

## APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS NO BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM EM UMA EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO

### APPLICATION OF DISCRETE EVENT SIMULATION TO ASSEMBLY LINE BALANCING IN AN AUTOMOTIVE COMPANY

Lucio Flore Maciel\*  E-mail: [lucio.maciel@maxionwheels.com](mailto:lucio.maciel@maxionwheels.com)

Aneirson Francisco da Silva\*\*  E-mail: [aneirson.silva@unesp.br](mailto:aneirson.silva@unesp.br)

Elias Carlos Aguirre Rodríguez\*\*  E-mail: [elias.aguirre@unesp.br](mailto:elias.aguirre@unesp.br)

Fernando Augusto Silva Marins\*\*  E-mail: [fernando.marins@unesp.br](mailto:fernando.marins@unesp.br)

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

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

**Resumo:** O objetivo geral da pesquisa foi desenvolver um modelo de simulação a eventos discretos para ser aplicado ao balanceamento de uma linha de montagem de componentes numa empresa do setor automotivo, buscando aumentar a produtividade da linha e utilizando menores quantidades de insumos. Na situação estudada há muitos elementos com comportamento estocástico, que podem influenciar na produtividade da linha, além da diversidade de insumos que abastecem a montagem, o que torna o balanceamento da linha uma tarefa complexa e favorece o uso da Simulação como procedimento de solução. Na modelagem conceitual do problema estudado adotou-se o método IDEF-SIM e para a simulação foi utilizado o software ProModel®. Como resultados tem-se um modelo conceitual e implementado para uma linha de montagem que possibilitou informações interessantes sobre o problema, tais como: juntar funções de dois postos de trabalhos, eliminar excesso de movimentação e eliminar gargalos.

**Palavras-chave:** Simulação a Eventos Discretos. Balanceamento de Linha. Modelagem conceitual. IDEF-SIM. Empresa do Setor Automotivo.

**Abstract:** The overall objective of the research was to develop a simulation model discrete event for balancing an assembly line for components in a Brazilian automotive company, seeking to increase line productivity and using lower amounts of inputs. In the situation studied for many elements with stochastic behavior, which may influence the productivity of the line beyond the range of products that supply assembly, which makes the balancing line a complex task and promotes the use of the simulation procedure as a solution. In conceptual modeling of the studied problem adopted the IDEF-SIM method and for the simulation we used the ProModel® software. As results has a conceptual model and implemented for an assembly line that has enabled interesting information about the problem, such as joining functions of two posts jobs, eliminate excess movement and eliminate bottlenecks.

**Keywords:** Discrete Event Simulation. Line Balancing. Conceptual Modeling. IDEF-SIM. Automotive Sector Company.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Budde *et al.* (2002), dentro de um contexto de produção industrial, o processo de tomada de decisão é crucial para o andamento das atividades planejadas e pode trazer melhorias e otimização dos processos produtivos. Em muitos casos, a redução do desperdício e a melhoria da eficiência destes sistemas podem proporcionar uma importante vantagem competitiva.

Com a intensificação da competitividade à escala global e a transformação do cenário de mercado com cada vez mais atenção centrada nas preferências dos clientes, o dilema enfrentado pelas empresas dedicadas à indústria transformadora adquiriu um grau crescente de complexidade (Kang; Bhatti, 2018).

Diante deste cenário, as empresas automotivas têm um grande desafio que é reduzir custos, aumentar capacidade e acelerar ciclos de produção (Pinto *et al.*, 2023). Assim, o balanceamento da produção é um problema bastante difundido na literatura (ver Tabela 1), mas os modelos matemáticos propostos, dada a complexidade do problema, em geral são representações simplificadas da realidade e não consideram alguns elementos fundamentais que têm influência no desempenho da linha (Miranda *et al.*, 2017)

As atividades de montagem realizadas pelo sistema produtivo não determinam somente a qualidade final do produto, mas também os prazos de entrega, o tempo de mercado do produto, desse modo, a maneira como a linha de produção é projetada determinará, futuramente, a sua eficiência e qualidade (Amaral *et al.*, 2002; Sousa Junior *et al.*, 2019).

O Balanceamento de Linha de Montagem (*Assembly Line Balancing*) é um problema importante em empresas de manufatura que busca alocar tarefas para as estações de trabalho, buscando minimizar o tempo ocioso delas e respeitando as eventuais restrições de precedência existentes (Ferreira *et al.*, 2020).

Segundo Fu (2015), a Simulação a Eventos Discretos (SED) é a importação da realidade de um sistema para um ambiente controlado onde se pode estudar o comportamento dele, sob diversas condições, sem riscos físicos e/ou grandes custos envolvidos. Assim, conforme mencionado por Miranda *et al.* (2004), um aspecto crucial durante uma simulação é o desenvolvimento de um modelo

conceitual do problema. Este modelo, independente do software de simulação que será utilizado, orienta a fase de coleta de dados, auxiliando na definição dos pontos de coleta e agilizando o processo de elaboração do modelo computacional.

Nesse sentido, Leal, Almeida e Montevechi (2008) desenvolveram uma técnica de modelagem conceitual, denominada IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods-Simulation*), que utiliza e adapta elementos lógicos das técnicas de modelagem já consagradas no *Business Process Modeling* - BPM, permitindo assim a elaboração de modelos conceituais com informações úteis ao modelo computacional. A técnica permite ainda uma documentação de modelos computacionais, facilitando o entendimento do projeto.

Foi realizada uma análise bibliométrica com a finalidade de mostrar a importância, relevância e o interesse deste estudo. A análise foi conduzida por meio da busca de pesquisas nas bases de periódicos de Scopus e Web of Science, apenas considerando artigos, revisões, e artigos de conferências até 04 de agosto de 2023.

**Tabela 1** – Publicações em Scopus e Web of Science

Palavras-chave	Scopus	Web of Science
"Discrete Event Simulation"	22.128	9.362
"Assembly line"	11.074	5.694
("Line Balancing" OR "Balancing line")	3.019	2.135
"Discrete Event Simulation" AND "Conceptual Modeling"	71	109
"Discrete Event Simulation" AND "Conceptual Modeling" AND "IDEF-SIM"	3	3
"Discrete Event Simulation" AND "Assembly Line"	183	115
"Conceptual Modeling" AND "Assembly Line"	4	11
"IDEF-SIM" AND "Assembly Line"	0	0
("Discrete Event Simulation" OR "Conceptual Modeling" OR "IDEF-SIM") AND "Assembly Line"	186	125

**Fonte:** Scopus e Web of Science (2023).

A Tabela 1 apresenta a quantidade de publicações nas duas bases de periódicos, utilizando uma combinação das palavras-chave "Discrete Event Simulation", "Assembly Line", "Line Balancing", "Balancing line", "Conceptual Modeling", e "IDEF-SIM". Além disso, a busca de artigos baseou-se em "Article title, abstract, keywords" para Scopus e em "Topic" para Web of Science.

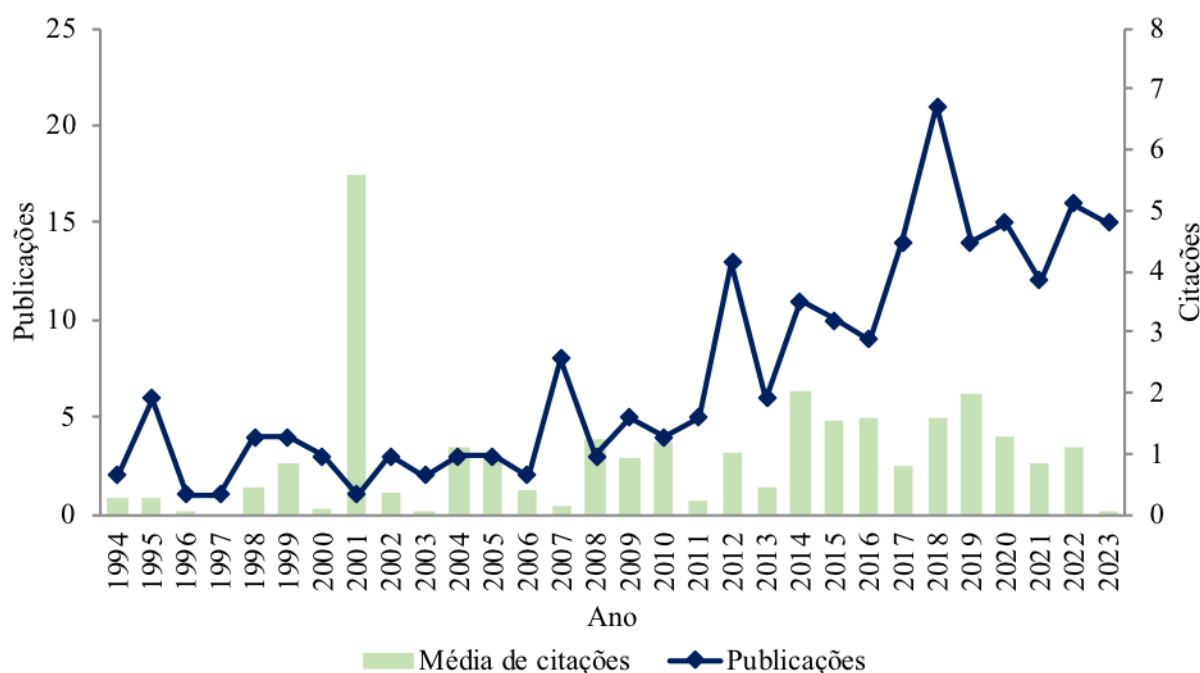
Também, da Tabela 1 pode-se observar uma quantidade considerável de artigos sobre Simulação a Eventos Discretos, mas quando foi adicionada a palavra-

