantamento de polo, atividade manual, feita por um operador especializado. Em seguida a bateria é testada em duas instâncias, para avaliar se existe vazamento entre as células e entre a caixa e a tampa. O teste de vazamento consiste na injeção de ar dentro da bateria, avaliando a perda de pressão durante o período de avaliação.

Diante desse cenário, foi desenvolvido um modelo de simulação, utilizando o software AnyLogic. A modelagem está detalhada na Figura 16. Essa modelagem oferece uma visão ampla e dinâmica do fluxo de baterias no sistema, permitindo uma análise mais aprofundada no contexto da produção, possibilitando a visualização de pontos de melhora antes não percebidos.

Figura 16 – Modelo de simulação.



Fonte: Autoria própria (2024)

O modelo é composto por 6 elementos, cada um deles representando uma parte do processo. Entre eles temos:

- **Source:** Indica o ponto de origem do sistema;
- **Queue:** Representa as esteiras transportadoras de baterias, também é onde se forma a fila de baterias para processamento;
- **Delay:** Representa a espera no processamento dos equipamentos automatizados;
- **Service:** Representa o posto de trabalho com atividade manual, agregando a espera na fila e o processamento da bateria;
- **Resource Pool:** É o elemento que parametriza o operador que realiza o processamento manual;

- **Sink:** Marca a conclusão do processo.

Com base nos dados coletados, são atribuídos valores a cada um dos objetos do sistema. O tamanho das filas foi parametrizado respeitando o tamanho dos artigos processados por a linha e o tamanho real da esteira, além de levar em consideração a lógica de passo da esteira, definindo assim a capacidade física de cada ponto, já os dados de chegada de agentes no sistema foi definido através das análises estatísticas feitas anteriormente, utilizando um rate de chegada de 2,5 baterias por minuto, representando assim a capacidade nominal da linha. As análises estatísticas para os tempos de tempos de processamento são representadas por uma distribuição normal, presente nas duas máquinas e no posto de atividade manual. A Tabela 2 apresenta a parametrização de cada etapa do sistema.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação.

Agente	Tempo de processamento	Capacidade de processamento	Capacidade da fila
Chegada_SIC	Rate (2.5)	-	-
FILA_SLR	-	-	18
SLR	Normal (44.79,1.51)	1	-
LVB	Normal (20.15,1.01)	1	6
FILA_TVZ	-	-	4
TVZ	Normal (66.03,0.30)	1	-

Fonte: Autoria própria (2024)

A probabilidade de chegada de baterias no sistema foi definida como um rate de 2.5 baterias por minuto, enquanto a esteira da seladora foi definida com uma capacidade de 18 baterias, capacidade máxima real da esteira, já seu processamento obedece a uma distribuição normal de (44.79, 1.51).

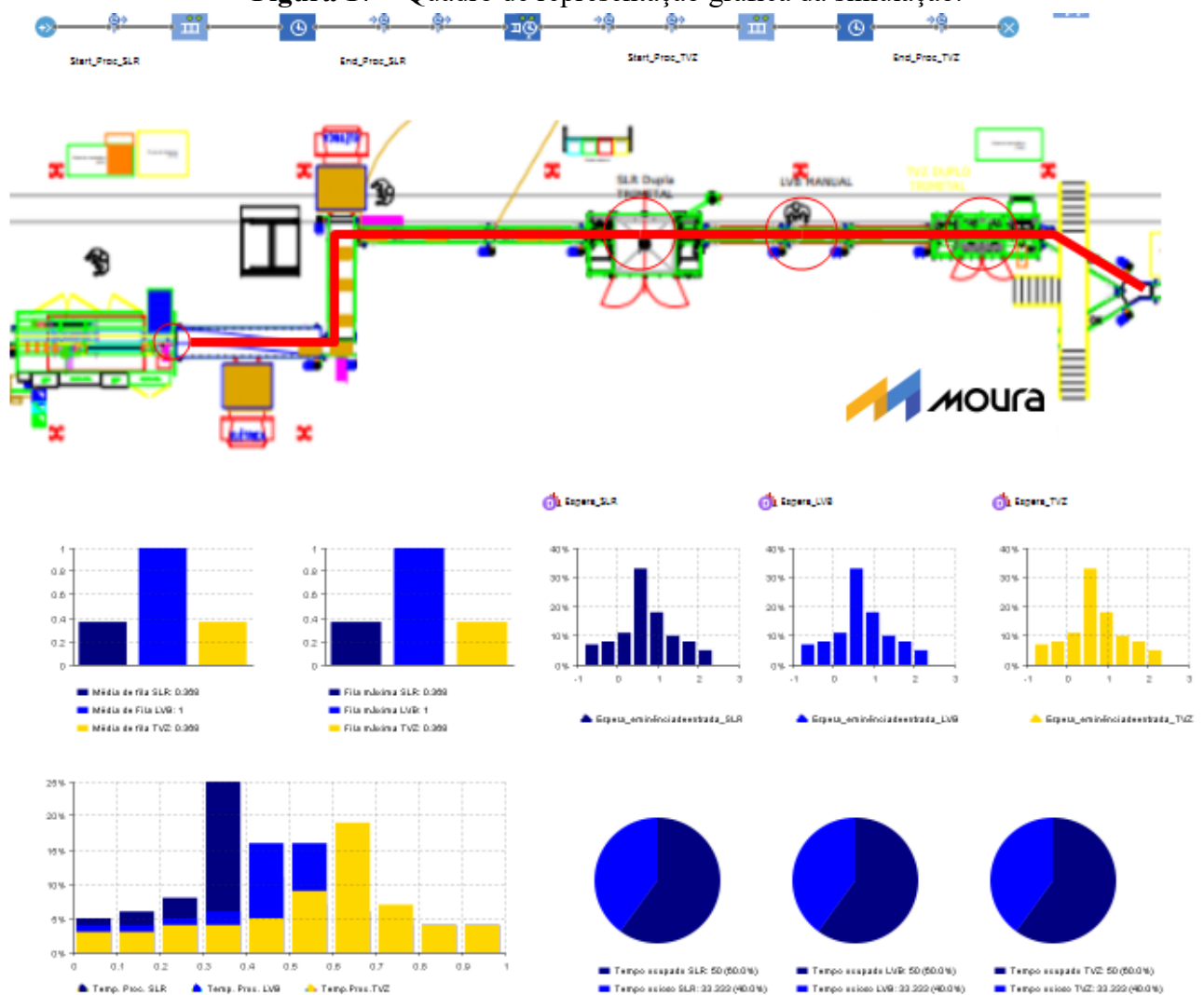
O levantamento de polo das baterias possui uma capacidade nominal de 6 baterias em sua fila, e o tempo de processamento foi definido como normal (20.15, 1.01).

