

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS NA INTRALÓGISTICA AUTOMOTIVA: IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS E OTIMIZAÇÃO DA LINHA DE MONTAGEM DE CHASSIS

DISCRETE EVENT SIMULATION IN AUTOMOTIVE INTRALOGISTICS: IDENTIFYING BOTTLENECKS AND OPTIMIZING THE CHASSIS ASSEMBLY LINE

José Sávio Gonçalves Antunes Pereira*  E-mail: jose.savio@ambipar.com

Marco Túlio Ribeiro Ricci**  E-mail: mtrricci@maxionsc.com

Elias Carlos Aguirre Rodríguez***  E-mail: elias.aguirre@unesp.br

Aneirson Francisco da Silva***  E-mail: aneirson.silva@unesp.br

Fernando Augusto Silva Marins***  E-mail: fernando.marins@unesp.br

*Ambipar Remediation, Indaiatuba, SP, Brasil.

**Maxion Structural Components, Cruzeiro, SP, Brasil.

***Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Guaratinguetá, SP, Brasil.

Resumo: Neste estudo, foi aplicada a Simulação a Eventos Discretos na área de intralogística para abastecer uma linha de montagem de chassis em uma indústria multinacional durante a fase denominada de try-out (ou "fase de testes"). O principal objetivo do estudo foi desenvolver uma ferramenta gerencial que permitisse a identificação antecipada de possíveis gargalos na linha de montagem, que poderiam surgir quando ela fosse implementada em regime de produção. Para isso, o escopo do trabalho foi limitado a simular os tamanhos de lotes de peças que abastecem as células robotizadas de solda dos subconjuntos dos chassis, utilizando dados de uma linha de montagem similar já existente. Na criação da ferramenta gerencial, foi empregada uma técnica de modelagem dedicada a projetos de simulação e um software comercial de simulação. Além disso, o modelo de simulação foi validado por meio de testes estatísticos não paramétricos. Os resultados da simulação demonstraram que o modelo simulado apresenta capacidade de atendimento à linha de montagem, com oportunidades de otimização e melhoria no balanceamento da mão de obra. Essas descobertas geraram sugestões que aprimoram o processo de intralogística, destacando a importância da simulação como uma ferramenta estratégica na indústria automotiva.

Palavras-chave: Simulação de Eventos Discretos. Indústria Automotiva. Balanceamento de Linha. Intralogística.

Abstract: In this study, Discrete Event Simulation was applied to the field of intralogistics to supply a chassis assembly line in a multinational industry during the try-out phase. The main objective was to develop a management tool that would allow the early identification of potential bottlenecks in the assembly line that might arise once it was put into full production. To achieve this, the scope of the work was limited to simulating the batch sizes of parts that supply the robotic welding cells for chassis subassemblies, using data from a similar existing assembly line. The management tool was created using a simulation-specific modeling technique and commercial simulation software. Additionally, the simulation model was validated through non-parametric statistical tests. The simulation results demonstrated that the simulated model could meet the assembly line's demands, with opportunities for optimization and improvements in labor balancing. These findings led to suggestions for enhancing the intralogistics process, highlighting the importance of simulation as a strategic tool in the automotive industry.

Keywords: Discrete Event Simulation. Automotive Industry. Line Balancing. Intralogistics.

1 INTRODUÇÃO

A procura por eficiência nos processos, a otimização das linhas de produção, a eliminação de etapas que não agregam valor e a melhor alocação dos recursos logísticos são práticas comuns em todos os setores industriais (Dias *et al.*, 2019). No entanto, essa busca é particularmente intensa na indústria automotiva, onde a competitividade é extremamente elevada.

De acordo com Jamil e Razali (2016), dois desafios fundamentais no balanceamento de linhas produtivas são: a minimização do tempo de ciclo e da carga de trabalho das estações, sempre respeitando o tempo de ciclo estabelecido, que frequentemente é um item contratual entre montadoras e fornecedores, passível de multas em caso de descumprimento; e a minimização de recursos e custos, mantendo o nível de produtividade.

Sistemas que demandam um elevado grau de modelagem, como os de gerenciamento financeiro, logístico, manufatura, tráfego e transporte, são marcados por sua complexidade, que decorre da variabilidade, da não linearidade das dinâmicas envolvidas e dos múltiplos objetivos que podem ser definidos (Miranda, 2015).

Uma prática bastante comum e eficaz para avaliar diferentes configurações em uma linha de manufatura, com o objetivo de encontrar um arranjo que seja economicamente viável e confiável, é a aplicação de ferramentas de Simulação a Eventos Discretos (DES – *Discrete Event Simulation*) (de Sousa Junior *et al.*, 2019; Raza *et al.*, 2023). Para que essa metodologia seja bem-sucedida, é fundamental garantir que os dados utilizados como entrada sejam precisos e que o modelo seja fiel ao funcionamento real do sistema (Gittins; Mcelwee; Tipi, 2020).

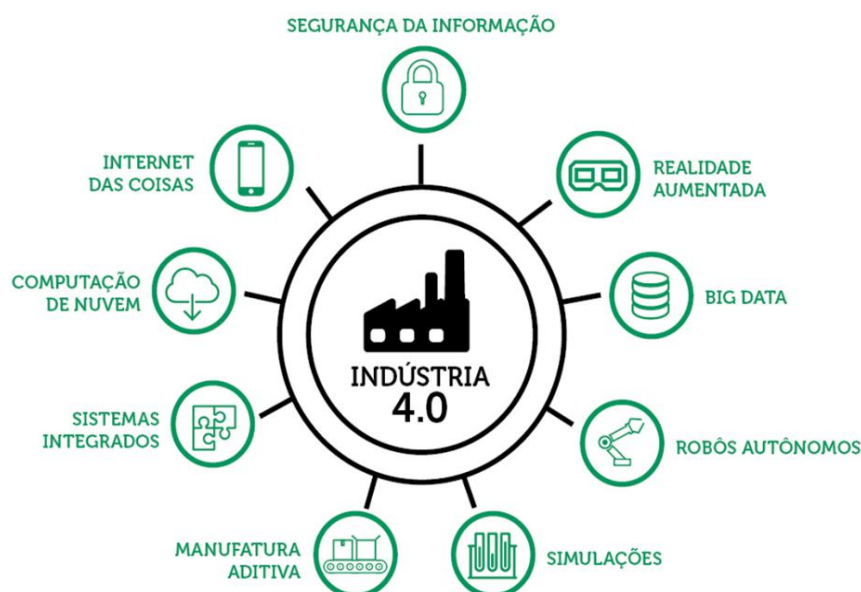
A simulação é uma ferramenta que permite o desenvolvimento de produtos e serviços mais eficientes e aprimorados. Com essa tecnologia, é possível experimentar e ajustar processos, otimizar soluções e selecionar as opções mais econômicas e rápidas, sem incorrer nos custos e no tempo necessários para testar essas alternativas no mundo real (Mourtzis, 2019).

Nesse contexto, a simulação tornou-se uma metodologia essencial, atuando de maneira preventiva e preditiva ao analisar possíveis cenários e antecipar alternativas viáveis (Rabia; Bellabdaoui, 2022). De forma geral, a simulação continua a desempenhar um papel crucial na nova revolução industrial, permitindo prever e

entender aplicações, atividades e produtos sem a necessidade de testes físicos (Mourtzis, 2019; de Paula Ferreira; Armellini; de Santa-Eulalia, 2020). Com a automação de diversas tomadas de decisão, a simulação é fundamental para comparar cenários e gerar os dados necessários para essas análises (Goodall; Sharpe; West, 2019).

A Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, surge como a integração de tecnologias digitais avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, big data e automação, com o objetivo de criar fábricas inteligentes e processos produtivos mais eficientes (Lima; Gomes, 2020; Soori; Arezoo; Dastres, 2023). A Figura 1 ilustra as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, entre as quais se destaca a simulação.

Figura 1 – Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0



Fonte: Endeavor Brasil (2018).

No contexto da Indústria 4.0, a fase de *try-out* em uma linha de montagem se beneficia significativamente do uso da simulação, pois esta permite a realização de testes iniciais para validar e ajustar processos antes da produção em larga escala (Pereira *et al.*, 2019).

Durante o *try-out*, a simulação facilita a identificação e a resolução de problemas operacionais, o que é essencial para garantir a eficiência da linha de produção (Uğraş; Taşan, 2023). Este trabalho busca responder à seguinte questão de Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 4, e-4987, 2024.

pesquisa: é possível, por meio da aplicação de Simulação a Eventos Discretos (DES), melhorar a intralogística de abastecimento de uma linha de montagem de chassis, de modo a alcançar um balanceamento satisfatório ou próximo do ideal?

Dessa forma, o objetivo deste estudo é desenvolver uma ferramenta gerencial baseada na DES para identificar e mitigar gargalos no abastecimento de uma linha de montagem de chassis em fase de *try-out* em uma indústria do setor automotivo. Para isso, o estudo envolve a modelagem do sistema real utilizando técnicas de simulação, a construção de um modelo computacional com o software ProModel®, a validação do modelo com dados coletados na empresa estudada, e a implementação de diferentes alternativas para melhorar o fluxo logístico.

Para fundamentar a importância e a relevância do estudo em questão neste trabalho, realizaram-se algumas das etapas de uma análise bibliométrica com as palavras-chaves relacionadas ao tema abordado, utilizando as bases de dados *Web of Science* (<https://login.webofknowledge.com/>) e *Scopus* (<https://www.scopus.com>). A busca foi refinada para considerar artigos originais e artigos de anais de eventos até 26 de julho de 2023, além de ser baseada em “*All fields*” em *Web of Science* e “*Article title, abstract, keywords*” em *Scopus*.

No Tabela 1 segue a relação das palavras-chave buscadas, as quantidades de documentos encontradas em cada base de dados e a quantidade de documentos únicos depois do processamento de metadados.

Tabela 1 – Resultados de pesquisa na *Web of Science* e *Scopus*

Palavras-chave	<i>Web of Science</i>	<i>Scopus</i>	Documentos únicos
<i>“Discrete event simulation”</i>	8.710	21.833	23.008
<i>“Discrete event simulation” and “Assembly line”</i>	84	182	196
<i>“Discrete event simulation” AND “Lean manufacturing”</i>	48	88	92
<i>“Discrete event simulation” AND “Lean production”</i>	25	85	91
<i>“Discrete event simulation” AND “Production management”</i>	73	43	94
<i>“Discrete event simulation” AND “Assembly line” AND “IDEF-SIM”</i>	0	0	0
<i>“Discrete event simulation” AND “Lean manufacturing” AND “IDEF-SIM”</i>	0	0	0

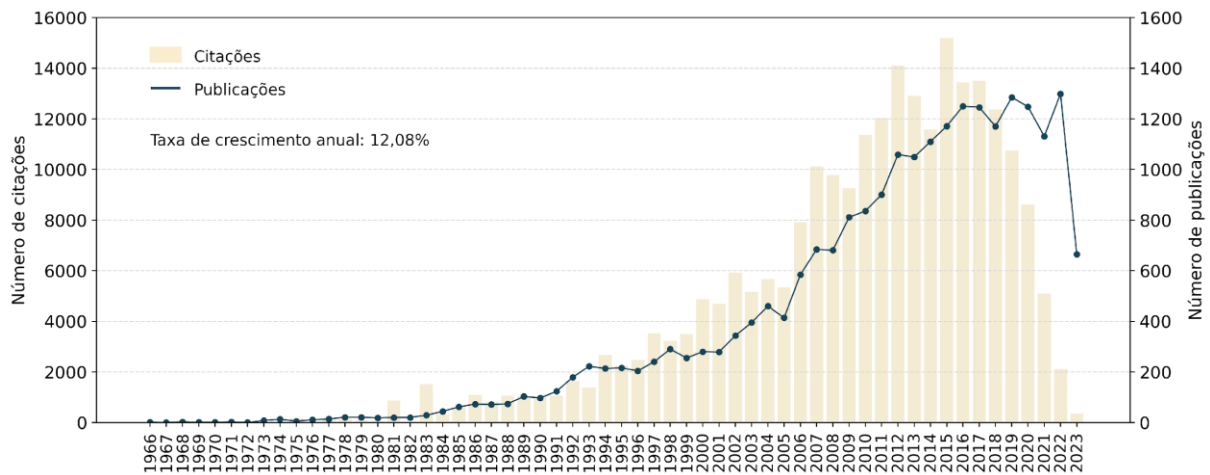
“Discrete event simulation” AND “Lean production” AND “IDEF-SIM”	0	0	0
“Discrete event simulation” AND “Production management” AND “IDEF-SIM”	0	0	0

Fonte: Base de periódicos *Web of Science* e *Scopus*.