chave relacionada com modelagem conceitual a quantidade diminuiu, e ainda mais considerando a técnica IDEF-SIM.

Assim, considerando a combinação de "Discrete Event Simulation" OR "Conceptual Modeling" OR "IDEF-SIM", e adicionando o termo sobre linha de montagem (*Assembly Line*), foram encontrados apenas 186 artigos em Scopus e 125 artigos em Web of Science. Esses artigos foram analisados, encontrando documentos duplicados, sendo necessária uma depuração que resultou na obtenção de um conjunto final de 216 artigos únicos.

Os artigos encontrados estavam distribuídos no período 1994-2023 e em 156 fontes, com um total de 1.955 citações. Também, identificou-se 586 autores e um número aproximado de 3 coautores por documento, com um índice de colaboração internacional de 10,65%. Essa constatação evidencia o interesse da comunidade acadêmica nesse tópico específico.

**Figura 1** – Número de publicações e média de citações por ano



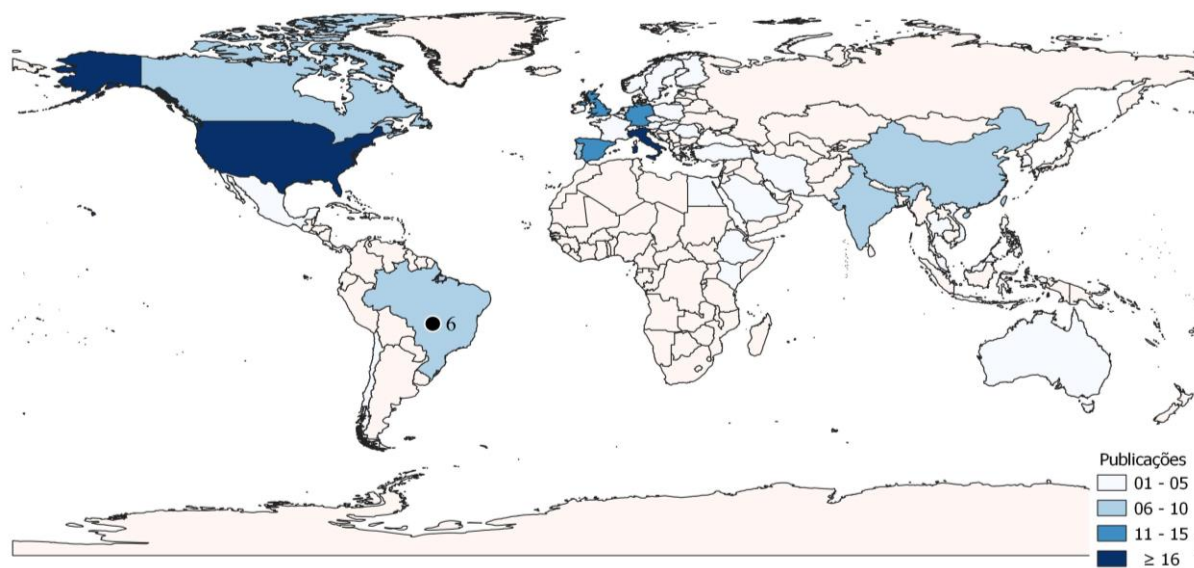
**Fonte:** Scopus e Web of Science (2023).

A Figura 1 ilustra a quantidade de artigos por ano, identificando que 63,43% dos documentos foram publicados na última década com uma taxa de crescimento

anual de 7,19%. Da mesma forma, pode-se observar que a média de citações por ano no período 1994-2023 oscilou entre 0 até um aproximado de 6 citações.

Outra análise muito importante foi a identificação de publicações por país do autor correspondente, o que permitiu reconhecer o interesse do estudo em diferentes países do mundo. Assim, por meio da Figura 2 foi possível identificar que as publicações estiveram distribuídas em 39 países, destacando que Estados Unidos (22) ocupa a primeira posição com o maior número de publicações, seguido por Itália (16) e Espanha (12). Observe-se que o Brasil ocupa apenas a décima segunda posição com 6 artigos publicados entre 2017 e 2023.

**Figura 2** – Número de publicações por país do autor correspondente



**Fonte:** Scopus e Web of Science (2023).

Dessa forma, a análise bibliométrica mostrou um aumento de publicações ao longo dos anos, além de que ainda existem poucos trabalhos realizados no Brasil. Sendo assim, este trabalho pode contribuir no nível nacional e internacional com a aplicação de SED utilizando modelagem conceitual, por meio do método IDEF-SIM, para melhorar o processo produtivo numa linha de montagem.

Das publicações encontradas passa-se a descrever o conteúdo de artigos recentes para ilustrar o que tem sido pesquisado e proposto na literatura, associado ao uso da simulação no balanceamento de linhas de produção.

Nesse sentido, identificou-se que Razali *et al.* (2017) trabalharam na otimização do *layout* de uma linha de montagem na indústria automotiva, utilizando uma abordagem meta-heurística assistida por SED. O propósito deste estudo foi equilibrar a carga de trabalho, aumentar a eficiência da linha e melhorar a produtividade por meio da otimização do balanceamento da linha de montagem, com o emprego do Algoritmo Genético.

Tiacci (2017) propôs uma abordagem baseada em algoritmo genético para o equilíbrio de linhas de produção em formato de U, considerando um modelo misto assíncrono com tempos de tarefa estocásticos. Sabe-se que a eficácia dessas linhas em formato de U é preservada quando se pode maximizar a utilização de centros de trabalho cruzados. Segundo esse autor, a viabilidade dessa abordagem depende da natureza específica das instâncias consideradas, particularmente da distribuição dos tempos de tarefa. Ele observou que, em determinados casos, a viabilidade do uso de centros de trabalho cruzados diminui, tornando as linhas de montagem lineares com estações de trabalho e *buffers* paralelos uma opção preferível.

Já Samant *et al.* (2018) propuseram a utilização de uma ferramenta de simulação com o propósito de obter informações relevantes acerca de uma linha de montagem, visando à minimização do desperdício.

Por sua vez, Bongomin *et al.* (2020) formularam o problema de balanceamento de linha de montagem (*Assembly Line Balancing Problem* - ALBP) para linhas de produção de vestuário. Esses autores empregaram uma abordagem de otimização fundamentada em simulação considerando-se tempos para as tarefas com comportamento estocásticos. A proposta de solução para o ALBP visou a minimização do tempo de ciclo, considerando um número predefinido de estações de trabalho, considerando restrições relacionadas ao número de recursos disponíveis, relações de precedência entre tarefas e tipos de recursos envolvidos.

Kiris *et al.* (2023) propuseram um *framework* para analisar métodos de produção enxuta por meio da utilização de SED e Análise Envolvória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA), visando abordar o desafio da tomada de decisão multiobjetivo. Os resultados relatados evidenciaram a viabilidade e superioridade do *framework* proposto por meio de um caso de aplicação em um sistema de produção de peças de reposição automotivas. Ainda segundo os autores, os resultados

revelam que a estrutura sugerida aprimora substancialmente o sistema existente, promovendo o aumento da eficiência e, simultaneamente, a redução do trabalho em processo.