E por último o teste de vazamento com uma capacidade de fila de 4 baterias e um tempo de processamento obedecendo uma distribuição normal (66.03, 0.30).

As probabilidades de cada um dos processamentos apresentadas na Tabela 2, tem como base nas análises estatísticas feitas anteriormente. Cada esteira, geradora da fila de baterias, foi parametrizada com base na sua capacidade real, coletada nas visitas feitas ao processo.

A Figura 17 apresenta o quadro gráfico no qual será exibido o modelo no software.

Figura 17 – Quadro de representação gráfica da simulação.



Fonte: Autoria própria (2024)

O quadro gráfico de visualização do modelo, foi construído de forma a se observar a coleta de informações estatísticas através dos gráficos e a visualização em 2D do comportamento dos agentes na esteira, sendo observados sob o desenho industrial, feito no *software* AutoCad, da linha em estudo melhor apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Representação em 2D da linha de montagem.

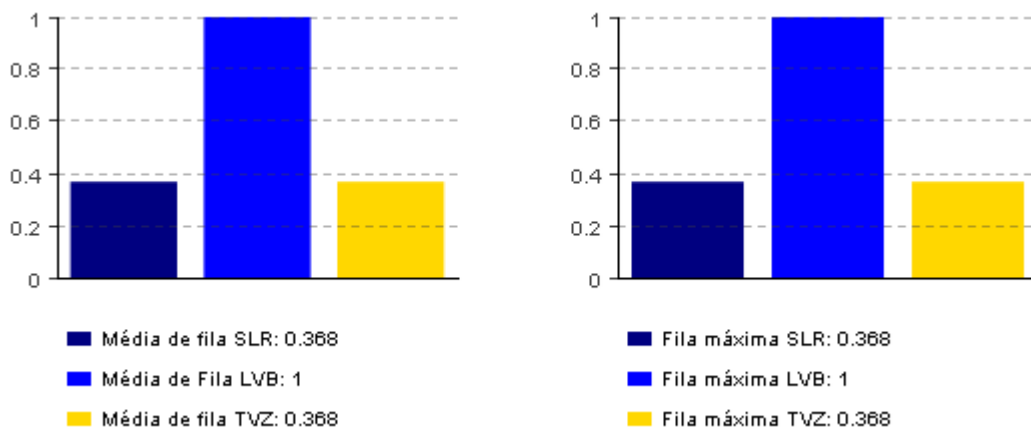


Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 18 apresenta o layout técnico da linha de montagem de baterias, destacando os equipamentos em estudo, como o Solda *InterCell* (SIC), Seladora (SLR), o posto de trabalho de Levantamento de Borne de Bateria (LVB) e o Teste de vazamento (TVZ). Nesse diagrama, os trajetos a serem seguidos pelo agente foram detalhadamente mapeados, permitindo uma análise clara e objetiva do fluxo operacional. A representação em duas dimensões, proporciona uma visão abrangente do comportamento do sistema, facilitando a compreensão de interações e fluxos entre os componentes, auxiliando na avaliação dos processos de tomada de decisão.

A Figura 19 ilustra os gráficos de barra do modelo gráfico.

Figura 19 – Gráfico de barras para coleta estatística do modelo.



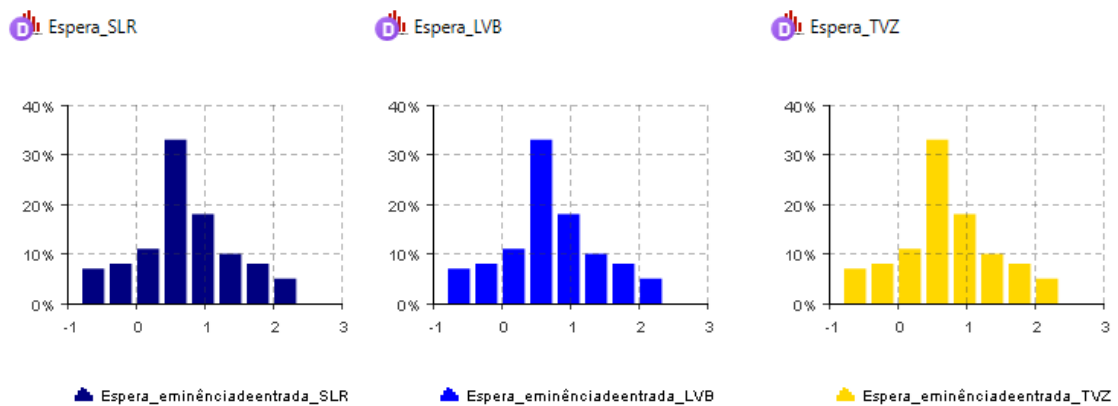
Fonte: Autoria própria (2024)

Os dois gráficos de barras exibem as estatísticas coletadas a partir do modelo de simulação, referentes às três filas observadas ao longo do processo. Com base nos parâmetros definidos na Tabela 2 (Parâmetros da simulação), as filas foram configuradas de forma específica, permitindo a análise detalhada dos resultados. Os gráficos apresentam, respectivamente, a fila média atingida durante o período de simulação, bem como a fila máxima

de baterias registrada ao final do tempo total simulado. Esses indicadores fornecem uma visão clara do comportamento das filas sob diferentes condições operacionais, auxiliando na identificação de possíveis gargalos.

Ao se observar o sistema em execução ficou clara a necessidade da coleta de dados referente ao agente que está na eminência de entrada no processamento (1º agente da fila durante o processo) para tal, foi definida a coleta dos dados através de parâmetro, *Histogram Data*, fornecido pelo *software* de simulação, esse parâmetro armazena os tempos de espera do primeiro agente na fila, indicando o tempo médio de espera para realização do seu processamento na etapa. A Figura 20 ilustra essa coleta.