Com base no Tabela 1, é possível inferir que este trabalho irá contribuir tanto para o desenvolvimento científico como para a disseminação da técnica de modelagem IDEF-SIM (Leal; Almeida; Montevechi, 2008) e da DES, tendo em vista a ausência de resultados nas bases de dados consultadas.

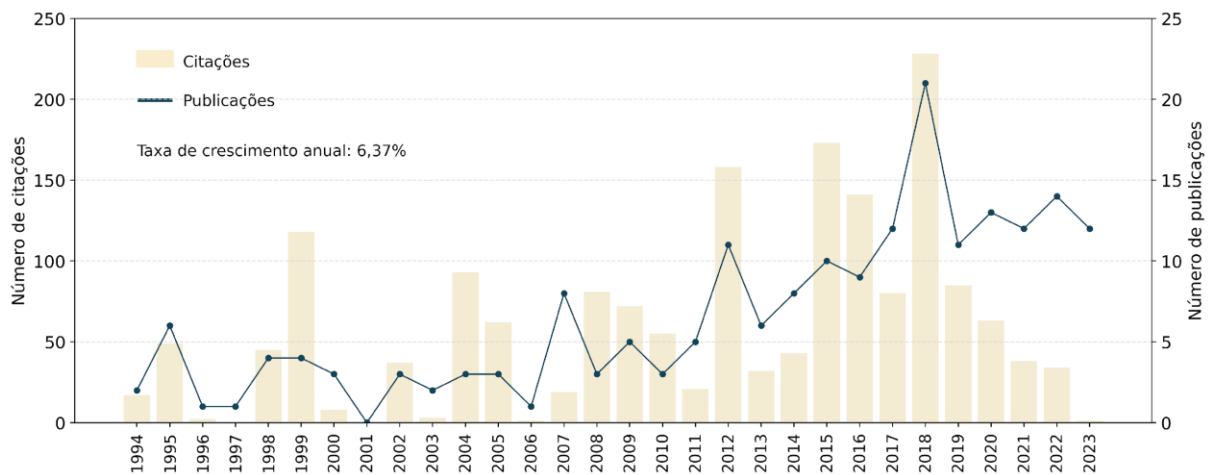
Adicionalmente, a Figura 2 apresenta a tendência crescente do número de publicações nos últimos anos sobre a aplicação de DES, com uma taxa de crescimento anual de 12,08%. O mesmo também pode ser observado nas Figuras 3 e 4, que ilustram a ocorrência de um número crescente de publicações relacionadas à aplicação de DES em Linhas de Montagem, num ambiente de Produção Enxuta e buscando melhorias para o Gerenciamento de Produção.

Figura 2 – Resultados com palavra-chave “Simulação a Eventos Discretos”



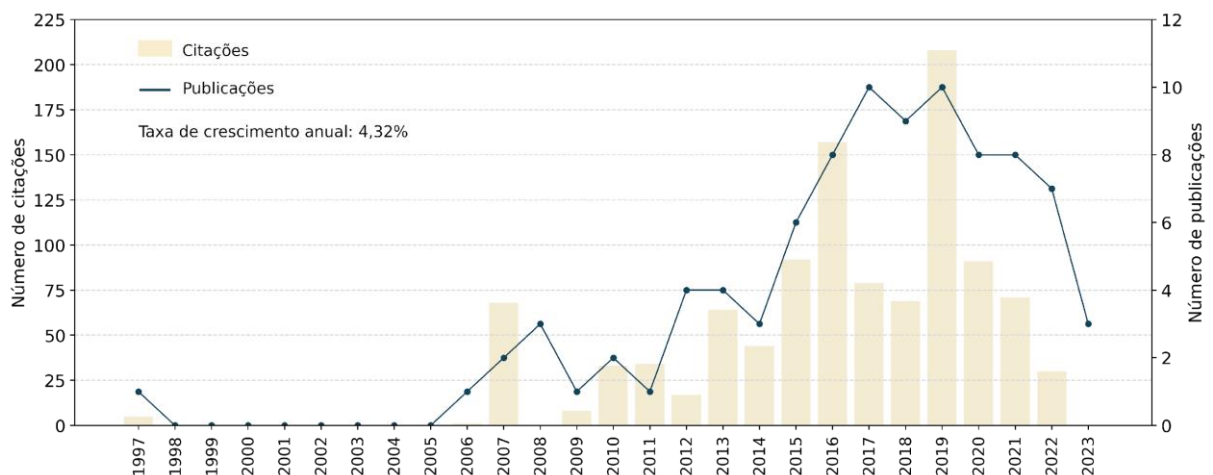
Fonte: Base de periódicos *Web of Science* e *Scopus*.

Figura 3 – Resultados com palavras-chaves “Simulação a Eventos Discretos” e “Linha de Montagem”



Fonte: Base de periódicos *Web of Science* e *Scopus*.

Figura 4 – Resultados com palavras-chaves “Simulação a Eventos Discretos” e “Produção Enxuta”



Fonte: Base de periódicos *Web of Science* e *Scopus*.

O estudo bibliométrico realizado mostrou a crescente relevância do tema no meio acadêmico e científico, e isso é reflexo da sua aplicabilidade:

- Do ponto de vista acadêmico - este trabalho traz uma aplicação interessante da DES em intralogística de linhas de montagem, incluindo o balanceamento desde abastecimento, comparação com uma linha similar existente, por meio do uso de ferramentas da estatística descritiva e a aplicação e difusão do método de modelagem IDEF-SIM.
- Do ponto de vista da empresa estudada - há interesse numa ferramenta gerencial flexível que permita a modelagem e a simulação de sistemas

produtivos. No caso em questão, foi verificar se o arranjo intralogístico proposto era suficiente para atender o *takt-time* da linha de montagem estudada, ou se necessário, identificar os gargalos existentes. Assim, buscou-se a melhoria do arranjo intralogístico, levando em conta um número fixo de operadores logísticos internos, variações na quantidade de viagens (consequentemente intervalo entre elas) que cada um faria e quantidade de peças por viagem.

Este artigo está organizado como se segue. Na Seção 2 apresenta-se o método e a classificação da pesquisa e na Seção 3 estão as técnicas e métodos abordados e utilizados. Na Seção 4 está descrito o problema tratado, mostrando-se a aplicação das técnicas escolhidas em busca da solução e os resultados obtidos. Finalmente na Seção 5, apresenta-se as conclusões e sugestões para a continuidade do trabalho, seguidas das referências bibliográficas utilizadas.

2 MÉTODO E CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho, em um primeiro momento, por meio da técnica de modelagem IDEF-SIM, desenvolveu um modelo referente ao abastecimento de peças estampadas diversas para células de solda robotizadas responsáveis por abastecer, por sua vez, uma linha de montagem de chassis soldados com os seus subconjuntos.

O sistema logístico simulado contemplou três linhas de abastecimento de peças estampadas do estoque intermediário para as células robotizadas, e das células robotizadas, os subconjuntos prontos para a linha de montagem, de modo que a simulação deste modelo utilizando software de DES possibilitasse encontrar um arranjo satisfatório, ou até mesmo ótimo, em relação à eficácia desta pequena cadeia de suprimentos, quanto à frequência e tamanho ideal dos lotes de cada grupo de estampado.

Entende-se pelo melhor arranjo, o que atender o *takt-time* da linha de produção, levando em conta o tempo de ciclo definido das células (valor constante) previamente definido em por contrato uma capacidade definida de chassis/hora, e a minimização de recursos para atender essa solicitação, sendo esses recursos quantidade de viagens por peça, quantidade de operadores para realizar essas viagens e carrinhos de movimentação dedicados.

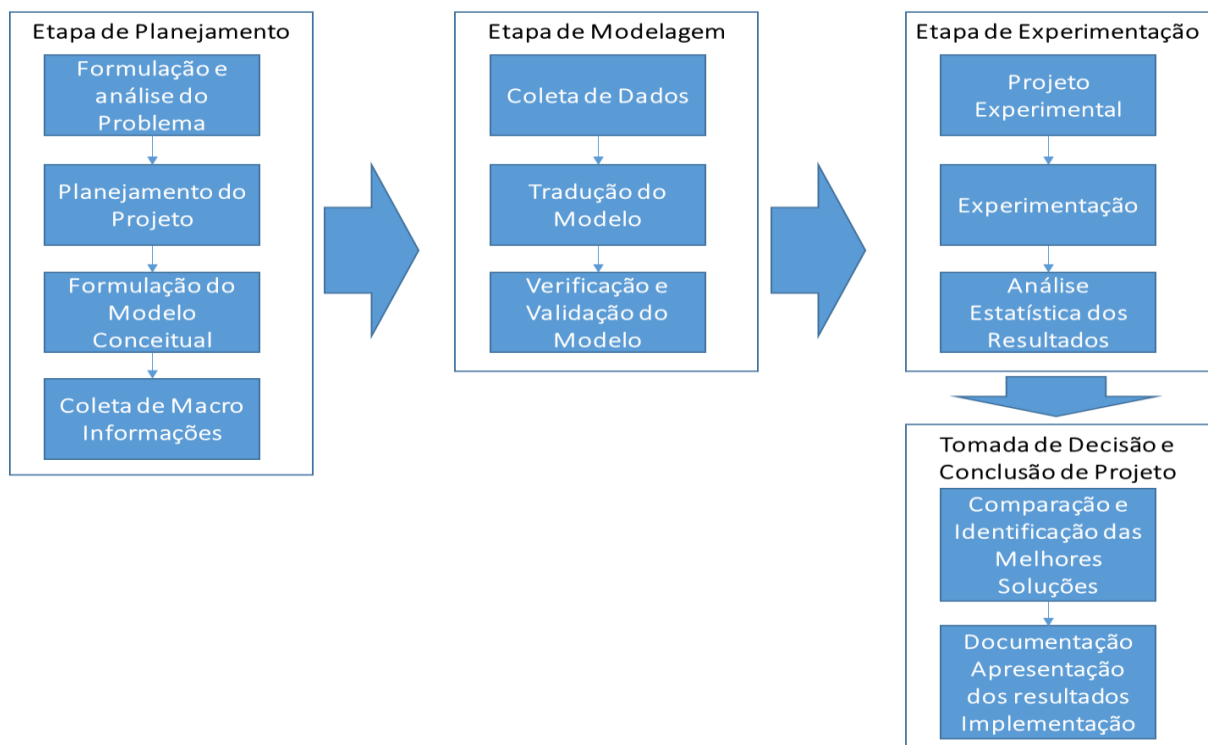
Além de atender o *takt-time* da linha de produção, que é constante nesse projeto, por definição de contrato com o cliente, não podendo ser comprometida a

quantidade de chassis por hora entregues à montadora, sendo esta penalidade passível de multa agressiva, levando em conta que o tempo de ciclo das células de solda robotizadas também é um valor constante de projeto.

Uma solução interessante, seria aquela que, além de atender o *takt-time* da linha de montagem, minimizasse os recursos logísticos pré-estabelecidos, evitando custos desnecessários ou realocando o recurso em excesso para outra atividade gargalo.