Nesse contexto, este artigo buscou respostas para as seguintes questões:

- É possível com a adoção de modelos de simulação melhorar o desempenho de uma linha de montagem do setor automotivo?
- O uso da Simulação propiciará uma melhor gestão dos gargalos observados de uma linha de montagem do setor automotivo?
- Será possível diminuir os *leads times* de produção com o uso de modelos de simulação?

Assim, este trabalho teve como objetivo geral a proposição de um modelo conceitual, por meio do método do IDEF-SIM, e sua implementação no *software* ProModel®, para realizar a simulação de uma linha de montagem, com respeito a propiciar melhorias no balanceamento da carga de trabalho de operadores e máquinas em uma empresa do setor automotivo.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver, um modelo conceitual para tratar de problemas de balanceamento numa linha de montagem de uma empresa do setor automotivo.
- Testar e validar o modelo.
- Implementar o modelo de simulação para a situação real da empresa objeto de estudo.
- Identificar as oportunidades de melhoria no desempenho da linha de montagem estudada.

Destaque-se, com relação às delimitações dessa pesquisa, que, atendendo às solicitações dos gestores da empresa que foi o objeto do estudo, abordou-se uma linha de montagem manual de uma empresa do setor automotivo, com equipamentos de fácil movimentação que possibilitam a mudança do *layout*. Acredita-se que os resultados desse trabalho, com as devidas adaptações, poderiam ser replicados em outros setores da empresa e em organizações em que haja similaridade nos processos produtivos e linhas de montagem adotadas.

Este artigo está estruturado em mais quatro seções. Na Seção 2 apresenta-se a fundamental teórica da SED e do IDEF-SIM. Na Seção 3 descreve-se o problema real abordado e sua modelagem, ainda nesta seção está o modelo conceitual construído e os resultados da simulação obtidos por intermédio do *software* ProModel®. Na Seção 5 estão as conclusões da aplicação do modelo desenvolvido ao problema real da empresa estudada, bem como sugestões de sequência do trabalho, seguidas do referencial bibliográfico consultado.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O método de pesquisa é um conjunto de procedimentos e técnicas utilizados para se coletar e analisar os dados e ele fornece os meios para se alcançar os objetivos propostos e obter respostas às questões da pesquisa, de acordo com Cauchick Miguel (2012).

Ainda com base em Cauchick Miguel (2012), pode-se classificar o método de pesquisa adotado neste artigo da seguinte forma:

- Quanto à natureza – é uma pesquisa aplicada que se busca propiciar novos conhecimentos para a prática, que é o caso em questão, pois a simulação simplifica a prática.
- Quanto à abordagem – é uma pesquisa quantitativa que utiliza técnicas estatísticas para o tratamento dos dados e informações do problema estudado.
- Quanto aos procedimentos – utiliza-se a modelagem e simulação, permitindo ao pesquisador manipular diretamente as variáveis independentes do problema em questão. Além disto, com base em um conjunto de variáveis, que variam dentro de um domínio específico, modelos de relações casuais entre variáveis independentes e dependentes foram desenvolvidos, analisados e testados.

Nesse trabalho, adotou-se o procedimento para a aplicação de técnicas de simulação proposto por Chwif e Medina (2014), e com base na adaptação do proposto por Montevechi *et al.* (2007; 2010), conforme ilustrado na Figura 3.

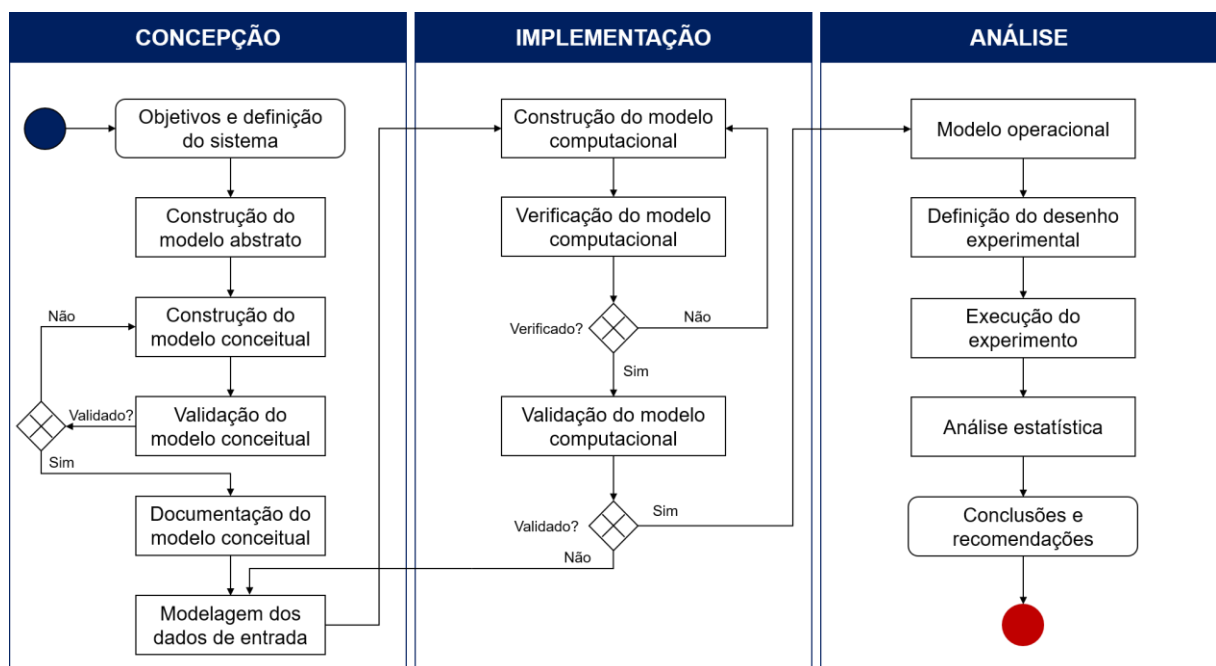
Passa-se a comentar sobre como foi utilizada a simulação nesse trabalho. Destaque-se que a simulação computacional tem sido utilizada de forma crescente



para auxílio à tomada de decisões (Sargent, 2009), sendo apontada como uma das técnicas de pesquisa mais utilizadas em vários setores, devido, principalmente, à sua versatilidade, flexibilidade e poder de análise (Jahangirian *et al.*, 2010).

Conforme comentado anteriormente, na etapa de delimitação do objeto de estudo e dos objetivos a serem buscados, atendendo às solicitações dos gestores da empresa analisada, optou-se por abordar os problemas de balanceamento, numa linha de montagem específica, cujas características serão descritas adiante.

**Figura 3** – Sequência de passos para a simulação



**Fonte:** Adaptação de Montevechi *et al.* (2007; 2010) e Chwif e Medina (2014).

Na sequência do desenvolvimento do trabalho foi estudado o processo produtivo envolvido e que deveria ser mapeado. Observe-se que um processo é um conjunto de elementos que serve de guia para início e término de um trabalho, sendo um conjunto de atividades preestabelecidas que, se executadas numa sequência determinada, vão conduzir a um resultado esperado assegurando o atendimento das necessidades e expectativas dos clientes e outras partes interessadas (Chwif; Medina, 2014).

Para o desenvolvimento do modelo abstrato da situação em estudo, foi utilizado o mapeamento de processos, que é uma ferramenta gerencial analítica e de comunicação, que tem a intenção de ajudar a melhorar os processos existentes

ou de implantar uma nova estrutura voltada para processos (Hoefler; Jeannot; Mercier, 2014). Trabalhos como de Leal (2008) utilizaram o mapeamento de processo como forma de descrever a lógica e determinar os pontos de decisão, antes mesmo do desenvolvimento do modelo computacional.

A partir do que foi identificado no mapeamento de processos, passou-se ao desenvolvimento do modelo conceitual. Segundo Law (2007), a etapa de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação.

Segundo Leal, Almeida e Montevechi (2008) muitos pesquisadores têm mostrado que os métodos da abordagem IDEF podem ser utilizados no suporte à simulação.

Percebendo algumas lacunas nas técnicas de mapeamento existentes que servissem de suporte à simulação computacional, Leal, Almeida e Montevechi (2008) propuseram a técnica IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), que tem como foco o projeto de simulação, mas que também pode ser utilizada para projetos de melhorias em geral. Para a elaboração do modelo conceitual para a situação aqui descrita, adotou-se o IDEF-SIM.