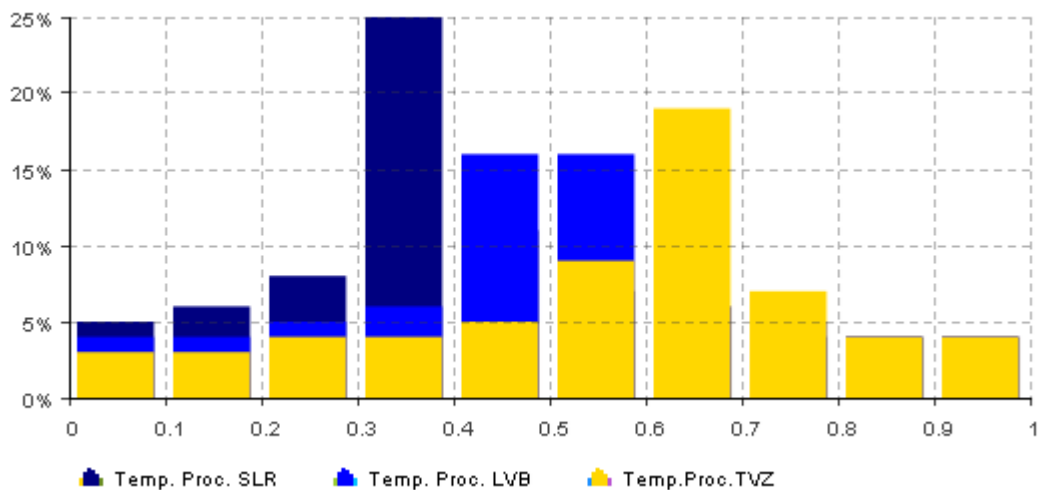
Figura 20 – Histograma para coleta de tempo médio de espera.



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 21 ilustra os dados de entrada e saída dos agentes em cada etapa do processo.

Figura 21 – Histograma de tempo gasto para entrada e saída de etapa.

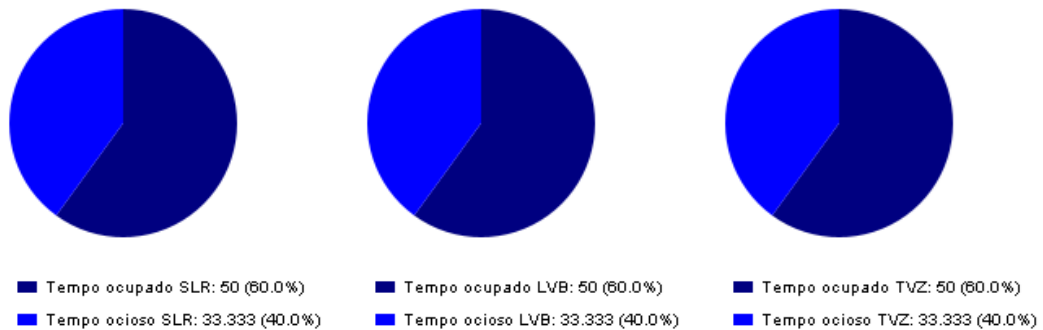


Fonte: Autoria própria (2024)

Com o uso do bloco *Time Measure* fornecido pela plataforma AnyLogic, o histograma apresentado na Figura 20 ilustra o tempo total gasto na transição de etapas dentro do processo. Esse tempo é calculado desde o momento em que o agente entra na fila até sua saída ao final do processamento, somando tanto o tempo de espera na fila quanto o tempo efetivo de processamento. Dessa forma, o gráfico oferece uma visualização clara do tempo de passagem por etapa, permitindo uma análise precisa da eficiência e possíveis gargalos do sistema ao longo do ciclo de produção.

A Figura 22 ilustra a última estatística coletada no processo.

Figura 22 – Ociosidade por atividade.



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 21 exibe gráficos de pizza, utilizados para ilustrar de maneira clara a distribuição do tempo ocioso total dos equipamentos ao longo do período de simulação. Esses gráficos proporcionam uma visão percentual da inatividade dos equipamentos, permitindo uma análise detalhada do seu desempenho e identificando potenciais oportunidades para redução do tempo improdutivo no sistema.

5.2 CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA

Para compreender o cenário atual do sistema, foram realizadas seis simulações atendendo aos parâmetros definidos com base no estudo estatístico prévio. As simulações permitiram uma análise detalhada do desempenho do processo durante um turno de produção, possibilitando a identificação de gargalos críticos na linha, bem como obstruções e desbalanceamentos entre as etapas. Esses resultados fornecem uma base sólida para a implementação de ações corretivas e ajustes operacionais, com o objetivo de otimizar o fluxo

produtivo e minimizar os impactos negativos nas operações. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos na simulação.

Cenário Atual	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
Fila méd. SLR	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
Fila méd. LVB	4.1	4.1	4.2	4.2	4.1	4.2
Fila méd. TVZ	3.2	3.2	3.3	3.3	3.2	3.3
Fila máx. SLR	18	18	18	18	18	18
Fila máx. LVB	6	6	6	6	6	6
Fila máx. TVZ	4	4	4	4	4	4
Eminência de Entrada SLR	26.4	26.3	26.4	26.39	26.4	26.4
Eminência de Entrada LVB	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
Eminência de Entrada TVZ	24	24	23.9	24	23.9	24
Tempo proc. SLR	497.5	497.5	497.5	497.5	497.5	497.5
Tempo proc. LVB	135.6	135.6	135.6	135.6	135.6	135.6
Tempo proc. TVZ	112.5	112.6	112.5	112.6	112.5	112.5
Tempo Ocupado SLR	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tempo Ocupado LVB	93%	93%	93%	93%	93%	93%

Tempo Ocupado TVZ	94%	94%	94%	94%	94%	94%
Entrada no Sistema	971	971	971	971	971	971
Saída no Sistema	940	940	940	940	940	940

Fonte: Autoria própria (2024)

A análise comparativa entre as simulações, conforme apresentada na Tabela 3, revela uma variação mínima nos dados observados. Essa baixa variabilidade pode ser atribuída à homogeneidade dos dados de entrada, o que indica que o sistema opera de forma estável. Essa estabilidade sugere que o processo é previsível e controlado, no entanto, o estudo também demonstra que pequenas alterações nos parâmetros do sistema podem resultar em impactos significativos no desempenho geral, evidenciando a sensibilidade do sistema a ajustes e melhorias pontuais.