A Figura 5 ilustra as etapas adotadas neste trabalho (Filho, 2008), que estão descritas na sequência. O trabalho foi realizado nas seguintes etapas:

Figura 5 – Etapas da Pesquisa

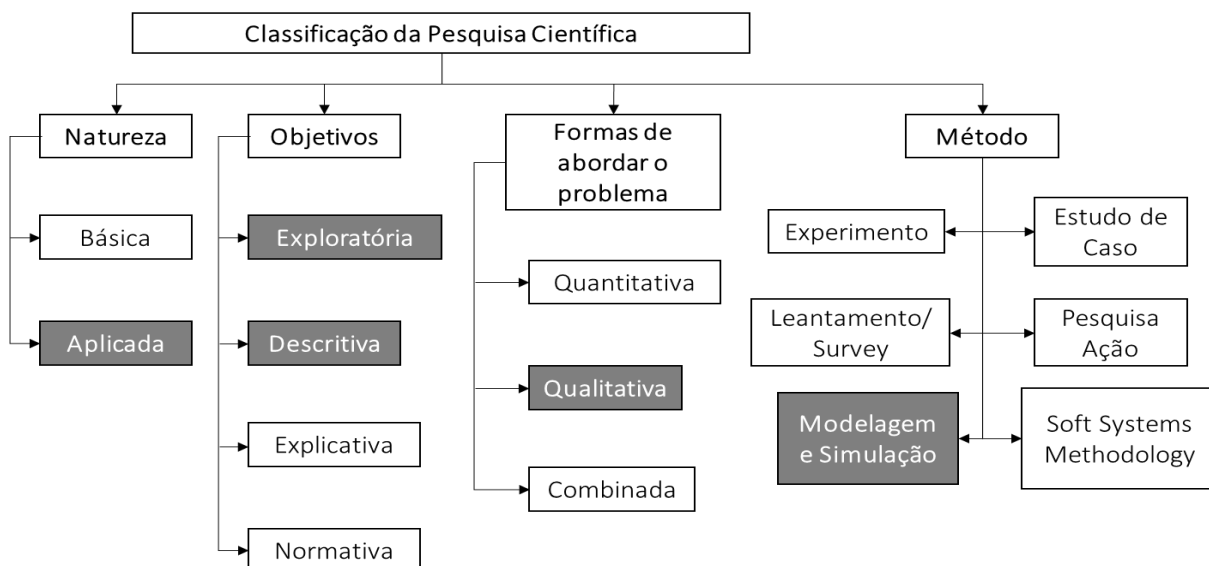


Fonte: Adaptado de Filho (2008).

- Modelagem conceitual da cadeia intralogística estudada (com o IDEF-SIM).
- Realização de reuniões com a equipe de engenharia responsável pelo projeto, para coletar as informações necessárias referentes à linha: equipamentos, produtos fabricados, processos, tempos esperados, *layout* AutoCAD®, e demais informações pertinentes conforme necessidade do trabalho.
- Simular o modelo com o software ProModel®.

A classificação da pesquisa está especificada na Figura 6, seguindo-se a conceituação proposta por Bertrand e Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2018).

Figura 6 – Classificação da pesquisa



Fonte: Adaptado de Bertrand e Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2018).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é feita a apresentação sucinta dos conceitos e técnicas que foram aplicados neste trabalho.

Um conceito importante quando se estuda linhas de montagem é o de Arranjo Físico que, segundo Miqueo, Torralba e Yagüe-Fabra (2020), é a relevância e preocupação com a disposição física dos recursos produtivos (máquinas, equipamentos, material e pessoas).

As opiniões de diversos autores convergem em relação à importância do arranjo físico quando se trata de otimização de tempo, produtividade, recursos e de custos. Vale ressaltar o conceito de que movimentação é um processo que não agrega valor, logo, este deve ser minimizado. O arranjo físico também leva em conta questões ergonômicas e de saúde e segurança para os trabalhadores da operação produtiva em questão.

Segundo Peinado e Graemi (2007), há os seguintes arranjos físicos produtivos: Arranjo por produto ou em linha; Arranjo por processo ou funcional; Arranjo celular;

Arranjo por posição fixa; e Arranjo misto. Destes, o primeiro é o mais utilizado pelas montadoras, o qual também é o arranjo do objeto de estudo deste trabalho.

Em um arranjo produtivo tipo linha de produção, o fluxo de montagens e transformações tem sentido único e não tem caminho alternativo. O produto a ser transformado, montado, ou seja, agregado valor a ele, se move ao longo de estações de trabalho e máquinas de posição fixa, e distribuídas na sequência em que sua operação deve ser realizada, resultando em um arranjo de alta produtividade, mas baixo nível de customização.

As principais vantagens do arranjo em linha de produção, ainda de acordo com Peinado e Graemi (2007) são: possibilidade de grande produtividade; carga máquina e consumo de matéria prima constantes ao longo da linha; fácil previsibilidade, controle e programação de produção. Já as desvantagens principais são: alto investimento inicial; operações repetitivas dos operadores podem gerar tédio, estresse e lesões por esforço repetitivo, quando não há estudo ergonômico eficiente das operações; flexibilidade limitada; fragilidade à paralisações e lentidão devido à gargalos.

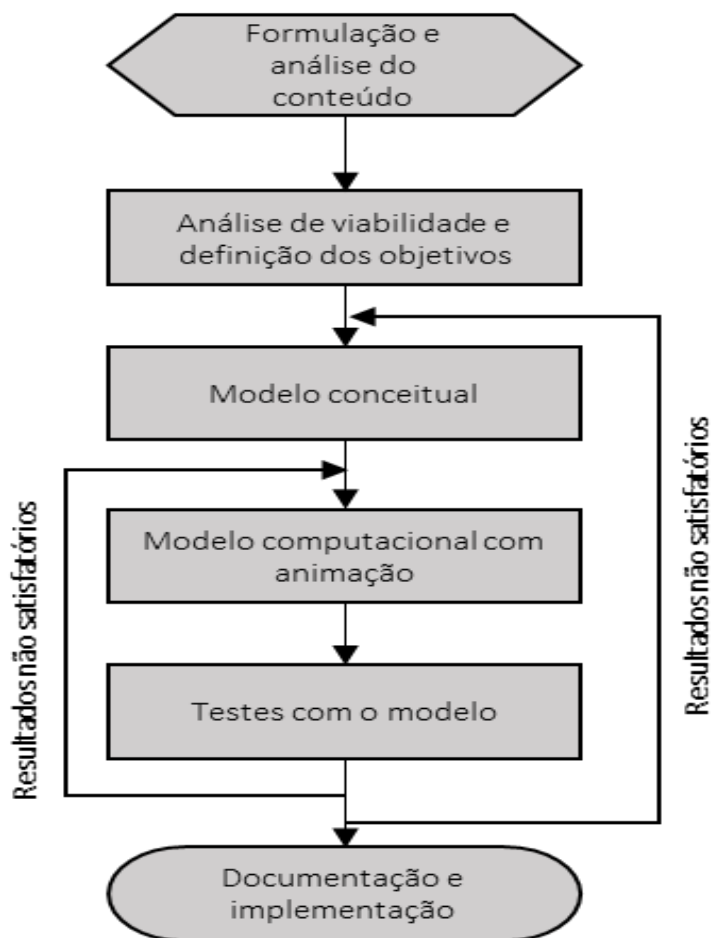
Segundo Moura e Botter (2002), *Milk-Run* é um método de coletas e entregas programadas. Um meio de transporte faz um itinerário fixo pré-definido de coletas e entregas. Ele visa minimizar custos logísticos reduzindo a quantidade de transportes e reduzindo também tamanhos e necessidades de estoques, intermediários. Os fornecedores e clientes desse fluxo devem respeitar os horários e locais pré-definidos para suas entregas e coletas.

Seguem alguns indicadores que, segundo Peinado e Graemi (2007), podem ser utilizados para qualificar uma linha de produção: tempo de ciclo ou *takt-time*, capacidade produtiva, número de estações de trabalho, índice de ociosidade, e grau de utilização.

Observe-se que a Simulação por Eventos Discretos (DES) permite emular sistemas reais visando avaliar o desempenho destes, permitindo apontar falhas e/ou ineficiências e propor melhorias. Ela é uma ferramenta largamente utilizada para propor alterações de cenários, respostas de sistemas existentes a perturbações reais ou hipotéticas, otimização de recursos e tempos em linhas de produção, entre diversas outras aplicações, desde que sejam modelados matematicamente.

Uma abordagem pela DES deve seguir as etapas que estão na Figura 7, de acordo com Banks *et al.* (2010).

Figura 7 – Etapas da abordagem pela DES



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

Na etapa de concepção são coletados e tratados os dados de entrada, sendo estes em sua maioria fenômenos aleatórios, os quais, nestes casos, após tratativas estatísticas e matemáticas são representados pela distribuição probabilística que mais se adequa à cada coleção de dados.

Segundo Chwif e Medina (2014), a validação conceitual busca responder se o desenvolvimento do modelo está fiel ao sistema real ou na direção correta, e se é necessário incluir considerações ou detalhes ou se os já utilizados são suficientes.

Há várias técnicas para validar o modelo de simulação, tais como: desenvolvimento paralelo do modelo por dois times separadamente; comparação com um modelo reduzido ou modelagens passadas; elencar parâmetros de entrada quanto à criticidade, por meio de análise de sensibilidade da variação da saída em função da entrada; e verificação do modelo junto a especialista do processo.

Após a verificação e validação do modelo de simulação serem bem-sucedidas, este pode ser considerado operacional. Vale observar que, as variações de saída são função da aleatoriedade das entradas que variam a cada replicação, assim, é arriscado se concluir algo a partir de uma execução única da simulação. Quanto mais replicações se realizar, menor a chance de um erro na saída, e maior a convergência dos resultados para uma distribuição conhecida.

Segundo Miranda (2015), a simulação possui vantagens e desvantagens, tais como:

- Vantagens - definições de layouts, projetos de equipamentos e sistemas de transportes podem ser testados, sem a necessidade de recursos ou compra de equipamentos; permite visualizar as interações entre variáveis e a importância de seus efeitos para o sistema como um todo; gargalos produtivos podem ser identificados e analisados; permite responder questões do tipo “*What if*”, o que é útil na proposição de novos sistemas.
- Desvantagens - a modelagem computacional de um sistema real, geralmente é cara e consome tempo para ser desenvolvida; os resultados da simulação podem ser difíceis de serem interpretados, principalmente devido a seu caráter estocástico; há a necessidade de validar o modelo computacional.

Pode-se entender como Gestão de Processos o conjunto de métodos desenvolvidos para entender uma organização baseado em seus processos centrais, sistematizar a análise e o delineamento, otimizar processos e seu gerenciamento. Ainda explorando o conceito de processo, este pode ser considerado como um integrador de pessoas, métodos e ferramentas na execução de uma sequência de ações, com o intuito definido de tornar entradas específicas em saídas específicas (Farooqui *et al.*, 2019).

O mapeamento de processos é o principal recurso para o gerenciamento por processos, que consiste em diagramar um processo graficamente, dividindo-o em atividades representadas no diagrama na ordem em que ocorrem (Bueno, 2020). Essa representação deve conter os detalhes do processo de maneira controlada e gradual, e com foco nas interfaces do processo.

Com o mapeamento dos processos de maneira padronizada, pode-se: ajudar a entender não somente o processo isoladamente, mas o fluxo; ajudar a identificar mais do que as perdas, as fontes de perda; fornecer uma linguagem comum para









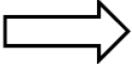
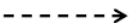
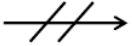


tratar os processos; tomar decisões do fluxo visível de forma que possam ser discutidos por todos; unificar conceitos e técnicas enxutas; formar a base de um plano de implementação; e descrever como a cadeia produtiva deve operar.

Existem várias técnicas para mapeamento de processos (Valle; Oliveira, 2012), como, por exemplo, o Fluxograma (*Flowchart*), BPMN (*Business Process Modeling Notation*), UML (*Unified Modeling Language*), EPC (*Event-Driven Process Chain*), e IDEF (*Integrated DEFinition*).

Aqui adotou-se a técnica de modelagem IDEF-SIM, proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008), que é baseada nas técnicas IDEF0, IDEF3 e BPM, e tem seus elementos importantes dispostos no Quadro 1. Ela tem como característica relevante a identidade lógica de aplicação, com propósito de ser utilizada para modelar sistemas a serem simulados. Além disso, foram acrescentadas as descrições para cada uma das funções dos elementos descritos no Quadro 1, segundo Mendonca, Montevechi e Miranda (2013).

A IDEF-SIM possui dentre suas principais vantagens: diminuição no tempo de modelagem computacional, auxiliar na etapa validação do modelo conceitual facilitando o entendimento do modelo por parte dos especialistas e facilitando o diálogo especialista – programador, facilitar o registro e documentação dos projetos de simulação, sem se ater a nenhuma linguagem de programação específica, permitindo maior entendimento por parte de outros leitores do projeto.