Após a obtenção dos dados e o seu tratamento estatístico pelo *software* Stat:Fit®, passou-se a etapa seguinte, que conforme a Figura 3, envolveu o desenvolvimento e a implementação do modelo computacional no *software* ProModel® e a sua validação.

Finalmente foram realizados os experimentos com os dados reais do problema e identificadas as implicações gerenciais propiciadas pelos resultados alcançados.

Na Seção 4, descreve-se, para a situação estudada, como cada uma dessas etapas foi realizada.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Essa seção apresenta as etapas a serem executadas para uma simulação bem-sucedida, e as respectivas modelagens conceituais. Ainda se destaca a etapa de validação e verificação do modelo.

Segundo Montevechi (2007), muitas empresas possuem recursos disponíveis, que, quando corretamente empregados, podem trazer significativa melhoria tanto em

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 23, n. 4, e-4967, 2023.

produtividade quanto em qualidade. Observe-se, ainda, que o uso de modelos de simulação substitui experimentações de sistemas reais, nos quais os experimentos se tornam inviáveis economicamente (Law, 2007).

Segundo Banks *et al.* (2005), a simulação é uma das ferramentas mais amplamente utilizada em sistemas de manufatura do que em qualquer outra área, e algumas razões para tal podem ser enumeradas:

- a) O aumento da produtividade e qualidade na indústria é um resultado direto da automação. Como os sistemas de automação são cada vez mais complexos estes só podem ser analisados pela simulação;
- b) Os custos de equipamentos e instalações são enormes;
- c) Os custos dos computadores estão cada vez mais baixos e mais rápidos;
- d) Melhorias nos softwares de simulação reduziram o tempo de desenvolvimento de modelos.
- e) A disponibilidade de animação resultou em maior compreensão e utilização dos gestores da manufatura.

Sabe-se que, apesar de cada projeto de simulação apresentar particularidades, que o caracteriza como exclusivo, a adoção de um procedimento, que auxilie o analista no desenvolvimento do modelo computacional, poderá reduzir os riscos como a geração de resultados que não agreguem valor ao trabalho.

Para Chwif e Medina (2014) a SED é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em momentos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos. Além disso, a SED envolve variáveis que mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, em contraste ao que ocorre com modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo.

Para a identificação das características de um processo industrial recomenda-se o uso de alguma técnica de mapeamento de processo, que usualmente são executadas nos seguintes passos (HUNT, 1996):

- Identificação dos produtos e serviços e seus respectivos processos. Os pontos de início e fim dos processos são identificados neste passo;
- Reunião de dados e preparação;

- Transformação dos dados em representação visual para identificar gargalos, desperdícios, demoras e duplicação de esforços.

Ainda de acordo com Hunt (1996), o mapeamento de processos deve ser apresentado em forma uma representação gráfica que deve permitir: expor seus detalhes de modo gradual e controlado; encorajar concisão e precisão na sua descrição; focar a atenção nas interfaces.

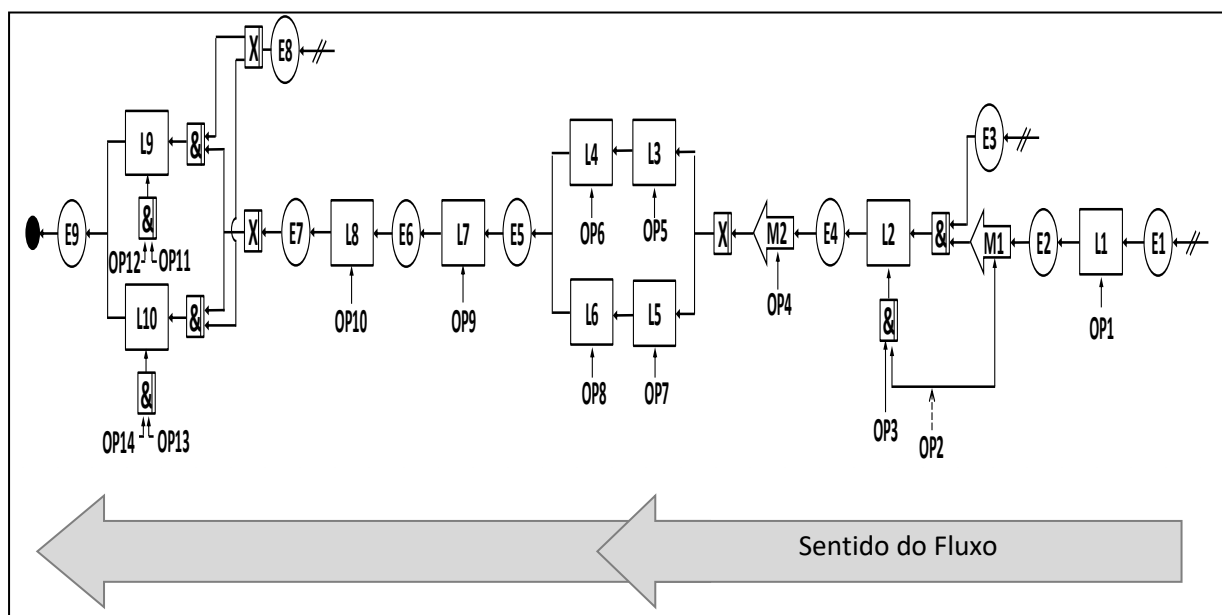
#### **4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, DA MODELAGEM CONCEITUAL E DA SIMULAÇÃO**

A linha de montagem estudada foi a parte final do processo de produção de rodas agrícolas parafusadas. Por possuir um *mix* de produção de alta variedade, a linha não possuía muitos processos automatizados, dependendo de um elevado número de operadores, e envolvia as seguintes operações: aplicação do antirrespingo de solda, montagem das presilhas no aro, solda, acabamento, inspeção e montagem do disco no aro, formando a roda. Não se abordou as operações posteriores que incluíam a pintura, a embalagem e o envio ao cliente. O mapeamento teve início na estação de aplicação do antirrespingo de solda, que contava com um operador para o processo. As peças se encontravam em um estoque intermediário e eram movimentadas pelo próprio operador para o elevador pneumático que integra a estação. Esporadicamente um funcionário dedicado à movimentação de peças na planta auxiliava no abastecimento de aros.

Em seguida, o aro tratado era movimentado pelo operador para o meio de outro elevador pneumático e rolado para o estoque intermediário que antecedia a montagem das presilhas no aro. Esta operação era realizada por dois soldadores, que se alternavam em suas funções, existindo também um terceiro funcionário que encaminhava os aros com presilhas montadas para a estação de solda, utilizando-se de outro elevador pneumático. Este funcionário também era responsável por posicionar um protetor no furo de válvula dos aros e organizá-los na estação. A partir deste ponto o aro poderia seguir por duas linhas, com dois postos de solda em série, em cada uma delas. A situação está ilustrada na Figura 5.



**Figura 6** – Diagrama IDEF-SIM para a linha de montagem estudada



**Fonte:** Empresa estudada.

**Tabela 2** – Entidades presentes no diagrama da Figura 6

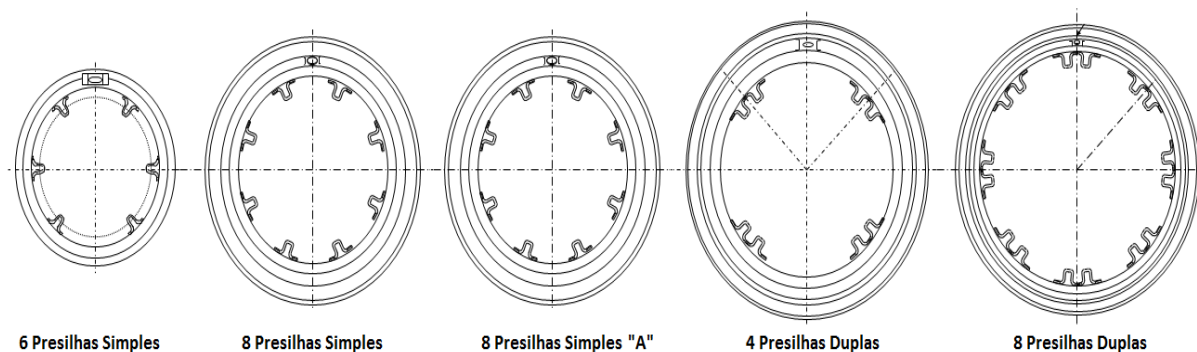
E1	Aro
E2	Aro com Anti Respingo
E3	Presilhas
E4	Aro com Suporte Montado (Presilhas Ponteadas)
E5	Aro com Presilhas Soldadas
E6	Aro Acabado
E7	Aro Inspeccionado
E8	Disco
E9	Aro com Disco Parafusado

**Fonte:** Empresa estudada.

Devido a elevada variedade do *mix* de produção da linha estudada, a primeira ação foi a identificação de quais características específicas do produto possuíam maior impacto nos tempos de processos. Após análise, constatou-se que os fatores de maior influência eram o número e tipo de presilhas na roda e o tipo de solda requerido pelo cliente.