Ao analisar a taxa de ocupação dos postos no sistema, torna-se evidente que o tempo de ocupação elevado de alguns postos se deve à incapacidade de processamento dos postos subsequentes. A seladora, por exemplo, opera com uma taxa de ocupação de 100%, porém esse valor não reflete o tempo efetivo de processamento. Isso ocorre porque o agente (bateria) já foi processado e está pronto para ser liberado, mas encontra-se bloqueado, aguardando a liberação do próximo estágio, enquanto outra estação ainda está em processamento. Esse gargalo fica particularmente evidente ao observar o tempo de espera na iminência de entrada no TVZ, que atinge 112 segundos, indicando obstruções no fluxo de saída.

5.3 PROPOSTAS DE ALTERAÇÃO NA LINHA DE MONTAGEM

5.3.1 Análise do aumento de capacidade da esteira da seladora

A primeira oportunidade de melhoria identificada refere-se à esteira da seladora, cuja capacidade nominal não estava sendo plenamente utilizada na prática, resultando em *gaps* ao longo do processo. Esse descompasso entre a capacidade teórica e a utilização real da esteira impacta negativamente o fluxo contínuo de produção, limitando o desempenho esperado. A Figura 23 ilustra essa ocorrência, destacando os momentos em que a esteira opera com capacidade subutilizada, evidenciando a necessidade de ajustes para otimizar o uso total da sua capacidade.

Figura 23 – Subutilização da esteira da Seladora.



Fonte: Autoria própria (2024)

Ao realizar um estudo detalhado da causa do problema, foi identificado que o passo da esteira estava desbalanceado, resultando em uma subutilização de sua capacidade real, que era de 24 baterias, 6 a mais que o cenário atual. Com base nessa descoberta, foi realizada uma simulação do comportamento do sistema com a esteira da seladora operando com sua capacidade total. A Tabela 4 apresenta os novos parâmetros para realização da simulação.

Tabela 4 – Parâmetros da simulação aumento de capacidade da esteira.

Agente	Tempo de processamento	Capacidade de processamento	Capacidade da fila
Chegada_SIC	Rate (2.5)	-	-
FILA_SLR	-	-	24
SLR	Normal (39.79,1.51)	1	-
LVB	Normal (20.15,1.01)	1	6
FILA_TVZ	-	-	4
TVZ	Normal (66.03,0.30)	1	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados presentes na Tabela 5, indicam os resultados obtidos após a simulação com a capacidade total da esteira pré-seladora.

Saída no Sistema	971	971	971	971	971	971
-------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 6 demonstra que, ao utilizar a capacidade física total da esteira, houve um aumento de dez baterias no número de entradas no sistema em comparação ao cenário atual do sistema, e um ganho de quatro baterias na saída do sistema, mostrando que a alteração da capacidade nominal da esteira projetaria um ganho real no fluxo de produção, seguindo a ideia de *buffer* de produtos para suprir qualquer atraso na chegada.

Vale ressaltar que mesmo com o aumento significativo na capacidade nominal da esteira, o sistema atingiu sua capacidade máxima de 24 baterias, com uma média de ocupação de 23.9, indicando que na maior parte do tempo a esteira esteve completamente ocupada. O que pode indicar que em algum momento o fluxo do sistema está passando por obstruções, devido possíveis gargalos na linha.

5.3.2 Análise de cenário com redução de tempo de ciclo na SLR

Para a análise inicial foi definida uma redução de cinco segundos nos tempos de ciclo dos equipamentos automáticos, assumindo que uma parte do tempo original era de tempos mortos, ou seja, atividades que não agregavam valor ao produto final. Esses tempos mortos podem ser definidos como tempos de movimentação não otimizados, sendo observados em posicionamento de sensores e liberações e também em tempos de processamento prolongados, como por exemplo, o tempo de queima da caixa plástica para realização da selagem da bateria, que é definido por SKU's distintos. Para otimização desses pontos deve ser realizado estudos de otimização e comparativos para garantia da qualidade do produto.

O tempo de ciclo da seladora para input na simulação, representava uma distribuição normal com 39.79 segundos de média e um desvio padrão de 1.51 segundos. A Tabela 6 apresenta os novos parâmetros de processo para essa simulação.

Tabela 6 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo SLR).

Agente	Tempo de processamento	Capacidade de processamento	Capacidade da fila
Chegada_SIC	Rate (2.5)	-	-
FILA_SLR	-	-	24
SLR	Normal (34.79,1.51)	1	-
LVB	Normal (20.15,1.01)	1	6
FILA_TVZ	-	-	4
TVZ	Normal (66.03,0.30)	1	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos da nova simulação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos na simulação (Redução SLR).

Cenário Atual	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
Fila méd. SLR	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9
Fila méd. LVB	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
Fila méd. TVZ	3.4	3.5	3.4	3.5	3.5	3.4
Fila máx. SLR	24	24	24	24	24	24
Fila máx. LVB	6	6	6	6	6	6
Fila máx. TVZ	4	4	4	4	4	4
Eminência de Entrada SLR	27.1	27.2	27.1	27.1	27.1	27.2
Eminência de Entrada LVB	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
Eminência de Entrada TVZ	25.7	25.7	25.7	25.8	25.7	25.8

Tempo proc. SLR	669.2	669.1	669.1	669.1	669.2	669.2
Tempo proc. LVB	158.7	158.7	158.7	158.7	158.7	158.7
Tempo proc. TVZ	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7
Tempo Ocupado SLR	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tempo Ocupado LVB	97%	97%	97%	97%	97%	97%
Tempo Ocupado TVZ	97%	97%	97%	97%	97%	97%
Entrada no Sistema	950	950	950	950	950	950
Saída no Sistema	921	921	921	921	921	921

Fonte: Autoria própria (2024)

Com a proposta de redução do tempo de ciclo da SLR, observou-se uma diminuição no desempenho global do sistema, com uma redução de aproximadamente 19 baterias processadas. Esse resultado indica que o aumento da capacidade de processamento nesse posto em específico, não resultaria em ganhos para a linha como um todo, sugerindo que o verdadeiro gargalo do processo está localizado em outro ponto do sistema.