Quadro 1 – Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM

Elementos	Simbologia	Técnica de origem	Descrição
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)	Itens a serem processados pelo sistema, representando matéria-prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros.
Funções		IDEF0	Locais na qual a entidade sofrerá alguma ação. Entendem-se como funções os postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques e postos de atendimento.
Fluxo de Entidade		IDEF0 e IDEF3	Direcionamento da entidade dentro do modelo.
Recursos			Elementos utilizados para movimentar as entidades e executar as funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos.
Controles		IDEF0	Regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros.
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 Regra E	IDEF3	Estas regras são chamadas de junções, na técnica IDEF3.
	 Regra OU		
	 Regra E/OU		
Movimentação		Fluxograma	Deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo.
Informação Explicativa		IDEF0 e IDEF3	Utilizada para inserir uma explicação no modelo, com o objetivo de facilitar o entendimento do modelo.
Fluxo de entrada no sistema modelado			Define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo.
Ponto final do sistema			Define o final de um caminho dentro do fluxo modelado. Tudo o que se encontra além deste ponto está fora dos limites do modelo.
Conexão com outra figura			Utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

Fonte: Adaptado de Leal, Almeida e Montevechi (2008).

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM

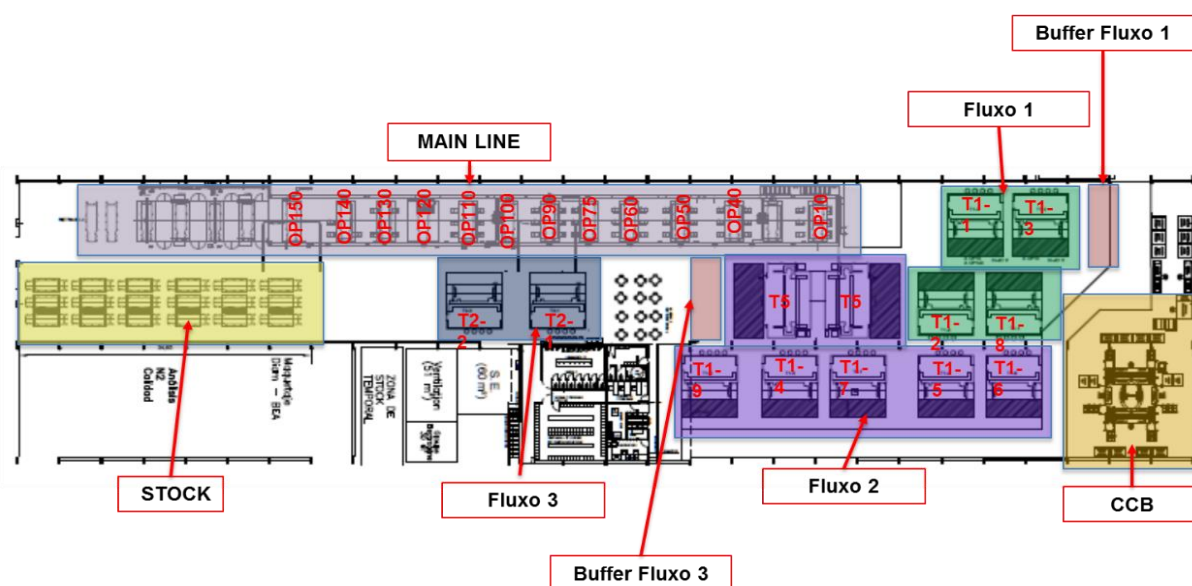
A empresa objeto de estudo faz parte de um grupo que atua na fabricação de rodas rodoviárias e agrícolas, componentes estruturais, sendo o objeto de estudo deste trabalho, e equipamentos ferroviários. Assim, apresenta-se neste artigo a análise de uma linha de montagem de chassis de *pick-ups*, que recebe peças estampadas vindas das unidades fabris do Brasil e da Argentina. Descreve-se na sequência as características do problema a ser tratado.

O arranjo intralogístico estudado consiste no abastecimento de uma linha de montagem de chassis, a qual é abastecida por vários componentes (ou peças estampadas), estes por sua vez, são oriundos das células de solda de subconjuntos (identificadas como T's nos modelos) e divididos em três tipos: longarinas, travessas e suportes.

Há também pequenas peças as quais estão espalhadas entre as células. As peças estampadas vêm de um estoque central que não é objeto de estudo deste trabalho, mas a partir dele se inicia a rota logística estudada. Logo, o estoque central delimita a fronteira de entrada do sistema a ser estudado. A fronteira de saída é a própria linha de montagem, que possui um *takt-time* pré-definido em contrato. O objetivo desse arranjo intralogístico é atender esse *takt-time* sem riscos de parada de linha ou desperdício e/ou ociosidade de recursos logísticos.

Há um total de 13 células robotizadas nas quais as peças estampadas sofrem transformação por solda robotizada MIG, e depois vão para a linha de montagem. Há um total de 238 diferentes peças estampadas, que são os inputs dos processos de solda robotizada, e 49 subconjuntos, que são os outputs do processo de solda robotizada. A um caso em que o input da célula de solda robotizada é o output de uma outra célula robotizada. As peças se movimentam ao longo do processo segundo três rotas logísticas, conforme a Figura 8, e descritas sucintamente na sequência.

Figura 8 – Planta baixa da linha de montagem e identificação dos objetos relevantes

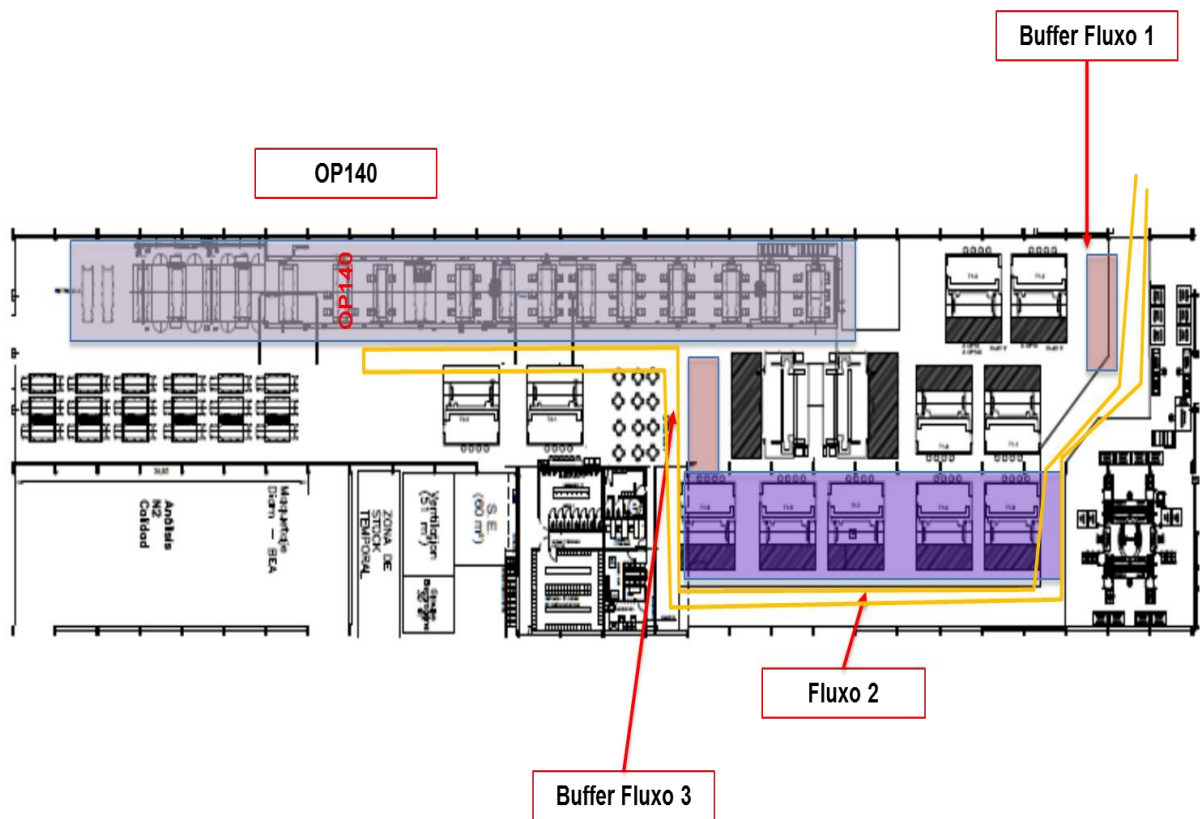


Fonte: Empresa estudada.

Descrição das rotas logísticas a serem simuladas:

- Rota Logística 1, ou Fluxo Principal (ver Figura 9), que diz respeito a um comboio ou *milk-run* de carrinhos com as peças estampadas e subconjuntos. O percurso inicia-se no estoque central, abastece o *buffer* do Fluxo1, depois abastece o Fluxo 2, retira subconjuntos do fluxo 2, abastece o *buffer* do fluxo 3, entrega os subconjuntos do fluxo 2 na linha de montagem, na operação OP140 e retorna para o estoque central.

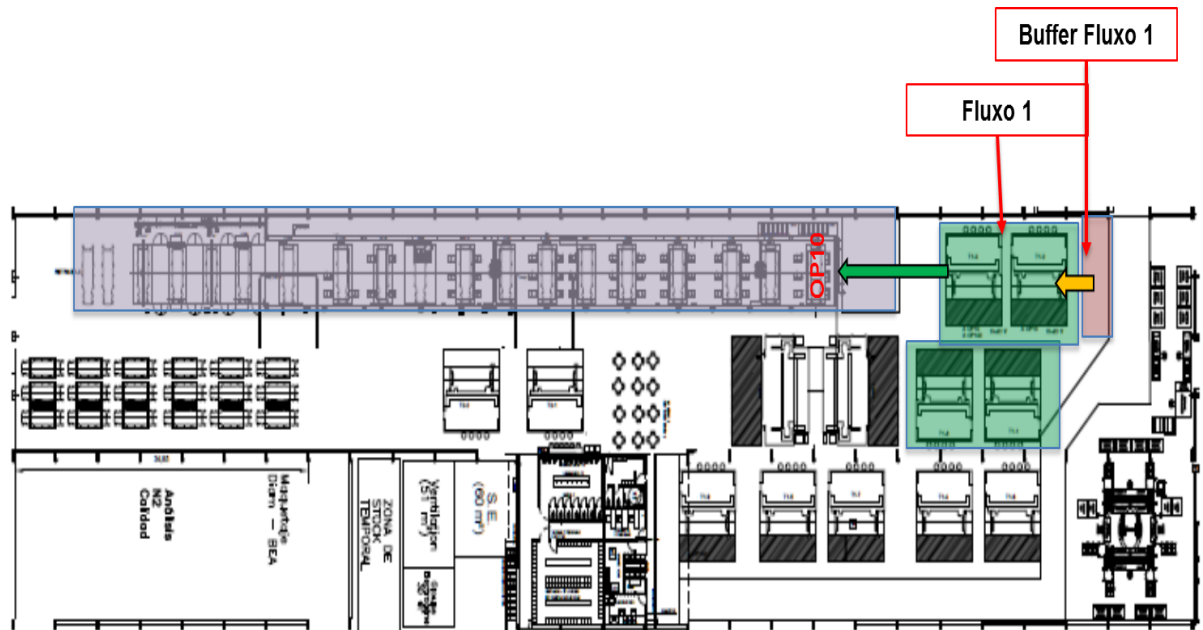
Figura 9 – Trajeto realizado pela Rota Logística 1 - Fluxo Principal



Fonte: Empresa estudada.