Foi possível agrupar essas características específicas do produto em 5 famílias de produtos: Rodas de 6 presilhas simples, rodas de 8 presilhas simples, rodas de 8 presilhas simples com solda específica “A”, rodas de 4 presilhas duplas e rodas de 8 presilhas duplas. A Figura 7 mostra exemplos de rodas de cada família estudada.

**Figura 7** – Famílias de produtos presentes na linha de montagem estudada



**Fonte:** Empresa estudada.

Com base em dados do setor comercial da empresa foi possível identificar, dentro de cada família, os modelos de maior volume de produção; e iniciou-se a medição de tempos de operação e movimentação para estes. Observe-se que, para processos envolvendo o trabalho de dois operadores simultaneamente, as tarefas foram tratadas individualmente.

Para garantir a qualidade dos dados coletados, procurou-se observar se não havia interferência incomum na linha, e de que o objeto de estudo estivesse em seu ritmo de trabalho usual. Foram tomados cuidados com a existência de possíveis *outliers*, por meio do *software* Stat::Fit®, *software* estatístico que acompanha o ProModel®, que, para os dados coletados, permitiu a identificação destes *outliers* e da curva de melhor aderência.

Outra observação pertinente é como os dados foram estratificados. Para isto, a modelagem pelo IDEF-SIM ajudou muito. A Tabela 3 traz um exemplo da operação de pontear, no início da linha estudada. Nela tem-se, para cada operação, os detalhes e seus respectivos tempos, sendo que, para cada detalhe, foram realizadas 30 medições, atendendo a sugestões da literatura consultada (CHWIF; MEDINA, 2014).

**Tabela 3** – Dados estratificados para a operação de pontear

Op.	OP 20 - MONTAR SUP. NO ARO	T1 [s]	...	T30 [s]
A	Rolar Aro e deitá-lo	3	...	4
A+B	Suspender aro com Talha e posicioná-lo sobre o posto	10	...	8
A+B	Posicionar presilhas no dispositivo e fixá-las	11	...	7
B	Martelar as presilhas no lugar	15	...	7
A	Pontear presilhas	30	...	31
A+B	Suspender aro com Talha e colocá-lo na vertical	12	...	10
C	Transporte do Aro até a esteira de soldagem	4	...	7

**Fonte:** Empresa estudada.

Verificou-se que, para a análise dos recursos envolvidos nos processos da linha, e de posse da representação IDEF-SIM, poder-se-ia dividir uma única operação em sete séries de informações diferentes, e identificar para cada operador o seu tempo em atividade e a sua eventual ociosidade. A partir daí, estudou-se alternativas para a realização desta operação com maior eficiência, e, adicionalmente, pode-se reordenar e redistribuir as partes da operação buscando um melhor ajuste nas atribuições de cada recurso.

Para a célula de fabricação em questão, visando um estudo teórico de cadência da linha de montagem, poderiam ser deixadas de lado as informações de recursos e apenas usar o tempo total da operação, mas, destaque-se, que ter a informação conjunta, ou dividida em sete séries, não impactaria de forma diferente nos resultados.

Após a coleta, os dados foram tratados com o uso do Stat::Fit® que permitiu a interpretação dos dados coletados e forneceu então, para cada sequência de tempos, as distribuições probabilísticas que melhor representavam os comportamentos dos dados medidos.

Após a coleta dos dados algumas propostas foram elaboradas para otimizar o processo estudado, como será apresentado adiante. Para comparar o desempenho de cada uma das propostas entre si e com o modelo atual praticado pela empresa estudada, fez-se necessário adotar uma métrica.

Como a produtividade da linha era altamente influenciada pelo tipo de produto que estava sendo processado, esta condição obrigatoriamente deveria ser a mesma para todos os modelos. Assim, foram levantados dados de percentual de participação no *mix* para cada família de produtos. Na sequência, montou-se uma lista de ordens fictícias de produção, que, ao final de sua execução deveriam



representar o mesmo percentual do total, produzido de cada família, observado na prática.

O *mix* de produção por família e lote fictício utilizado está descrito na Tabela 4. Por conta da importância estratégica destes dados para a empresa, foi mantida a confidencialidade de quais modelos representam cada volume. No entanto, a informação apresentada é importante, pois deixa claro que, apenas duas das seis famílias estudadas, se somadas, já seriam responsáveis por quase 77% do volume total de produção desta linha.

**Tabela 4** – Participação de cada família de produtos no mix total e lote fictício utilizado

<b>Presilhas</b>	<b>Tipo</b>	<b>Solda</b>	<b>% volume</b>	<b>Lote fictício simulado</b>	
DC	DC	DC	53,22%	108 peças	54,27%
DC	DC	DC	23,32%	48 peças	24,12%
DC	DC	DC	8,99%	18 peças	9,05%
DC	DC	DC	6,43%	13 peças	6,53%
DC	DC	DC	6,03%	12 peças	6,03%
Outras	--	--	1,98%		

**Fonte:** Empresa estudada.

**Obs:** DC – Dados Confidenciais da Empresa.

Concluiu-se, assim, que na simulação se deveria focar em manter ou melhorar a produtividade destes modelos identificados, para se obter um maior impacto na linha de montagem. Ao executar cada modelo com o *mix* proposto foi possível obter o tempo final de execução para cada proposta e assim comparar o desempenho produtivo destas.

Outro parâmetro considerado no trabalho, com grande impacto na acuracidade dos resultados, foi a eficiência da linha de montagem, que é essencial para a análise do seu comportamento quando ela está processando ordens de produção diversas.

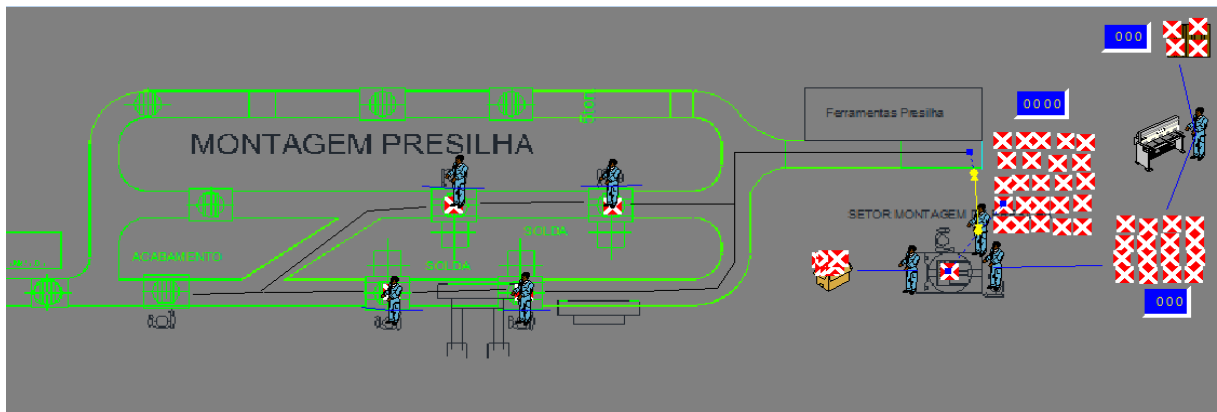
Observe-se que, ao se considerar uma linha operada manualmente, há de se esperar uma flutuação natural do desempenho produtivo desta, assim, foi incluída no modelo uma variável de eficiência que, inicialmente definida, pode permitir que o modelo responda de forma similar ao ocorre na realidade prática.

Neste trabalho foram desconsiderados fatores como parada de linha e problemas de qualidade, uma vez que as propostas elaboradas não procuravam melhorar estes fatores, a inserção destes fatores no modelo só aumentaria o tempo de execução do projeto, sem grandes contribuições para o estudo.