Ao analisar os resultados da simulação, percebe-se um aumento significativo no tamanho médio das filas nos postos de Levantamento de Borne (LVB) e Teste de Vazamento (TVZ), evidenciando que esses pontos apresentam maior obstrução no fluxo do que a seladora. Além disso, o tempo de espera na iminência de entrada no TVZ aumentou em cerca de 1,5 segundos, enquanto o tempo médio total de processamento teve um acréscimo de 9 segundos.

Essas análises demonstram que um aumento no processamento no início da linha não se traduziria em ganhos de produção no final do sistema, uma vez que as obstruções persistiriam em outros pontos críticos. O aumento expressivo no tamanho das filas indica que, mesmo com maior capacidade na SLR, a saída do equipamento seria bloqueada, impedindo o fluxo contínuo e o processamento das baterias que aguardam na fila.

5.3.3 Análise de cenário com redução de tempo de ciclo no TVZ

Para realização do teste de otimização do TVZ também se utilizou de uma redução de 5 segundos em seu tempo de ciclo, como feito para a máquina SLR, ou seja, considerando que parte do tempo de ciclo total, é representada por tempos mortos no processo. Com o estudo realizado anteriormente, o tempo de ciclo do TVZ era representado por uma distribuição normal, com uma média de 66.03 segundos e um desvio padrão de 0.30. A Tabela 8 apresenta os novos parâmetros de processo para a simulação do sistema.

Tabela 8 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo TVZ).

Agente	Tempo de processamento	Capacidade de processamento	Capacidade da fila
Chegada_SIC	Rate (2.5)	-	-
FILA_SLR	-	-	24
SLR	Normal (39.79,1.51)	1	-
LVB	Normal (20.15,1.01)	1	6
FILA_TVZ	-	-	4
TVZ	Normal (61.03,0.30)	1	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Ao executar a simulação com os novos parâmetros de operação do TVZ, observou-se uma alteração significativa na capacidade do processo. Essa modificação resultou em uma mudança no desempenho global da linha de produção, refletindo uma maior eficiência no fluxo de trabalho. A Tabela 9 apresenta os resultados detalhados, evidenciando os impactos dessas alterações nos principais indicadores de performance, em estudo.

Tabela 9 – Resultados obtidos na simulação (Redução TVZ).

Cenário Atual	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
Fila méd. SLR	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9
Fila méd. LVB	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Fila méd. TVZ	3.1	3.2	3.2	3.1	3.2	3.1
Fila máx. SLR	24	24	24	24	24	24

Fila máx. LVB	6	6	6	6	6	6
Fila máx. TVZ	4	4	4	4	4	4
Eminência de Entrada SLR	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1
Eminência de Entrada LVB	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
Eminência de Entrada TVZ	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
Tempo proc. SLR	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Tempo proc. LVB	124.0	124.1	124.0	124.1	124.1	124.1
Tempo proc. TVZ	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7
Tempo Ocupado SLR	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tempo Ocupado LVB	92%	92%	92%	92%	92%	92%
Tempo Ocupado TVZ	94%	94%	94%	94%	94%	94%
Entrada no Sistema	1067	1067	1067	1067	1067	1067
Saída no Sistema	1032	1032	1032	1032	1032	1032

Fonte: Autoria própria (2024)

A nova análise evidencia um aumento significativo na entrada de agentes no sistema, consequência direta do aumento da capacidade na esteira da seladora, que, em vários momentos das simulações, atingiu sua capacidade máxima. A seladora manteve uma taxa de ocupação de 100%, enquanto o teste de vazamento apresentou uma leve redução em sua ocupação quando comparado ao cenário anterior. Esse resultado indica que, além de gerar mais fluxo para o final do sistema, o teste de vazamento ainda possui capacidade de processamento ociosa, sugerindo uma oportunidade para ocupação adicional.

A redução implementada no TVZ também refletiu positivamente no tempo de espera dos agentes na eminência de entrada no SLR. Com o sistema mais desobstruído, o posto foi capaz de processar os agentes na fila de forma mais rápida, aumentando a eficiência geral do fluxo.

Esses ganhos resultaram em uma capacidade de processamento total de 1.032 baterias, representando um aumento de 92 baterias em comparação ao cenário atual do sistema.

5.3.4 Análise de cenário com aumento de capacidade no posto LVB

Dentre os postos estudados o Levantamento de Borne é o único realizado manualmente, com um operador realizando a fundição do poste da bateria com um molde, para criar o borne (polo positivo e negativo) do produto.

Por se tratar de uma atividade manual, o foco da simulação seria o aumento de capacidade de processamento do posto. No cenário atual um operador realiza a atividade, para simulação foi proposta a execução com dois operadores. A Tabela 10 indica os parâmetros atuais para o teste.

Tabela 10 – Parâmetros da simulação (Redução do tempo de ciclo TVZ).

Agente	Tempo de processamento	Capacidade de processamento	Capacidade da fila
Chegada_SIC	Rate (2.5)	-	-
FILA_SLR	-	-	24
SLR	Normal (39.79,1.51)	1	-
LVB	Normal (20.15,1.01)	2	6
FILA_TVZ	-	-	4
TVZ	Normal (66.03,0.30)	1	-

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 11 apresenta detalhadamente os resultados obtidos com a simulação desse cenário.

Tabela 11 – Resultados obtidos na simulação (Redução TVZ).