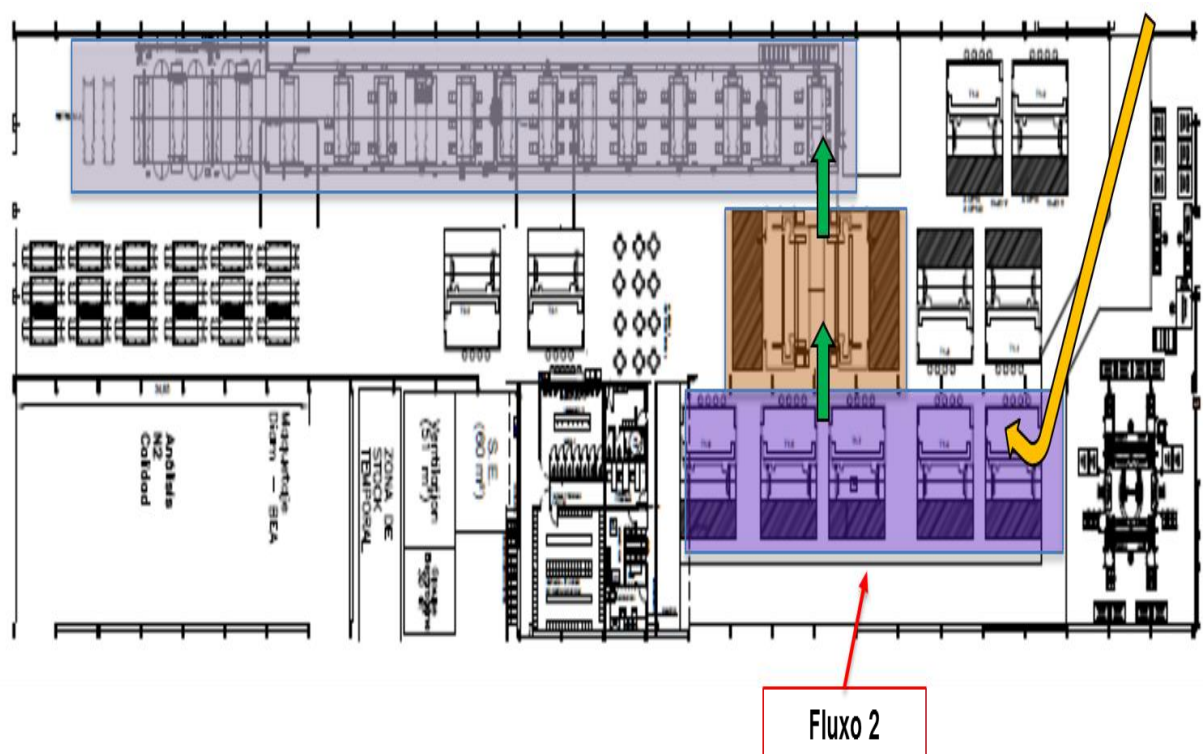
- Rota Logística 2, ou Fluxo 1 (ver Figura 10). O percurso inicia-se com a retirada de peças do *buffer* do Fluxo 1, transforma as peças estampadas em subconjuntos nas células T1_1, T1_2, T1_3 e T1_8, e abastece a linha de montagem na operação OP10.

Figura 10 – Trajeto realizado pela Rota Logística 2



Fonte: Empresa estudada.

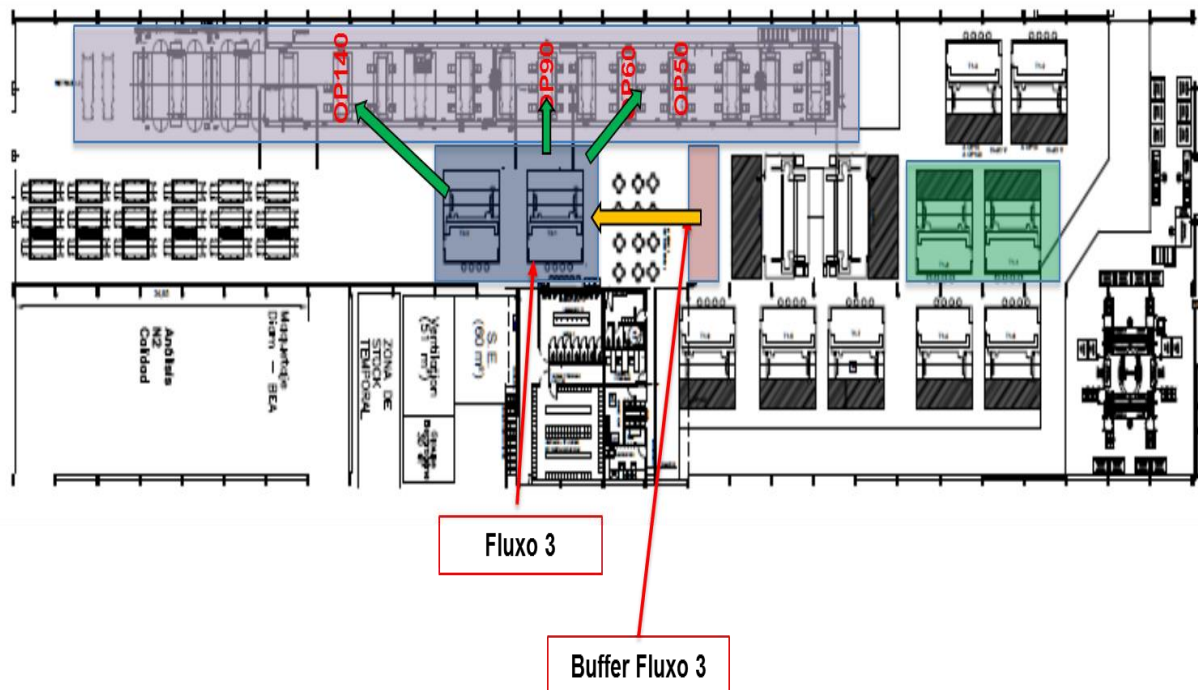
Figura 11 – Trajeto realizado pela Rota Logística 3



Fonte: Empresa estudada.

- Rota Logística 3 ou Fluxo 2 (ver Figura 11). Inicia-se recebendo peças estampadas da Rota Principal, transforma essas peças estampadas em subconjuntos nas células T1_4, T1_5, T1_6, T1_7 e T1_9, que abastecem diretamente as células T5. As células T5 recebem subconjuntos e abastecem a linha de montagem na OP10 com subconjuntos.
- Rota Logística 4, ou Fluxo 3 (ver Figura 12). Inicia-se retirando peças do *buffer* do Fluxo 3, transforma as peças nas células T2_1 e T2_2 e abastece a linha de montagem nas OP's 50, 60, 90 e 140.

Figura 12 – Trajeto realizado pela Rota Logística 4



Fonte: Empresa estudada.

As movimentações entre os fluxos (*milk-run*) são realizadas por meio de carrinhos de movimentação no Fluxo Principal, e por carrinhos talhas e varais inclinados nos fluxos menores (Fluxo 1, Fluxo 2 e Fluxo 3). Este conjunto de operações intralogísticas é executado por dois operadores, chamados Oper1 e Oper2, e as movimentações de desabastecimento das células que ficam próximas à linha de montagem são realizadas pelos próprios soldadores dos dispositivos, que vão pegando os subconjuntos prontos conforme necessidade.

O *milk-run* inicia seu trajeto a cada 1h e todos os outros fluxos estão vinculados ao tempo de ciclo das células e capacidades dos transportes. A Tabela 2 resume os

ciclos de operação das células robotizadas, com tempo de ciclo, origem dos inputs e destino dos outputs, tipos de peças com que trabalham e qual operador faz essas movimentações.

Tabela 2 – Descrição esquemática dos fluxos logísticos

Rota logística	Célula	Tempo Ciclo [s]	Ciclos para transporte	Operador	PEÇAS	RECEBE DE	ENTREGA PARA
fluxo 1	T1_1	171,64	18	OPER1	TRAVESSAS + PEÇAS PEQUENAS	BUFFER FLUXO 1	OP10
	T1_2	173,26	18				OP10
	T1_3	179,22	36				OP10, OP50, OP140, T5LE e T5LD
	T1_8	170,57	18				OP10
fluxo 2	T1_9	175,31	18	OPER2	LONGARINAS + PEÇAS PEQUENAS	FLUXO PRINCIPAL	T1_5
	T1_5	170,82	18			T1_9 e T1_7	T5_LE
	T1_7	170,17	36			FLUXO PRINCIPAL	T1_5 e T1_4
	T1_4	140,54	18			T1_6 e T1_4	T5_LD
	T1_6	175,31	18			FLUXO PRINCIPAL	T1_4
	T5 LE	170	18			T1_4, T1_5 e T1_6	OP10
	T5 LD	170	180				OP10
fluxo 3	T2_1	183,13	36	OPER1	SUPORTES + PEÇAS PEQUENAS	BUFFER FLUXO3	OP5, OP50, OP60 e OP90
	T2_2	179,59	36				OP50, OP60 e OP90

Fonte: Empresa estudada.

Para o desenvolvimento do modelo conceitual do sistema a ser simulado pelo IDEF-SIM, foram adotadas algumas premissas e abstrações, para facilitar a criação do modelo computacional. São elas:

- Modelos orientados aos objetos, no caso, às entidades, sendo cada linha do modelo referente a um tipo de entidade final (Travessas, Longarinas e Suportes). Os diferentes tipos de entidades não se combinam ou interagem, exceto na linha final de montagem, que está além da fronteira do objeto de estudo.
- Modelo inicial sem restrições, que foram definidas e incluídas após entendimento junto à equipe da empresa, em função do modelo teórico de dimensionamento da linha.

- Utilizou-se como recurso a função “espera”, que indica que para aquela entidade não há ação relevante, mas o operador responsável pela próxima ação está realizando atividade relevante a outra entidade. Isto foi necessário devido ao transporte de entidades diferentes no mesmo carrinho.
- Agrupamento das peças do mesmo tipo dentro da entidade, tomando, ao se incluir as restrições, o tempo de célula robotizada mais longo para cada entidade, ou seja, para o Fluxo 1, de travessas, adotou-se o tempo da célula robotizada T1_3, de 179,22s (vide Tabela 2), para o Fluxo 2, de longarinas, adotou-se o tempo da célula T1_9, que envia para a célula T1_5 e depois T5LE ou T5LD, que têm o mesmo tempo de ciclo.
- As operações de colocação e retirada de peças das células robotizadas, operações realizadas pelos operadores das células já estão inclusas no tempo de ciclo das células, e foram adicionadas ao modelo juntamente com as outras restrições, não sendo necessária a criação de função específica para esta atividade.

No Quadro 2 estão as descrições dos objetos presentes no modelo conceitual e o papel de cada um deles no processo. O modelo conceitual desenvolvido pode ser visto na Figura 13.

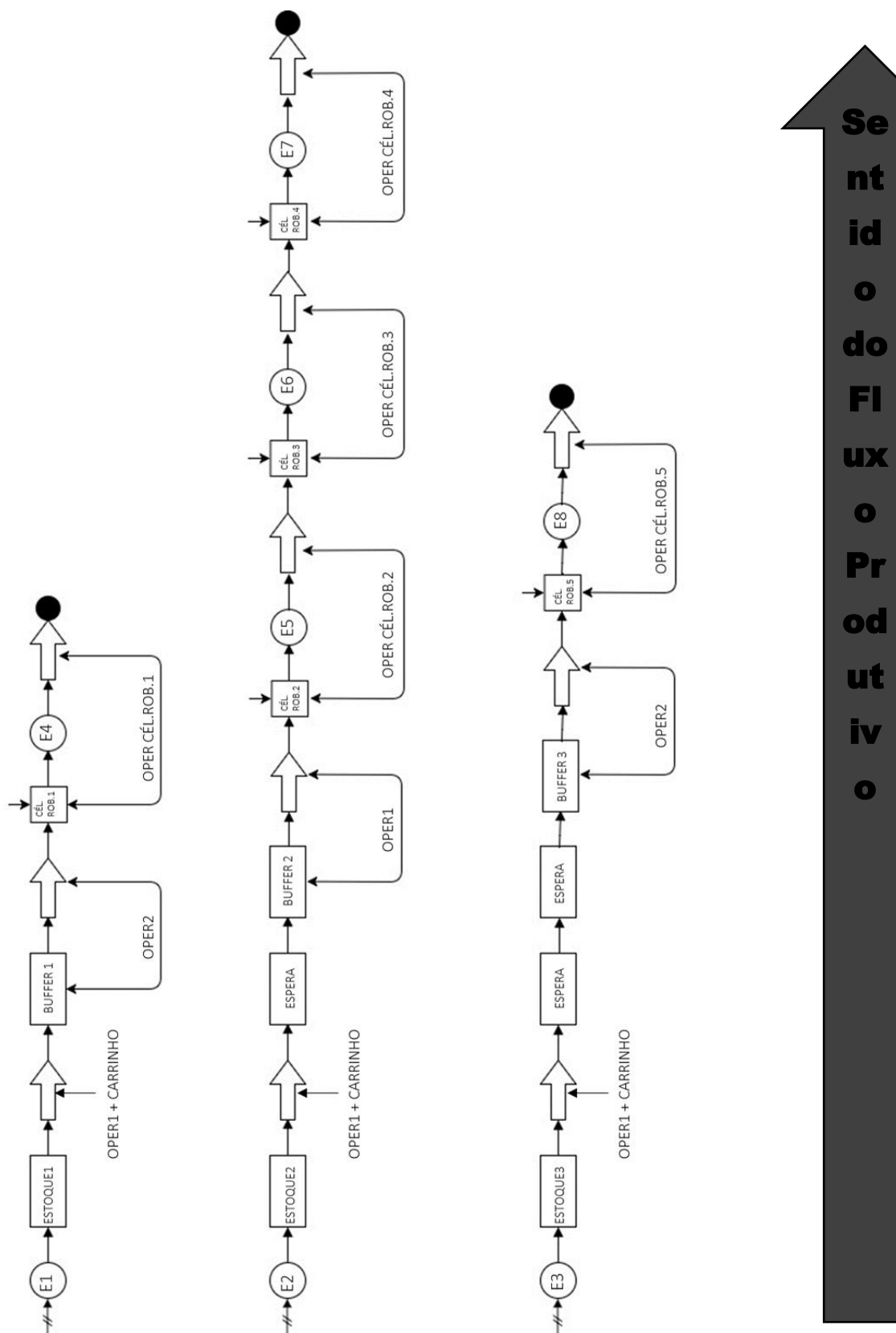
Quadro 2 – Descrição dos objetos presentes no modelo conceitual desenvolvido