Como já comentado, para a simulação, foi utilizado o *software* ProModel®. Para atender ao sistema proposto, foram necessários dois modelos: o primeiro, iniciando na entrada até após a soldagem e o segundo do acabamento até a saída do sistema. Estes modelos podem ser vistos nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

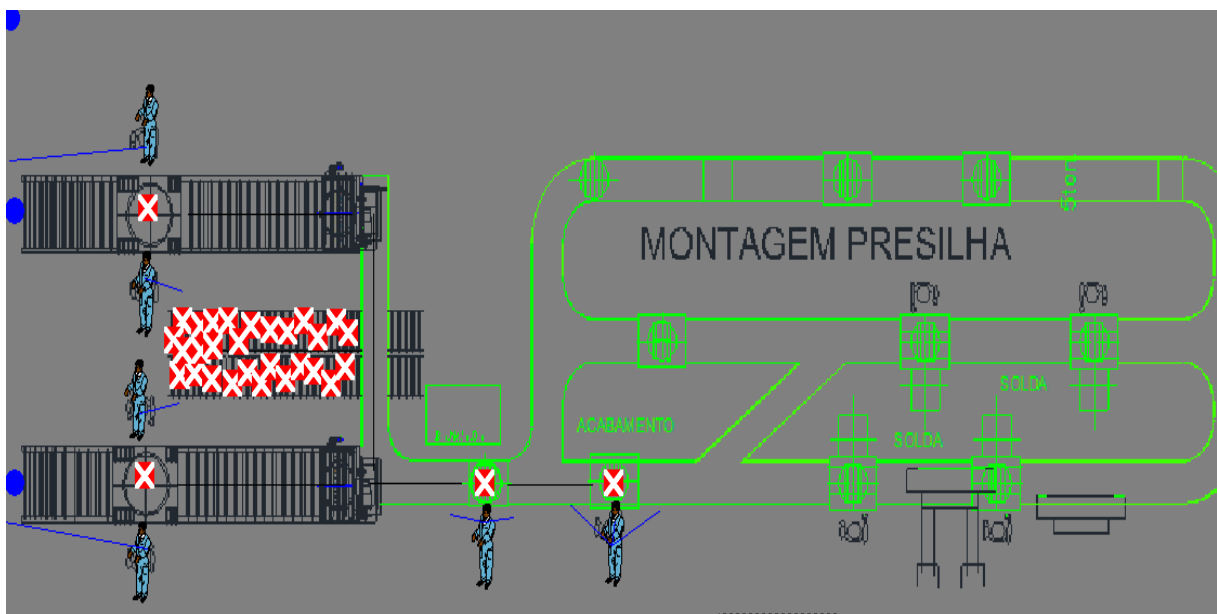
A mescla destes modelos compuseram o modelo computacional e permitiram, com a integração dos seus componentes, a execução da simulação. A Figura 10 apresenta os modelos conceitual e o computacional, para que seja possível identificar, em conjunto, ambas as representações do sistema real.

**Figura 8** – Modelo do início da linha de montagem



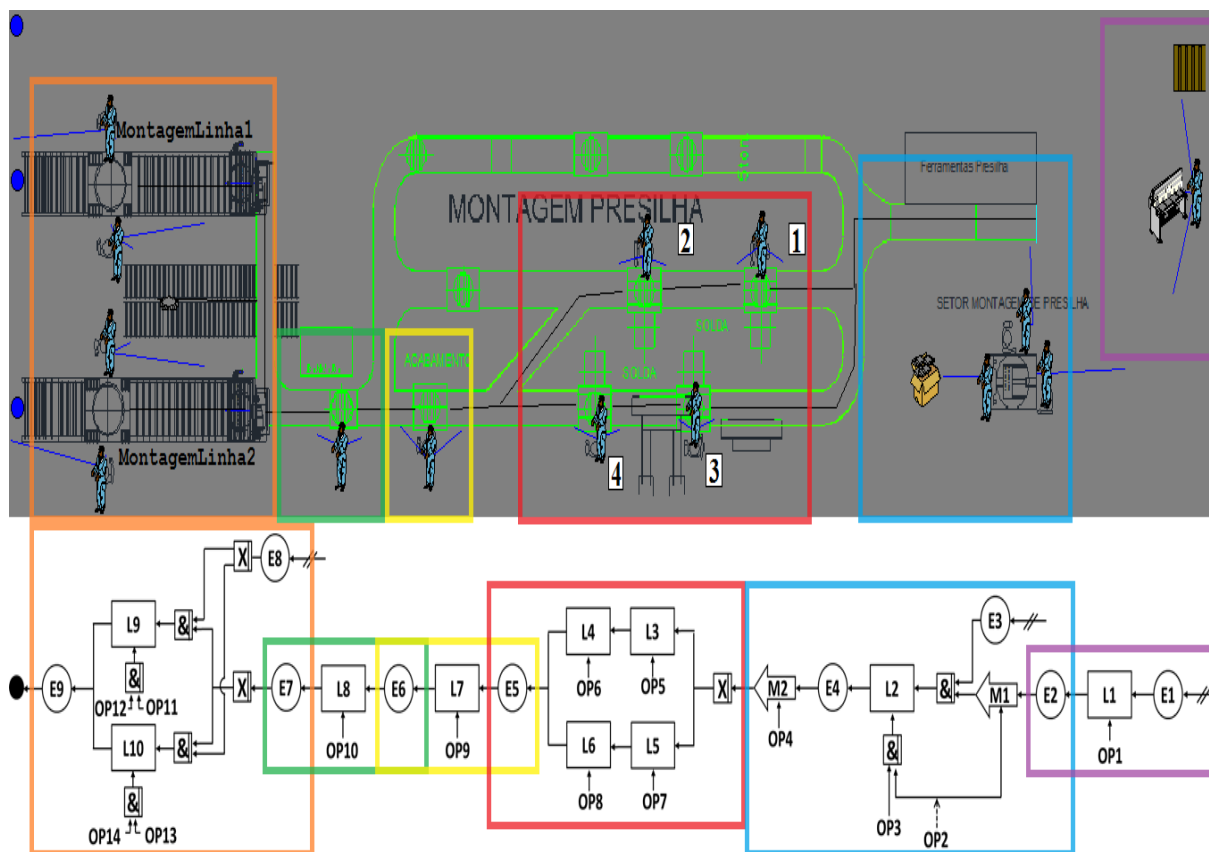
Fonte: Empresa estudada.

**Figura 9** – Modelo do final da linha de montagem



Fonte: Empresa estudada.

**Figura 10** – Modelo IDEF-SIM e modelo computacional



**Fonte:** Empresa estudada.

Após a criação do modelo computacional, passou-se para a etapa de verificação e validação. A verificação foi conduzida de forma visual, e com ajuda do rastreador de erros do software, tendo como objetivo verificar que se o modelo estava sendo executado corretamente. Alguns erros de programação foram observados e corrigidos, permitindo uma execução que representasse com maior fidelidade a forma como o sistema real funcionava.

Já a validação buscou garantir que o modelo gerasse resultados coerentes com a realidade. A técnica utilizada para validar o modelo foi a comparação do desempenho real com o simulado utilizando dados históricos.

Foram selecionados quatro períodos de produção sem causas especiais notificadas, sua produção foi simulada e calculou-se as respectivas eficiências pela divisão do total produzido pela capacidade de produção, conforme está na Tabela 5.

**Tabela 5** – Validação: comparação entre resposta real e simulada dos sistemas

Dia	Eficiência	Tempo REAL para produção	Tempo SIMULADO para produção	Erro
16/mês 1	78,81%	5h10min	5h18min	2,36%
06/mês 2	75,64%	5h57min	6h4min	1,80%
16/mês 2	66,47%	3h17min	3h28min	5,20%
27/mês 2	66,26%	6h01min	6h10min	2,68%

**Fonte:** Empresa estudada.

Com o maior erro observado foi de 5,2%, levando-se em consideração que é uma linha de montagem operada manualmente, pode-se considerar que o modelo simulado estaria validado, conforme opinião unânime dos gestores consultados.

Com o modelo validado, tornou-se possível utilizá-lo em busca de oportunidades de melhoria. Utilizando o *mix* definido, já apresentado na Tabela 4, e uma eficiência média estabelecida de 79,5% foram executadas 100 replicações de simulação.