Cenário Atual	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
Fila méd. SLR	23.9	24	23.9	24	24	24
Fila méd. LVB	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Fila méd. TVZ	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Fila máx. SLR	24	24	24	24	24	24
Fila máx. LVB	6	6	6	6	6	6
Fila máx. TVZ	4	4	4	4	4	4
Eminência de Entrada SLR	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7
Eminência de Entrada LVB	38.2	38.2	38.2	38.2	38.2	38.2
Eminência de Entrada TVZ	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3
Tempo proc. SLR	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Tempo proc. LVB	124.0	124.1	124.0	124.1	124.1	124.1
Tempo proc. TVZ	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7
Tempo Ocupado SLR	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tempo Ocupado LVB	89%	89%	89%	89%	89%	89%
Tempo Ocupado TVZ	99%	99%	99%	99%	99%	99%

Entrada no Sistema	1002	1002	1002	1002	1002	1002
Saída no Sistema	968	968	968	968	968	968

Fonte: Autoria própria (2024)

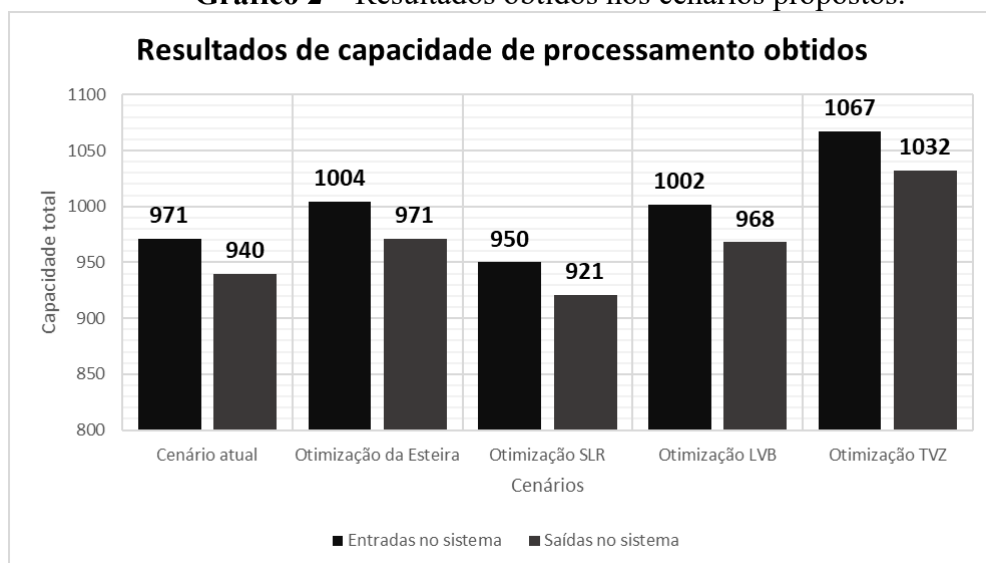
O aumento de um operador para execução da atividade de levamento de polo resultou em uma produção total de 968 baterias e uma entrada no sistema de 1002. A taxa de ocupação do posto ficou com uma média de 89%, o que indica um baixo tempo ocioso durante o turno, mesmo com dois operadores executando a atividade. Outro ponto importante para análise é a fila média de 4 baterias, o que mostra uma taxa de ocupação média de 66% da capacidade total.

Tal configuração proporcionou uma utilização de 99% do tempo do TVZ, com o mesmo tendo uma utilização de 92,5% de taxa de ocupação média de sua capacidade total de fila.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão abordadas as análises dos resultados mais promissores obtidos nas simulações e a avaliação final para determinar a opção mais adequada para o aumento de capacidade do processo. O foco está na capacidade total de entrada e saída do sistema, além de possíveis objeções quando a mão de obra e estruturas físicas do sistema, nos cenários avaliados. O Gráfico 2 traz a comparação entre os cenários.

Gráfico 2 – Resultados obtidos nos cenários propostos.



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 23 apresenta um comparativo entre os diferentes cenários proposto de simulação após o aumento de capacidade da capacidade total da esteira.

Ao analisar o comparativo entre os cenários, fica evidente que a redução do tempo do tempo de ciclo da seladora seria a ação com menor impacto no resultado global do sistema. Esse comportamento já pôde ser observado durante a execução das simulações, uma vez que, com a taxa de chegada definida em 2,5, a seladora já apresentava ocupação total ao longo do período simulado. Isso indica que, mesmo com a redução, os gargalos persistiriam nas demais etapas do processo, limitando os ganhos de eficiência. Portanto, a melhoria no tempo de ciclo da seladora, isoladamente, não seria suficiente para resolver os problemas de fluxo e maximizar o desempenho global da linha de produção.

O segundo cenário mais promissor para o sistema foi o aumento da capacidade do posto LVB, entretanto, essa ação exigiria a contratação de um novo operador, já que a atividade é realizada manualmente. Embora isso pudesse aumentar a capacidade de processamento, geraria também um aumento na ociosidade do operador durante períodos em que o fluxo de trabalho fosse reduzido, impactando a eficiência do uso de mão de obra e os custos operacionais da empresa.

O resultado mais promissor observado nas simulações foi a redução no tempo de ciclo do teste de vazamento. Com essa melhoria, a linha de produção atingiu uma capacidade total de 1.067 baterias no período analisado. A redução do tempo de ciclo não implicaria na compra de um novo equipamento, apenas na redução de tempos mortos, tornando-a uma solução eficiente em termos de custo-benefício. Além disso, essa redução resultaria em um aumento de 127 baterias na capacidade total de processamento da linha, destacando-se como a intervenção mais impactante para melhorar o desempenho do sistema sem a necessidade de recursos humanos extras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do cenário de alta competitividade no mercado e do crescimento acelerado da demanda por baterias, as empresas que buscam capturar uma parcela significativa desse mercado em expansão devem garantir, de maneira rápida e eficiente, o aumento da produtividade em seus sistemas produtivos. A capacidade de escalar a produção de forma ágil, mantendo a eficiência operacional, será um fator decisivo para se destacar frente à concorrência e atender às exigências de um mercado em constante evolução.

A complexidade envolvida no entendimento de sistemas de produção torna praticamente indispensável a aplicação de técnicas de simulação que garantam a melhoria contínua sem impactos negativos nos resultados. A utilização dessas técnicas permite identificar ajustes precisos e efetivos, evitando a realização de testes imprecisos e de baixo retorno. Dessa forma, assegura-se que as intervenções no sistema produtivo sejam baseadas em análises robustas, minimizando riscos e maximizando a eficiência e a produtividade sem comprometer a estabilidade operacional do sistema. Diante desse fato, o enfoque desse estudo, foi a construção de uma simulação capaz de proporcionar a identificação de gargalos no sistema e direcionar as ações para maior ganho de volume de produção possível.