TAG/NOME	TIPO	DESCRIÇÃO
E1	Entidade	Estampados tipo travessa oriundos do estoque
E2	Entidade	Estampados tipo longarina oriundos do estoque
E3	Entidade	Estampados tipo suporte oriundos do estoque
E4	Entidade	Entidade tipo Subconjunto Travessa oriundo da célula robotizada de solda de Travessas
E5	Entidade	Entidade tipo Subconjunto Longarina + Reforço (parte frontal ou traseira, LD ou LE) oriundo da célula robotizada de solda de Longarinas
E6	Entidade	Entidade tipo Subconjunto Longarina (parte frontal ou traseira, LD ou LE) oriundo da célula robotizada de solda de Longarinas
E7	Entidade	Entidade tipo Subconjunto Longarina LD ou LE, oriundo da célula robotizada de solda de Longarinas
E8	Entidade	Entidade tipo Subconjunto Suporte, oriundo da célula robotizada de solda de Suportes
ESTOQUE1	Função	Estoque Central de estampados tipo Travessa
ESTOQUE2	Função	Estoque Central de estampados tipo Longarinas

ESTOQUE3	Função	Estoque Central de estampados tipo Suportes
BUFFER1	Função	Estoque intermediário de peças estampadas tipo Travessa
BUFFER2	Função	Estoque intermediário de peças tipo Longarinas
BUFFER3	Função	Estoque intermediário de peças tipo Suportes
ESPERA	Função	Função utilizada para que o fluxo de uma entidade aguarde o descarregamento de outra entidade que não interage diretamente com o primeiro fluxo citado
CÉL.ROB1	Função	Célula robotizada responsável por transformar a entidade peças estampadas tipo travessa em subconjuntos tipo travessa
CÉL.ROB2	Função	Célula robotizada responsável por transformar a entidade peças estampadas tipo longarina em subconjuntos tipo longarina com reforço
CÉL.ROB3	Função	Célula robotizada responsável por transformar a entidade subconjuntos tipo longarina com reforço em subconjuntos tipo longarina dianteira ou traseira LE ou LD
CÉL.ROB4	Função	Célula robotizada responsável por transformar a entidade subconjuntos tipo longarina dianteira ou traseira LD ou LE em subconjuntos tipo longarina LD ou LE
CÉL.ROB5	Função	Célula robotizada responsável por transformar a entidade peças estampadas tipo suporte em subconjuntos tipo suporte
OPER1	Recurso	Operador Logístico responsável por realizar a movimentação do comboio principal
OPER2	Recurso	Operador Logístico responsável por realizar a movimentação buffer 1 para células de travessa
OPER3	Recurso	Operador Logístico responsável por realizar a movimentação do buffer 3 para células de suportes
OPER CÉL.ROB1	Recurso	Operador que abastece, aciona e retira as peças da célula robotizada 1
OPER CÉL.ROB2	Recurso	Operador que abastece, aciona e retira as peças da célula robotizada 2
OPER CÉL.ROB3	Recurso	Operador que abastece, aciona e retira as peças da célula robotizada 3
OPER CÉL.ROB4	Recurso	Operador que abastece, aciona e retira as peças da célula robotizada 4
OPER CÉL.ROB5	Recurso	Operador que abastece, aciona e retira as peças da célula robotizada 5

Fonte: Empresa estudada.

Figura 13 – Modelo Conceitual IDEF-SIM do Objeto de Estudo



Fonte: Empresa estudada.

Passa-se a descrever os passos para a aplicação da DES a partir do modelo conceitual já apresentado na Figura 13:

Coleta e Tratamento de Dados de Entrada - Foi utilizada, como cenário para a simulação a própria planta da linha em escala, extraída do projeto em formato dwg, conforme pode ser visto nas Figuras 14 e 15.

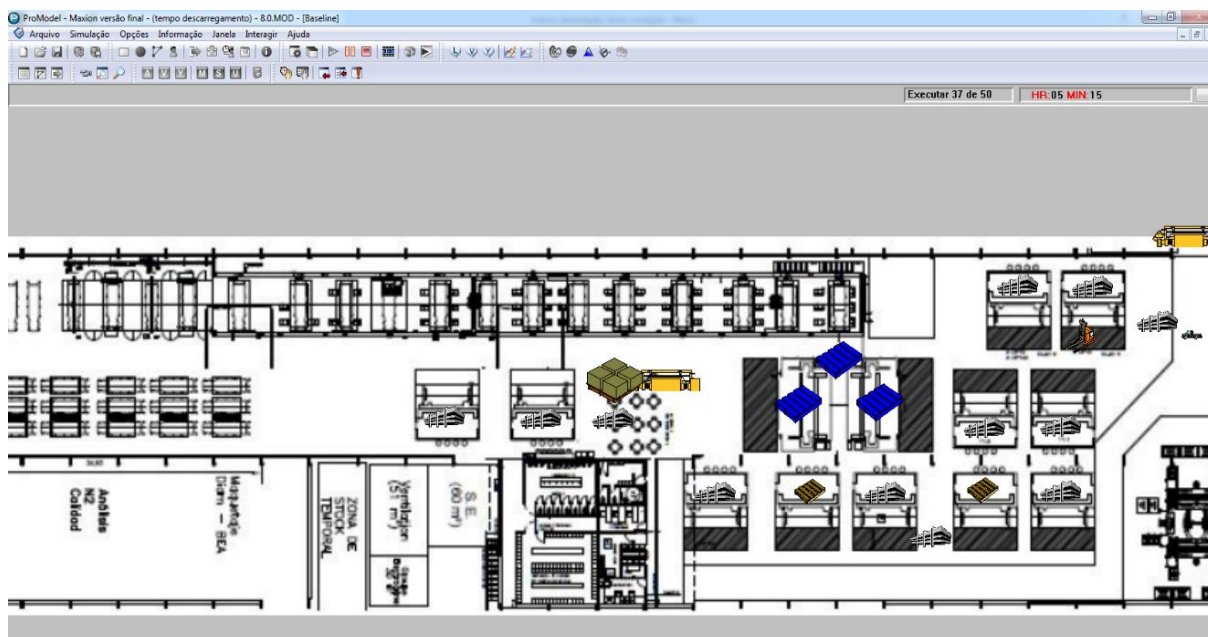
Figura 14 – Configurações básicas da rodada simulada

The image shows a software dialog box titled "Opções de Simulação". It contains the following elements:

- Resultados:** A text field containing "c:\users\dell\documents\promodel\output" and a "Pesquisar..." button.
- Nome de Execução:** A text field containing "Baseline".
- Período da Simulação:** Radio buttons for "Tempo", "Semanal" (selected), and "Calendário". A checked checkbox for "Período de Aquecimento". Three buttons: "Início do Aquec." (Wk 1, Mon @ 08:00 AM), "Início da Sim." (Wk 1, Wed @ 08:00 AM), and "Término da Sim." (Wk 3, Mon @ 08:00 AM).
- Precisão do Relógio:** A dropdown menu set to "0.001" and radio buttons for "Segundo", "Minuto" (selected), "Hora", and "Dia".
- Reportando Resultados:** Radio buttons for "Padrão" (selected), "Batelada Média", and "Periódico". Fields for "Tamanho do Intervalo:" and "Número de Replicações:" (set to 10).
- Desabilitar:** Checkboxes for "Animação", "Custos", "Exportação de Matriz", and "Série de Tempo" (all unchecked).
- No Início:** Checkboxes for "Pausar" (checked), "Rastrear", and "Mostrar Anotações do Modelo" (unchecked).
- Geral:** Checkboxes for "Ajustar para Horário de Verão", "Gerar Script de Animação", "Números Aleatórios Comuns", "Pular paradas de recursos caso fora de turno" (checked), and "Recompilar Redes" (unchecked).
- Visualização dos Resultados:** Checkboxes for "Output Viewer 4.0" (checked) and "Minitab" (unchecked).
- Buttons at the bottom: "Executar", "OK" (highlighted), "Cancelar", and "Ajuda".

Fonte: Empresa estudada.

Figura 15 – Execução da simulação



Fonte: Empresa estudada.

Para simular os tempos de movimentação, abastecimento e desabastecimento dos dois operadores logísticos do sistema, foram utilizados dois métodos:

- Operador 1 - Foi utilizado um estudo de tempos e métodos padronizados encomendado pela empresa estudada e as distâncias da planta original para calcular os tempos de movimentação em cada trecho, e também o tempo de abastecimento e desabastecimento.

Aplicou-se uma distribuição triangular de $\pm 20\%$ para cada um dos trechos, em função das variações corriqueiras de velocidades inerentes a um processo executado por pessoas e não máquinas, porcentagem considerada coerente pela empresa realizadora do estudo de tempos e métodos, de modo a aumentar a variabilidade entre as replicações, e assim, a fidelidade do modelo.

Esta variação de $\pm 20\%$, que a princípio é pertinente por trecho, se torna um range alto no trajeto total, o que pode ter um resultado interessante quando se quer trabalhar com garantia de atendimento, e não com ajuste fino de algum processo.

- Operador 2 – Utilizou-se o mesmo estudo de tempos e métodos, porém para inferir uma velocidade média de movimentação, e os dados de entrada foram definidos em metros, utilizando-se também a planta original do

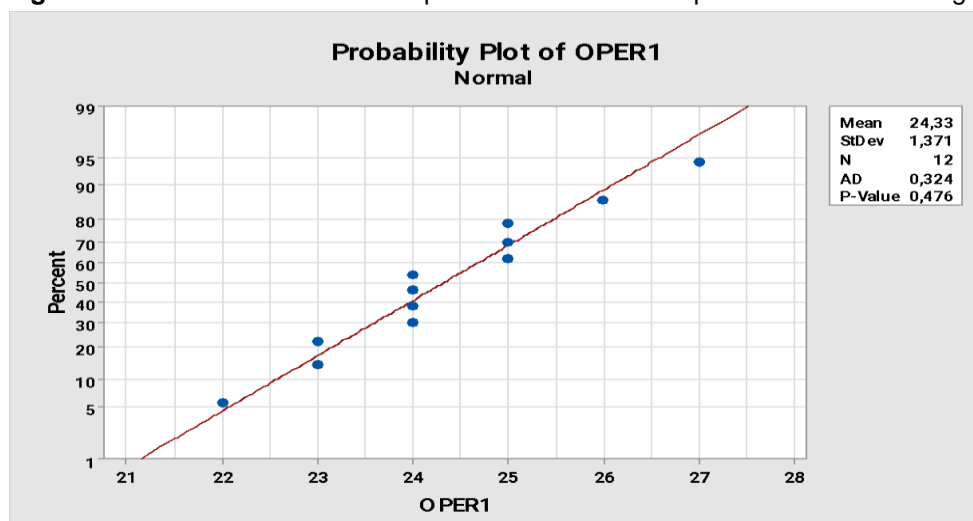
projeto. Como as distâncias não variam ao longo do tempo, neste caso não foi aplicada nenhuma distribuição aos dados de entrada.

Observe-se que os tempos de desabastecimento da célula para a linha são absorvidos pelo tempo de ciclo da célula, devido à proximidade, e não foram simulados, apenas o tempo de ciclo de cada célula, os quais são constantes e aos quais também não se aplicam qualquer tipo de distribuição. As quantidades de peças contidas em cada kit para a simulação foram definidas em função do máximo *takt-time* da linha, e que é o que se entende praticável à cada ciclo de movimentações, e é a quantidade de peças suficientes para montar 18 chassis por hora.