Isso permitiu que fossem construídos intervalos de confiança para as eficiências medidas das linhas com  $\alpha = 5\%$  (ver Eq. 1, 2 e 3), o que atende ao que é sugerido na literatura (Chung, 2004), para se ter uma precisão melhor do que 10%.

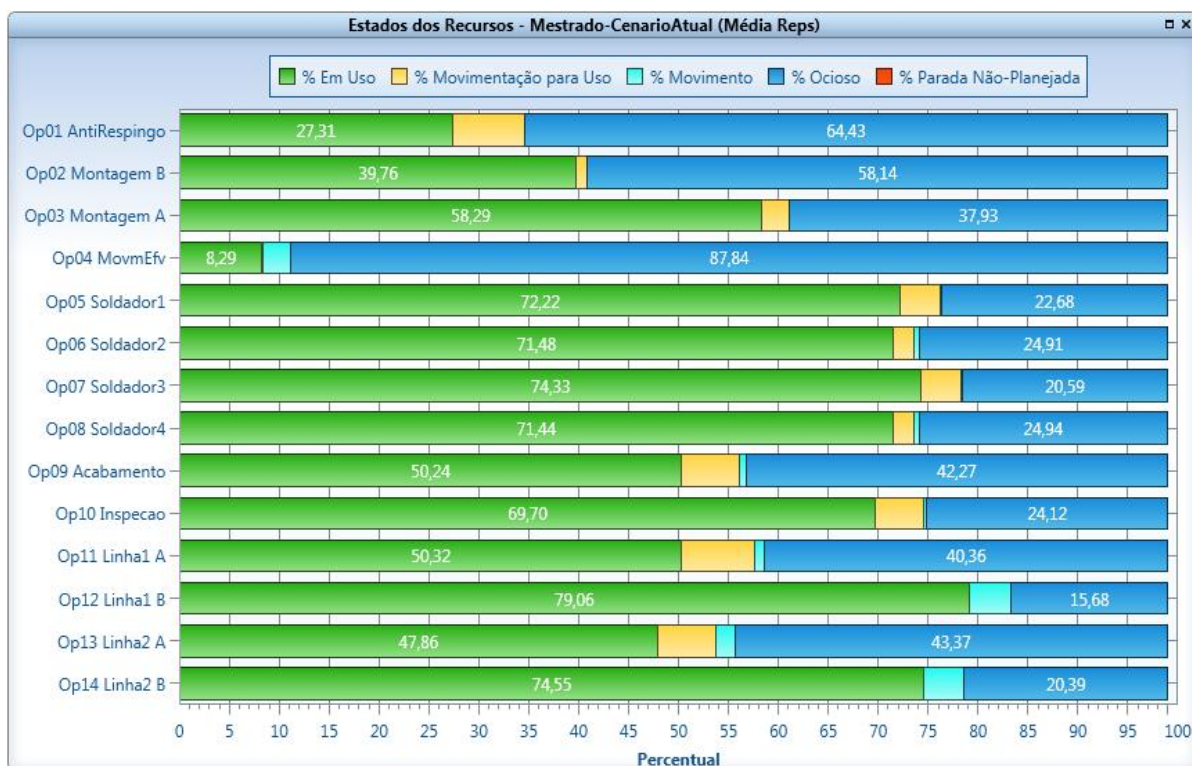
Os resultados médios então foram analisados e oportunidades verificadas. Na Figura 11 pode-se ver o padrão de utilização dos operadores na condição atual.

Pode-se observar um desbalanceamento claro ao se comparar os níveis de utilização do Op01 (27,31%), Op02 (39,76%) e principalmente do Op04 (8,29%), com relação aos demais (superiores a 50%).

Há também certo desbalanceamento nas operações de montagem (Op11 e Op12, Op13 e Op14), porém estas não serão alteradas, pois havia um projeto de inclusão de operações após a montagem que já fazia uso dos recursos Op11 e Op13. As Figuras 12 e 13 detalham os dados de utilização destes operadores.

Observou-se, também, que havia uma diferença na movimentação exercida pelos soldadores Op05 e Op07 em comparação com Op06 e Op08. Isto se devia à dificuldade de acesso às rodas por parte do primeiro soldador de cada linha. Como o espaço disponível de *buffer* era pequeno, o soldador gastava algum tempo empurrando as rodas para poder, então, puxar a roda a ser processada para seu posto de trabalho.

**Figura 11** – Utilização dos recursos: condição atual



Fonte: Empresa estudada.

**Figura 12** – Detalhes dos recursos Op1, Op2, Op3 e Op4



Fonte: Empresa estudada.

**Figura 13** – Detalhes dos recursos Op11, Op12, Op13 e Op14

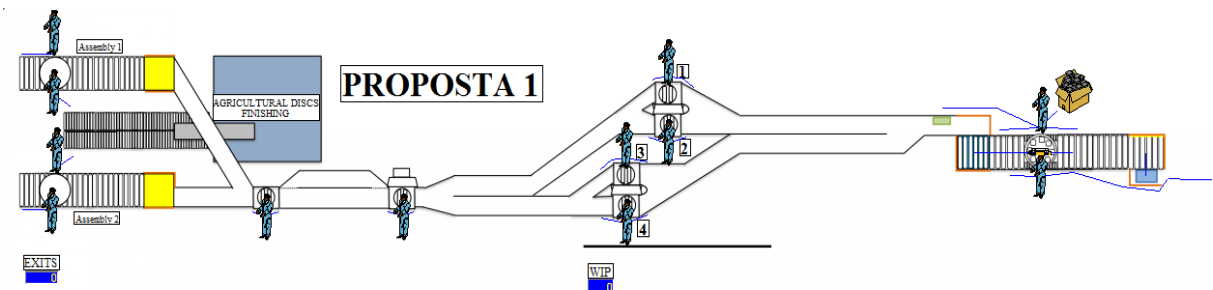


**Fonte:** Empresa estudada.

A partir das observações realizadas e dos resultados das simulações, duas propostas foram elaboradas para melhor balancear a linha.

A primeira proposta pode ser vista na Figura 14, que consistiu em alterar o início da linha de montagem, reduzindo o efetivo atuante de quatro para dois operadores: sairiam Op01 e Op04 e suas tarefas seriam redistribuídas entre Op02 e Op03.

**Figura 14** – Proposta 1

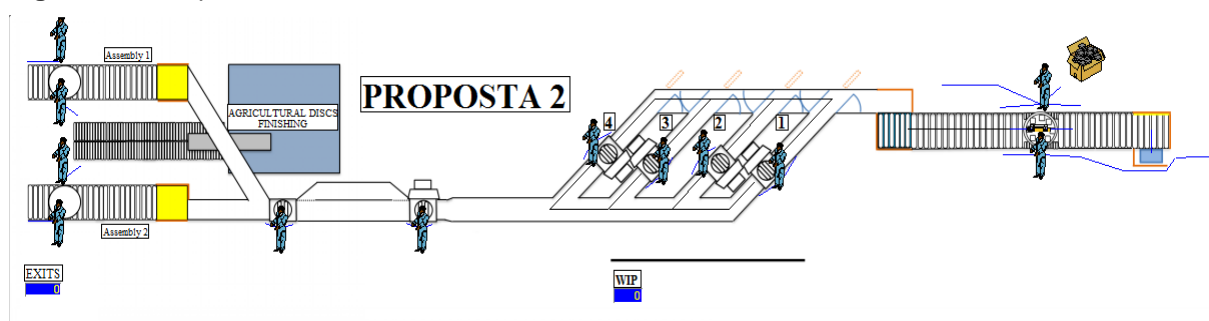


**Fonte:** Empresa estudada.

Destaque-se que, nessa proposta, não houve somente uma mudança de *layout*, mas, também, uma alteração na forma como seriam realizadas as operações, com um novo maquinário para movimentação de peças e aplicação de antirrespingo, o que possibilitou a doção desta nova organização do ambiente de trabalho, sem aumentar exageradamente a carga de trabalho dos operadores.

Também foi sugerida uma alteração nos postos de solda, melhorando o acesso dos soldadores às peças, reduzindo o tempo gasto com movimentação, além ter um impacto positivo na ergonomia.

**Figura 15** – Proposta 2



**Fonte:** Empresa estudada.

A segunda proposta (ver Figura 15) seguiu a mesma ideia da primeira, porém com uma mudança na forma como seriam organizados os postos de solda e a extensão da esteira de roletes, sendo uma alternativa para alcançar os mesmos resultados da proposta 1.