Para tal, foram coletadas as informações estatísticas do processo de montagem de baterias pesada e realizadas inferências para definição da distribuição estatística que mais se assemelhava ao processo estudado para as máquinas automáticas, além de levantar as capacidades físicas de processamento e transportes na linha. As análises mostraram que máquinas automáticas em um processo estável apresentam uma variação muito baixa em seus tempos de processamento, o que indicou a necessidade de redução desses tempos para um aumento significativo na capacidade nominal da linha.

A abordagem de simulação foi aplicada em quatro cenários distintos, considerando a redução de cinco segundos nos tempos de ciclo dos maquinários automáticos, o acréscimo de um operador no posto de trabalho manual e o aumento de capacidade da esteira da Seladora.

Os *insights* obtidos para as quatro simulações mostraram resultados importantes para futuras melhorias no processo. Quando avaliada as capacidades de ocupação da esteira anterior a seladora, viu-se a possibilidade de criação de um buffer no processo, que se mostrou eficaz e refletiu na capacidade total do sistema. Resultando em um ganho de 31 baterias ao final do processamento. No cenário de redução do tempo de ciclo da Seladora, foi observada uma queda na capacidade nominal da operação, esse fato pode ser explicado pelo transporte de baterias na esteira e pela utilização da SLR já está em seu máximo, o que mostra que essa intervenção por

si só, não resultaria em ganhos para a linha. O aumento na capacidade de processamento no posto de trabalho manual, por sua vez mostrou-se eficaz, garantindo um aumento de 28 baterias na capacidade de processamento total, tal melhoria acarretaria na contratação de mais mão de obra, e movimentos nas instalações já existentes na linha. O ganho mais significativo para o sistema foi o de redução de tempo de ciclo do TVZ, com aumento de capacidade de 92 baterias com relação ao processo atual quando considerado cinco segundos a menos em seu tempo de ciclo.

Embora o presente estudo tenha alcançado resultados significativos na identificação e mitigação de gargalos na linha de montagem de baterias pesadas, vale ressaltar que possíveis alterações no processo, quebras recorrentes, e outros fatores externos, inerentes em sistemas complexos, podem ocasionar em um ganho reduzido no volume total produzido, além de inviabilizar a replicação das soluções de forma direta em outros sistemas, com linhas de montagem de outros produtos e com suas características específicas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que a simulação seja aplicada nos pontos iniciais da linha de montagem de baterias pesadas, visando uma melhor redistribuição das atividades entre os operadores. Isso permitiria equilibrar a ocupação dos colaboradores, otimizando o uso da mão de obra e melhorando o desempenho global do sistema.

REFERÊNCIAS

- ANYLOGIC. **AnyLogic: Simulation modeling software tools & solutions for business**. Disponível em: <<https://www.anylogic.com/>>. Acesso em: 18/08/2024.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MOREBITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BARIONI, L.G. et al. **Modelos de tomada de decisão para produtores de ovinos e bovinos de corte**. In: EVERLING, D.M. et al. (Eds.). Modelos para a tomada de decisões na produção de bovinos e ovinos. Santa Maria: UFSM, 2002. p.5-60.
- BECKER, F. **Teoria das restrições aplicada à cadeia de suprimentos do varejo: uma análise com uso de modelo de simulação**. 2016. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/2696>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- BUFFA, E.S.; DYER J.S. **Management science/operations research model formulation and solution methods**. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- CAUCHICK-MIGUEL, P.A. (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- CAVALCANTE, I. M. **Seleção de fornecedores por meio de simulação e machine learning com as ferramentas KNN e LR**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/211702>. Acesso em: 13 de set. 2022.
- COSTAS, José et al. **Aplicação da Teoria das Restrições de Goldratt para reduzir o Efeito Chicote por meio de modelagem baseada em agentes**. Sistemas especialistas com aplicações, v. 42, n. 4, p. 2049-2060, 2015.
- DE LIMA, Henrique Torres; DE CARVALHO, Lucas Guilherme Badona; BARROS, Ana Paula Borba Gonçalves. **Análise de travessias de pedestres em vias arteriais por meio do software Anylogic**. Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de Pesquisa, v. 3, n. 1, 2017.

DE MORAIS KUNZLER, Caroline. A teoria dos sistemas de Niklas Luhmann. **Estudos de sociologia**, v. 9, n. 16, 2004.

DE SOUZA, Wellington Santos. Desenvolvimento de modelos de simulação para análise de desempenho produtivo: Um estudo de caso em uma empresa fabricante de argamassa em São Luís-MA. **e-Revista Facitec**, v. 10, n. 02, 2019.

DIAMOND, R.; HARRELL, C.R.; HENRIKSEN, J.O.; NORDGREN, W.B.; PEGDEN, C.D.; ROHRER, M.W.; WALLER, A.P.; LAW, A.M.. **The current and future status of simulation software (panel)**. Proceedings Of The Winter Simulation Conference, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1633-1640, 14 ago. 2022. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2002.1166445>. Disponível em: <https://ieeexplore.iee.org/document/1166445>. Acesso em: 14 ago. 2022.

DIONIZIO, P. T.; HERCULANI, R. Simulação do software arena para o abastecimento de refrigerantes em uma rede de supermercados no município de bebedouro (SP). **Interface Tecnológica**, v. 16, n. 2, p.101-111. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31510/inf.v16i2.634>. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/634>. Acesso em: 16 de nov. 2021.

DOS SANTOS, Marcos *et al.* **Simulação de eventos discretos na identificação de gargalos no processo seletivo de estagiários de um órgão público federal: uma abordagem sistêmica**. Universitas: Gestão e TI, v. 7, n. 1, 2017.

DOS SANTOS, Marcos. **Simulação da Operação de um Sistema Integrado de Informações para o atendimento pré-hospitalar de emergência no município do Rio de Janeiro**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DOS SANTOS, Mauricio Pereira. Introdução à simulação discreta. Rio de Janeiro: UERJ, 1999.

FAUADI, MHF Md *et al.* Simulação de eventos discretos baseada em agentes - abordagem de dinâmica de sistemas para otimizar o sistema de manufatura com atividades de manutenção. **Jornal de Tecnologia de Manufatura Avançada (JAMT)**, v. 16, n. 2, 2022.