Validação dos Dados de Entrada - Foram realizadas 12 coletas válidas de tempo total de rota do Operador Logístico1. Tais coletas foram realizadas por colaboradores da linha de montagem. Foram expurgados tempos onde ocorreram eventos especiais (outliers) como paradas para reunião de time por exemplo, uma vez que a quantidade de amostras é pequena e um outlier poderia comprometer toda a distribuição.

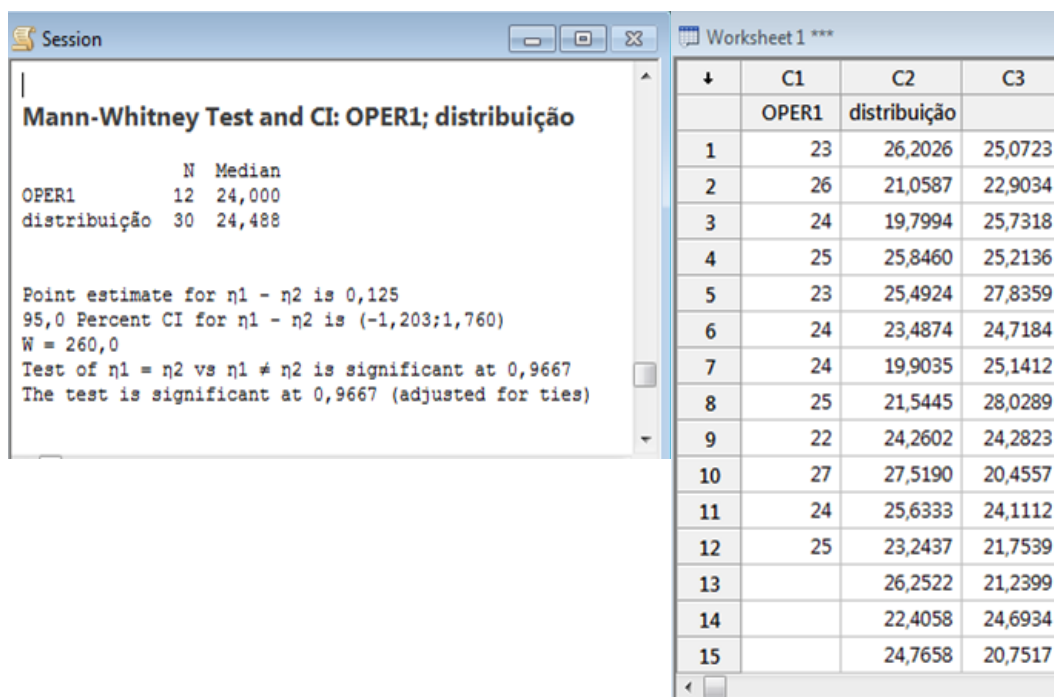
Utilizando o software Minitab® testou-se a normalidade do conjunto de amostras, conforme Figura 16.

Figura 16 – Teste de Normalidade para Tomadas de Tempo na Linha de Montagem



Fonte: Empresa estudada.

Figura 17 – Teste de Mann-Whitney para os tempos do Operador1



Fonte: Empresa estudada.

Testou-se ainda, pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a aderência entre o conjunto de amostras e o tempo teórico utilizado como dado de entrada na simulação, representado por meio de um conjunto de 30 amostras gerado pela distribuição triangular definida para o tempo teórico, conforme Figura 17.

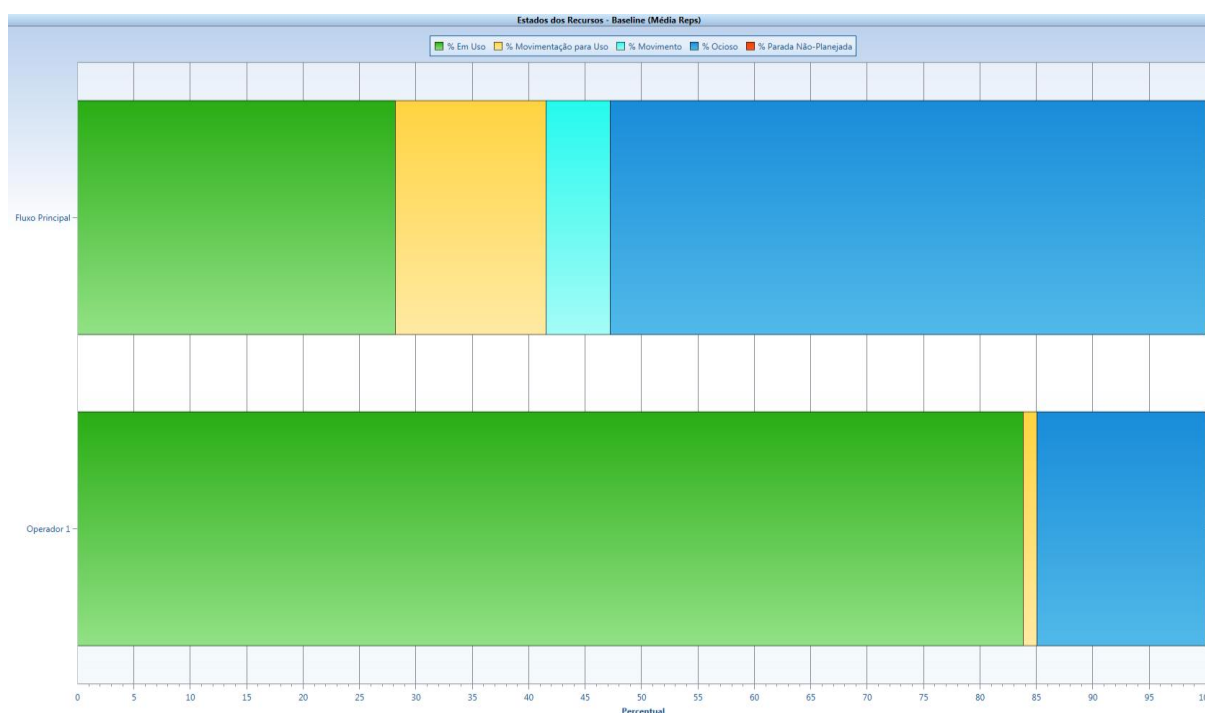
Assim, foi comprovada a hipótese da aderência entre os dados estimados e os dados coletados, logo os dados estimados podem ser usados como entrada para o experimento, validando assim também, o estudo de tempos e métodos padronizados realizado.

Rodada de Simulação e Interpretação dos Resultados - Foi realizada uma rodada com 10 replicações, simulando cada replicação equivalente a 2 semanas de 5 dias trabalhados, com 8h de produção em cada dia. As Figuras 14 e 15 mostram as configurações básicas para a rodada simulada e a tela de execução da simulação respectivamente. Foram realizadas as seguintes considerações por meio de recursos do software:

- A simulação inicia-se sempre com a linha cheia, ou seja, considera-se que o turno anterior deixou as células robotizadas com peças para iniciar a produção rodando.
- O primeiro dia de cada semana é considerado aquecimento, logo seus dados não são computados nos resultados da simulação.

Os resultados apresentaram um desbalanceamento de mão-de-obra entre os 2 operadores logísticos (Figura 18) e ineficiência em relação ao processamento de todos os kits de peças que entram na linha, levando-se em conta a quantidade de kits que ficam no sistema após o fim do período simulado (Figura 19).

Figura 18 – Estado dos operadores ao longo da simulação



Fonte: Empresa estudada.

Figura 19 – Sumário de Entidades

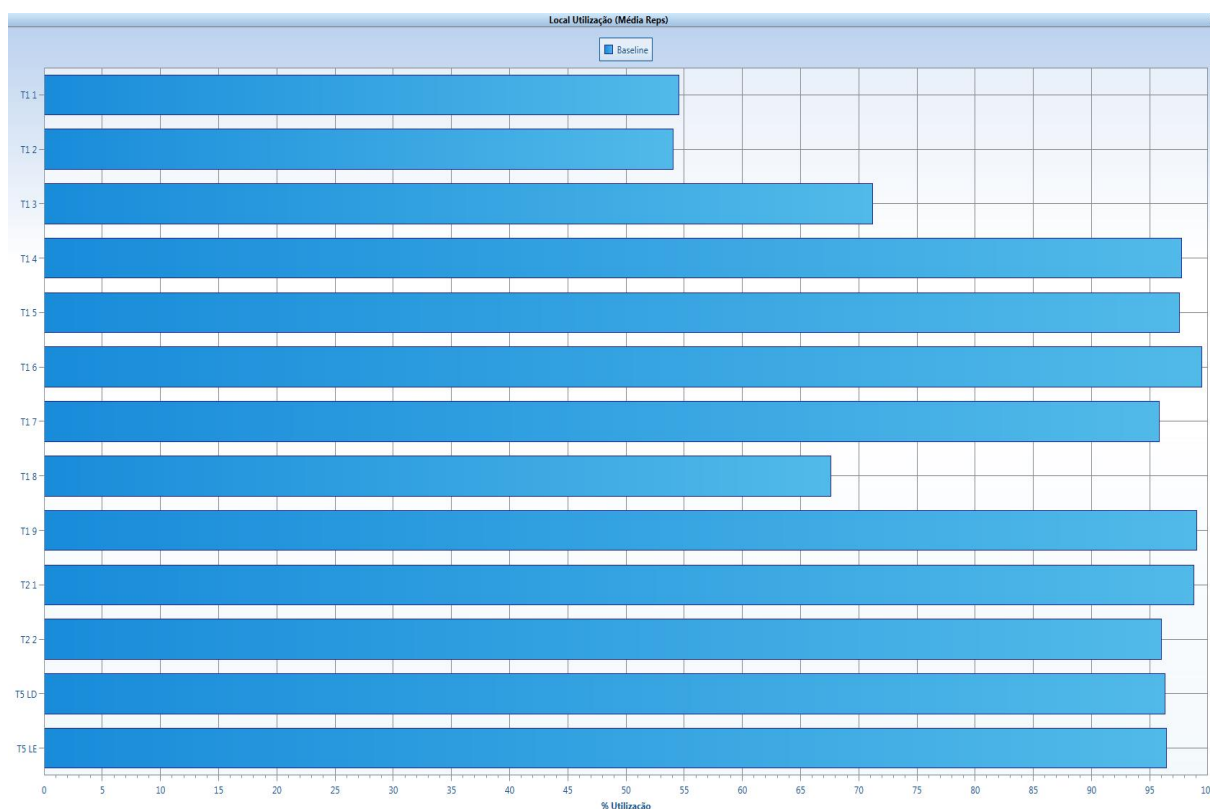
Sumário de Entidades (Média Reps)									
Cenário	Replicação	Nome	Total de Saídas	Quantidade Atual no Sistema	Tempo Médio no Sistema (Min)	Tempo Médio em Lógica de Movimento (Min)	Tempo Médio Aguardando (Min)	Tempo Médio em Operação (Min)	
Baseline	Média	Kit	40.575,67	9.337,33	168,71	14,79	60,45	3,46	
Baseline	Média	Kits carregados	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Baseline	Média	Longarina	2.287,00	4,00	38,75	0,00	0,43	7,41	
Baseline	Média	LongarinaIntermediaria21	2.287,00	0,00	13,59	0,00	0,00	2,92	
Baseline	Média	LongarinaIntermediaria22	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Baseline	Média	Pallet	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Baseline	Média	SubconjuntoTravessa	3.606,00	928,67	115,57	1,80	88,95	2,90	
Baseline	Média	Suporte	2.005,00	0,00	16,42	0,00	0,00	3,03	

Fonte: Empresa estudada.

Na Figura 19, as entidades que aparecem com valor 0 na coluna “Total de Saídas”, assinaladas em vermelho, foram artifícios de programação para agregar ou separar peças, não tendo valor real ou significando novos entrantes no processo.

Pode-se verificar, ainda na Figura 19, que 23% ficam no sistema após o final da simulação, isto é, não foram processados. Isso indica que há gargalo na linha que impede que todas as peças sejam processadas. Adicionalmente, pode-se observar na Figura 20, um desbalanceamento entre as células, em relação à taxa de ocupação destas, que varia entre pouco mais que 50% a quase 100%.

Figura 20 – Utilização das Células Robotizadas (%)



Fonte: Empresa estudada.

Melhorias Sugeridas no Processo – Dentre outras propostas de melhorias identificadas modo a promover uma melhor e mais balanceada utilização dos recursos (pessoas), e tentar sanar o déficit de peças nas células de travessas, foi sugerido que o Operador 2 passasse a buscar as peças estampadas travessas diretamente do estoque central, abastecendo estas células (T1-1, T1-2, T1-3 e T1-8), na quantidade para 1h de produção, retirando este abastecimento do *milk-run*, que também se tornou mais rápido.