FERNANDES, Laerte José *et al.* **Análise e melhoria do fluxo de processo em área/equipamento gargalo por meio de um modelo de simulação**, 2007.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução a modelagem e simulação de sistemas**. Santa Catarina: Visual Books. 1 ed. 2001.

- GAVIRA, Muriel de Oliveira. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- Greasley, A., e Owen, C. (2018). Modelling people's behaviour using discrete-event simulation: a review. **International Journal of Operations e Production Management**, 38(5): 1228-1244.
- KAMPA, Adriano; GOŁDA, Grzegorz; PAPROCKA, Iwona. Método de simulação de eventos discretos como ferramenta para melhoria de sistemas de manufatura. **Computadores**, v. 6, n. 1, p. 10, 2017.
- LAW, A. M. (2014). **Simulation Modeling and Analysis**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Science.
- LAW, Averill M.; KELTON, W. David. (1991) - **Simulation Modeling and Analysis**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- LEAL, Fabiano et al. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 2003.
- LIEBER, Renato Rocha. **Teoria de sistemas**. Campinas, SP: UNESP, p. 1-23, 2001.
- LOESH, C., HEIN, N. **Pesquisa Operacional. Fundamentos e modelos**. São Paulo: Saraiva, 2009.
- LOVATTO P.A. **Premissas básicas para o desenvolvimento de modelos na agricultura**. In: EVERLING, D.M. et al. (Eds.). Modelos para a tomada de decisões na produção de bovinos e ovinos. Santa Maria: UFSM, 2002. p.9-36
- LUHMANN, N. **O conceito de sociedade**. In: NEVES, C. B. ; SAMIOS, E. M. B.(Org.). Niklas Luhmann: a nova teoria dos sistemas. Porto Alegre: Ed. UFRGS,1997.
- MACHADO, G. M. V., et al. **Estudo de caso de um sistema fotovoltaico instalado no campus da Unicamp em diferentes softwares de simulação**. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020. DOI: <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.858>. Acesso em: 10 dez. 2023

Marconi, M. A. & Lakatos, E. M. (1996). **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração e interpretação de dados.** (3a ed.). São Paulo: Atlas 6.

Mercado de baterias automotivas- **Participação, tamanho e crescimento da indústria.** Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/automotive-battery-market>>. Acesso em: 27 jul. 2024.

MONDEN, Yasuhiro. **Sistema Toyota de Produção: uma abordagem integrada ao just in time.** Bookman editora, 2015.

MOREIRA, C. M. **Estratégias de Reposição de Estoques em Supermercados: Avaliação por meio de simulação.** Dissertação (Mestrado em Eng. Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

O'KANE, J.F.; SPENCELEY, J.R.; TAYLOR, R. **Simulation as an Essential Tool for Advanced Manufacturing Technology Problems.** Journal of Materials Processing Technology, n.107, p. 412-424, 2000.

OLIVEIRA, José Benedito de. **Simulação computacional: análise de um sistema de manufatura em fase de desenvolvimento,** 2007.

PARAGON TECNOLOGIA. **Introdução a simulação com o ARENA.** 1 ed. São Paulo: Paragon tecnologia, 2000.

PEGAS, P. H. **Simulação baseada em agentes para uma cadeia de suprimentos com impressão 3D: Uma análise comparativa utilizando AnyLogic.** 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

PEGDEN,C.D., SHANON, R.E., SADOWSKY R. **Introduction to Simulation Using SIMAN,** McGraw-Hilt New Jersey, 1990.

PEREIRA, Cláudia Daiane; CUNHA, GF da; SILVA, MG da. **A simulação na pesquisa operacional: uma revisão literária.** IX EEPA-Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, Campo Mourão, 2015.

PONTES, Heráclito Lopes Jaguaribe et al. **Identificação e análise do gargalo em uma linha de montagem de componentes automotivos utilizando simulação.** Anais, 2006.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia de trabalho científico: Métodos e técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. Ed. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

ROCKWELL AUTOMATION (org.). Arena Simulation Software. 2022. Disponível em: <https://www.rockwellautomation.com/pt-br/products/software/arenasimulation.html>. Acesso em: 11 ago. 2022.

Rodič, B. (2017). **Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm**. Organizacija, 50 (3): 193-207.

SALAM, Mohammad Asif; KHAN, Sami A. **Simulation based decision support system for optimization: A case of Thai logistics service provider**. Industrial Management & Data Systems, v. 116, n. 2, p. 236-254, 2016.

SALIBY, Eduardo. **SOFTWARES PARA SIMULAÇÃO**. ILOS, 1997. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/software-para-simulacao-2/>. Acesso em: 14 ago. 2022.

SANTOS, B. P., Alberto, A., Lima, T. D. F. M., & Charrua-Santos, F. M. B. (2018). **Industry 4.0: Challenges and Opportunities**. Revista Produção e Desenvolvimento.

SHANNON, R. E. **Introduction to Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 65-73, 1992.

SHANNON, Robert E. **Systems simulation: the art and science**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, [s. n.], 1975.

SILVA, E. L. da.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis, 2005.

SILVA, Ermes Medeiros da et al. **Pesquisa operacional: programação linear: simulação**. 3. ed. São Paulo:Atlas, 2008. 184 p.

SMITH, Jeffrey S. et al. **Simulação de eventos discretos para controle de chão de fábrica**. In: Anais da Conferência de Simulação de Inverno. IEEE, 1994. pág. 962-969.

STRACK, Jair. **GPSS: modelagem e simulação de sistemas**. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

VERMA, Gitesh Kumar; VERMA, Neha. **Integration of Six Sigma and Anylogic Discrete Event Simulation Methodology in Surgical Toolbox Manufacturing: A Case Study**. NEW

ARCH-INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTEMPORARY ARCHITECTURE, v. 8, n. 2, p. 611-617, 2021.

WANG, W. et al. Hybrid modeling and simulation of automotive supply chain network. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, v.6, p.1598- 1605. 2013.

DOI: 10.19026/rjaset.6.3876. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/287378954_Hybrid_Modeling_and_Simulation_of_Automotive_Supply_Chain_Network. Acesso em: 17 nov. 2021.