Deste modo, identificou-se que as células com menores taxas de ocupação não estavam recebendo peças suficientes para trabalhar sem parada, ou seja, há paradas não programadas por falta de material. Esta hipótese é corroborada pela informação da coluna “Tempo Médio Aguardando” da Figura 19. De fato, as células com menores taxas de utilização (T1-1, T1-2, T1-3 e T1-8) são as células que processam as travessas, a qual resultou no maior excedente do sistema em relação às peças processadas, conforme coluna “Total de Saídas” da Figura 19.

Por outro lado, pode-se apontar como limitações da pesquisa o fato de a planta estudada estar localizada nas dependências do cliente (montadora), o que dificultou a realização de visitas para a coleta direta de dados, resultando em uma dependência de colaboradores terceirizados. Além disso, no início do trabalho, a linha ainda estava em fase de *try-out*, e ao final estava em fase de *ramp-up*, ou seja, houve modificações ao longo desse período que não foram consideradas na coleta inicial de dados.

No mercado, existem muitos softwares comerciais de simulação de eventos discretos que são orientados a objetos e incluem diversos pacotes de modelos e ferramentas para diferentes aplicações. Embora a maioria desses softwares tenha sido desenvolvida originalmente para fins industriais e logísticos, eles rapidamente se expandiram para outros setores, como o da saúde.

De acordo com Dias *et al.* (2016), as diferenças entre esses softwares em termos de recursos, ferramentas e funcionalidades são mínimas. Portanto, critérios como o acesso ao software, o *know-how* disponível na academia e na empresa envolvidos, casos conhecidos de uso, suporte no mercado local e até mesmo a popularidade podem ser determinantes na escolha do software de simulação a ser utilizado. O software ProModel® atende a essas características e, por isso, foi selecionado para ser utilizado neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa concluiu que a aplicação de Simulação de Eventos Discretos (DES) é eficaz para melhorar a intralogística de abastecimento em uma linha de montagem de chassis. Isso resulta em um balanceamento mais satisfatório da linha de produção ou, pelo menos, na identificação imediata dos obstáculos que impedem o alcance das metas estabelecidas para o processo. Essa descoberta destaca o potencial da simulação como uma ferramenta valiosa na otimização de processos industriais.

Quanto aos objetivos específicos citados na Seção 1:

- Foi possível modelar o sistema real do abastecimento da linha de montagem com a técnica de modelagem IDEF-SIM.
- Utilizou-se do modelo conceitual, para a programação do modelo computacional do abastecimento da linha de montagem utilizando o software ProModel®.
- Utilizou-se técnicas estatísticas não paramétricas para validar os dados de entrada e dar fidelidade ao modelo simulado em relação ao sistema real.

Além disso, o IDEF-SIM, se tratar de um modelo conceitual, não atrelado a comandos específicos de nenhum software, o torna extremamente flexível e adaptável. É importante ter em mente que o modelo deve responder às questões necessárias na hora de ser testado e simulado.

A orientação adotada no modelo conceitual pode ser às entidades ou às funções, dependendo do sistema real a ser simulado, e como este é melhor representado. Foi possível ver que o próprio modelo conceitual, antes da simulação, já tem aplicabilidade por ser um método eficaz de mapeamento de processo, podendo ser utilizado para discussões em nível tático e estratégico, antes da implementação do processo.

No sentido de ampliar a utilidade desta linha de pesquisa para a empresa estudada, pretende-se a exploração das seguintes possibilidades de trabalho adicional:

- Aplicação das melhorias propostas no modelo computacional, no intuito de decidir quanto a realizar as alterações na prática ou não.
- Verificar a necessidade de explodir os conjuntos em peças, ou se é possível manter o modelo subdividido apenas em tipos de peças (Travessas, Longarinas e Suportes).
- Identificar as restrições do modelo e os valores, em um primeiro momento determinísticos das entradas, oriundos dos cálculos teóricos realizados pela equipe de desenvolvimento do processo através das tabelas de movimentos padronizados e estudo das células robotizadas, e/ou do benchmarking com a linha similar já existente.
- Desenvolver o modelo computacional no ProModel® utilizando as variáveis e restrições determinísticas adotadas no modelo conceitual e verificar aderência com aos valores teóricos.

- Avaliar as melhores distribuições para cada entrada e simular o sistema com as entradas estocásticas definidas, a fim de identificar possíveis gargalos ou ociosidades no sistema.
- Uso da simulação por agentes, para aumentar a fidelidade da simulação, substituindo as entidades por agentes tomadores de decisão, em função das características e comportamentos típicos dos executantes das funções.

REFERÊNCIAS

BANKS, J. *et al.* **Discrete-event system simulation**. 5th edition, Singapore: Prentice Hall, 2010.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443570210414338>.

BUENO, R. V. **O uso do BPM no mapeamento de processos nas organizações: uma revisão sistemática da literatura**. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/33859>.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4a ed. São Paulo: Editora GEN-LTC, 2014.

DE PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, p. 106868, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>.

DE SOUSA JUNIOR, W. *et al.* Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 128, p. 526-540, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.073>.

DIAS, L. M. S. *et al.* Discrete simulation software ranking - A top list of the worldwide most popular and used tools. *In*: 2016 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2016, Virginia. **Proceedings [...]**, New York: IEEE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822165>.

DIAS, P. *et al.* Analysis and Improvement of an Assembly Line in the Automotive Industry. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEADABLE AUTOMATION AND INTELLIGENT MANUFACTURING, 29, 2019, Limerick. **Proceedings [...]**, Netherlands: Procedia Manufacturing, v. 38, p. 1444–1452, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.143>.

ENDEAVOR BRASIL. **Indústria 4.0: as oportunidades de negócio de uma revolução que está em curso**. 2018. Disponível em:

<https://endeavor.org.br/tecnologia/industria-4-0-oportunidades-de-negocio-de-uma-revolucao-que-esta-em-curso/>. Acesso em: 04 abr. 2023.

FAROOQUI, A. *et al.* From factory floor to process models: A data gathering approach to generate, transform, and visualize manufacturing processes. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 24, p. 6–16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.12.002>.

FILHO, P. J. F. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em arena**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GITTINS, P.; MCELWEE, G.; TIPI, N. Discrete event simulation in livestock management. **Journal of Rural Studies**, v. 78, p. 387–398, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.06.039>.

GOODALL, P.; SHARPE, R.; WEST, A. A data-driven simulation to support remanufacturing operations. **Computers in Industry**, v. 105, p. 48–60, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.001>.

JAMIL, M.; RAZALI, N. M. Simulation of Assembly Line Balancing in Automotive Component Manufacturing. *In: IMEC-APCOMS, 2015, Kuala Lumpur. Proceedings [...]*, United Kingdom: IOP Conference Series, 2016. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012049>.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A. E; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40, 2008, João Pessoa. Proceedings [...]*, Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2008. Disponível em: <https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2008/pdf/arq0292.pdf>.

LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 19, p. e0200023, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658766>.

MENDONCA, M. M.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. de C. Aplicação da modelagem conceitual IDEF-SIM ao software de modelagem computacional simul8: um caso prático. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33, 2013, Salvador. Proceedings [...]*, Rio de Janeiro: ABEPRO, 2013. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_182_040_22541.pdf.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 248p.

MIQUEO, A.; TORRALBA, M.; YAGÜE-FABRA, J. A. Lean manual assembly 4.0: A systematic review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 23, p. 8555, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10238555>.

MIRANDA, R. de C. **Redução do espaço de busca em problemas de Otimização via Simulação utilizando Análise Envoltória de Dados e Arranjos Ortogonais de**

Taguchi. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá, MG, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/126>.

MOURA, D. A.; BOTTER, R. C. Caracterização do sistema de coleta programada de peças, Milk Run. **RAE eletrônica**, v. 1, p. 1-14, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1676-56482002000100010>.

MOURTZIS, D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 7, p. 1927–1949, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>.

PEINADO, J.; GRAEMI, A. R. **Administração da produção: operações industriais e de serviços**. Curitiba: UnicenP, 2007.

PEREIRA, A. M. H. *et al.* Lean Six Sigma Approach to Improve the Production Process in the Mould Industry: a Case Study. **Quality Innovation Prosperity**, v. 23, n. 3, p. 103, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12776/qip.v23i3.1334>.

RABIA, M. A.; BELLABDAOUI, A. Simulation-based analytics: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 117, p. 102511, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102511>.

RAZA, M. *et al.* Role of Discrete Event Simulation in the Assessment and Selection of the Potential Reconfigurable Manufacturing Solutions. *In: PRODUCTION PROCESSES AND PRODUCT EVOLUTION IN THE AGE OF DISRUPTION*, 2023, Bologna. **Proceedings [...]**, Singapore: Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-34821-1_31.

SOORI, M.; AREZOO, B.; DASTRES, R. Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, v. 3, p. 192–204, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>.

UĞRAŞ, A.; TAŞAN, S. Ö. Modeling and Improvement of the Production System of a Company in the Automotive Industry with Simulation. *In: ADVANCES IN INTELLIGENT MANUFACTURING AND SERVICE SYSTEM INFORMATICS*, 2023, Düzce. **Proceedings [...]**, Singapore: Springer, p. 107-117, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6062-0_11.

VALLE, R.; OLIVEIRA, S. B. **Análise e Modelagem de Processos de Negócio: Foco na notação BPMN (Business Process Modeling Notation)**. São Paulo: Atlas, 2012.

José Sávio Gonçalves Antunes Pereira

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2009) e mestrado profissional em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual Paulista – UNESP (2023). Tem experiência profissional da indústria automotiva e atualmente trabalha na Ambipar Response Remediation LTDA, como Gerente de Automação, Elétrica e PMO. Atuou ainda no setor vidreiro na área de gerenciamento de projetos.

Marco Túlio Ribeiro Ricci

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2005). Trabalhou na Maxion Structural Components desde abril de 2006, onde iniciou na área de desenvolvimento de processos de peças estampadas, conjuntos, chassis soldados, rebitados e aparafusados de todas as principais OEMs atuantes no Brasil. Foi responsável pela Engenharia de Desenvolvimento de Processos, Engenharia Industrial, Engenharia de Protótipos, Engenharia da Informação da unidade de Cruzeiro até maio 2019. Além disso era responsável pela Inovação e Transformação Digital dessa mesma unidade. A partir de uma definição estratégica da companhia, se tornou Gerente Regional de Inovação e Transformação Digital, responsável pelas atividades relacionadas a esses temas em todas as unidades da Maxion Structural Components até agosto de 2021 quando passou a exercer a atual função de Diretor Global de Estratégia e Inovação.

Elias Carlos Aguirre Rodríguez

Mestrado em Engenharia na área de Produção pela Universidade Estadual Paulista – UNESP (2023). Tem experiência na área de Probabilidade e Estatística, Ciência da Computação, e Engenharia de Produção, atuando principalmente nos temas de Estatística Aplicada, Análise Multivariada, Demografia, Ciência de Dados, Técnicas de Amostragem, Análise de Dados, Aprendizado de Máquina, Pesquisa Operacional, e Métodos de Otimização Simulação e Tomada de Decisão.

Aneirson Francisco da Silva

Graduado em Administração pela UNITRI (2004), Especialização em Economia e Finanças pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU (2006), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2009), doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual Paulista – UNESP (2013), e estágio de Pós-doutorado na Universidade de São Paulo – USP (2018). É Prof. Livre Docente no Departamento de Produção da Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá da UNESP e Pesquisador PQ2 do CNPq. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional e Estatística, atuando principalmente nos seguintes temas: Pesquisa Operacional, Métodos de Otimização e Simulação, Data Envelopment Analysis, Design of Experiments.

Fernando Augusto Silva Marins

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP (1976), mestrado em Pesquisa Operacional pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA (1981), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1987), e estágio de Pós-doutorado na Brunel University em Londres – Inglaterra (1994). É Prof. Titular no Departamento de Produção da Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá da UNESP e Pesquisador PQ2 do CNPq. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional e Logística, atuando principalmente nos seguintes temas: Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, Modelos de Otimização da Pesquisa Operacional, Métodos de Apoio à Tomada de Decisão e de Simulação.



Artigo recebido em: 24/08/2023 e aceito para publicação em: 02/09/2024

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v24i4.4987>

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 4, e-4987, 2024.