Esta proposta 2 facilitaria a entrada de peças processadas em outras estações, como as rodas com trilhos internos, que têm uma passagem pela solda desta linha. Estas rodas não foram abordadas no estudo, pois não apresentavam um volume relevante de produção. Porém, caso algum membro da empresa discordasse do *layout* da proposta 1, mesmo sabendo do baixo volume desta roda, a proposta 2 traria uma resposta clara e já pronta para este questionamento.

Montadas as propostas, iniciaram-se as simulações. Com os parâmetros já descritos previamente foram executadas as 100 replicações, conforme justificativa já apresentada. Os resultados da utilização das operações são ilustrados nas Figuras 16 e 17.



**Figura 16** – Proposta 1: Resultados dos detalhes de utilização das operações



Fonte: Empresa estudada.

**Figura 17** – Proposta 2: Resultados dos detalhes de utilização das operações

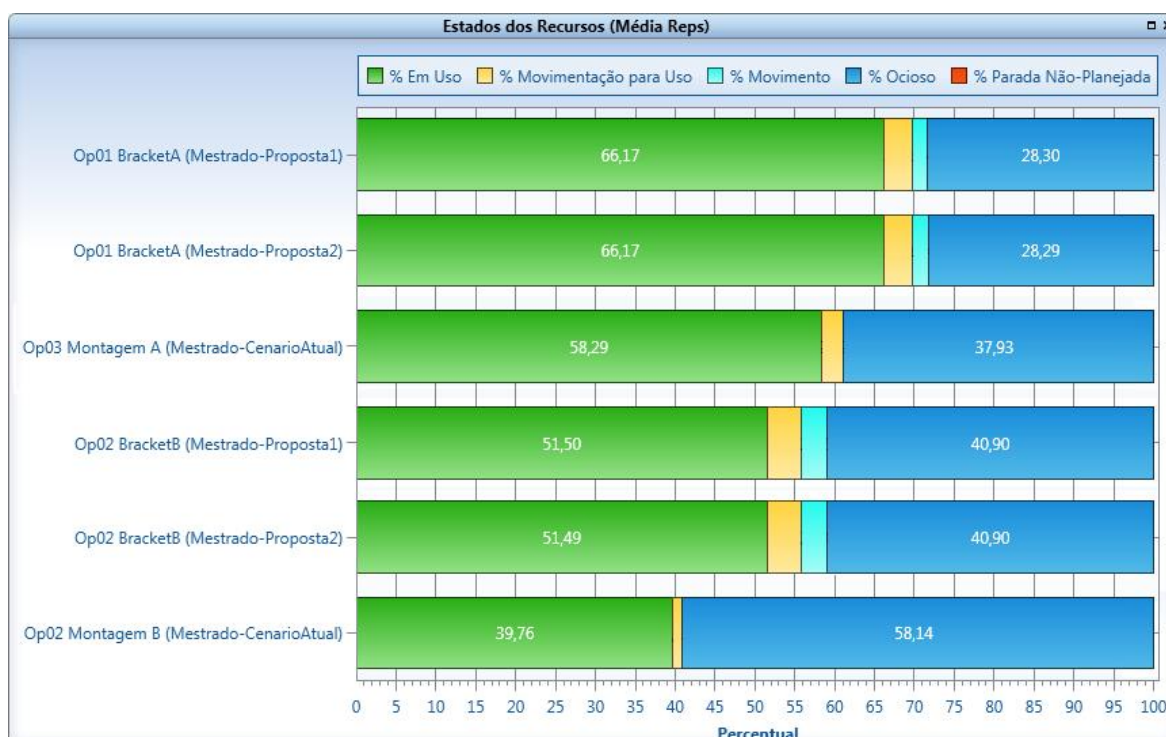


Fonte: Empresa estudada.



Na Figura 18 observa-se os níveis de utilização dos operadores de pontear, no início da linha. Nota-se, também, que há um melhor aproveitamento destes recursos, e que, mesmo agregando as funções dos operadores de movimentação e aplicação de antirrespingo, presentes na situação atual, não se exigiria muito mais dos operadores remanescentes. Assim, essa mão-de-obra poderia ser aproveitada em outras funções na empresa, onde existisse tal necessidade.

**Figura 18** – Comparação entre cenários: utilização dos operadores de pontear



**Fonte:** Empresa estudada.

**Tabela 6** – Comparação entre cenários: tempo para produção do lote fictício

Cenários	Duração em horas
Atual	5,87
Proposta1	5,83
Proposta2	5,83

**Fonte:** Empresa estudada.

Finalizando esta análise, foi feita a comparação de desempenho produtivo para se verificar se as alterações na linha e, principalmente, a redução do efetivo, afetariam de alguma forma a produtividade do sistema estudado. A Tabela 6 mostra

a comparação entre os cenários com relação ao tempo para produção do lote fictício.

Com o balanceamento da linha de montagem e alterações de *layout* foi possível observar um ganho em produtividade, conforme está na Tabela 6, e que, considerando-se 01 ano de atividades nesta linha, teriam um impacto econômico interessante para a empresa, além da possibilidade de se realocar dois colaboradores em outras operações mais críticas.

## 5 CONCLUSÕES

Como se pode constatar, devido à grande quantidade de variáveis na linha de montagem e a complexidade do sistema e número de eventos, a modelagem e simulação apresentaram-se como ferramentas viáveis que permitem uma maior compreensão do funcionamento do sistema e possibilitam a realização de análises com mudanças nos valores das variáveis.

Pode-se afirmar que o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, especificados na Seção 1, foram atingidos com a proposição de um modelo conceitual, por meio do método do IDEF-SIM, e sua implementação no *software* ProModel®, para realizar a simulação de uma linha de montagem.

O modelo foi devidamente validado e aprovado pelos gestores da empresa, e após sua implementação, como pode ser verificado na Seção 4, os resultados indicaram alternativas viáveis para propiciar melhorias no balanceamento da carga de trabalho de operadores e máquinas em uma empresa do setor automotivo.

Destaque-se que, conforme apontado na literatura consultada, a técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM possibilitou visualizar várias soluções antes mesmo de fechar o ciclo de trabalho da simulação.

Adicionalmente, constatou-se que todos os recursos e ferramentas disponíveis no *software* ProModel® conseguiram suprir as necessidades do modelo de simulação de acordo com as características do sistema, sendo que o maior tempo gasto foi no levantamento dos dados pois a quantidade de eventos dentro de sistema era grande. Sendo assim, além de validar o modelo atual da linha de fabricação estudada, a simulação mostrou oportunidades de melhorias.

De fato, foram identificadas oportunidades de serem reduzidas as quantidades de recursos utilizados na linha de fabricação estudada, a partir das propostas 1 e 2 que foram testadas e aprovadas, e que não eram consideradas pelos gestores antes do uso da simulação.

Quanto às questões de pesquisa, conforme está na Seção 1, e que motivaram o desenvolvimento desse trabalho, a técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM aliada ao software de simulação adotado possibilitou responder de forma assertiva a todas elas.

Finalmente, vale destacar que o procedimento de simulação, aqui descrito, criou uma cultura de conhecimento na empresa estudada e abriu a possibilidade e o interesse dela em aplicá-lo em outras células do processo produtivo.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, J. V. S., MONTEVECHI, J. A. B., MIRANDA, R. C., SOUSA JUNIOR, W. T. Metamodel-based simulation optimization: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 114, 102403, 2022.

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 4th. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

BUDDE, L. L. S., HAENGGI, R., FRIEDLI. Use of DES to develop a decision support system for lot size decision-making in manufacturing companies. **Production & Manufacturing Research**, v.10, n.1, 494-518, 2022.

BONGOMIN, O.; MWASIAGI, J.I.; NGANYI, E.O.; NIBIKORA, I. A complex garment assembly line balancing using simulation-based optimization. **Engineering Reports**, v.2, n.11, p. 1-23, 2020.

CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. 4ª Edição: Teoria e Aplicações. Elsevier Brasil, 2014.

CHUNG, C. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. CRC Press LLC, 2004.

FERREIRA, W. P., ARMELLINI, F., De Santa-Eulalia, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, 149, 106868, 2020.

FU, M. C. **Handbook of simulation optimization**. Springer, 2015.

HOEFLER, T.; JEANNOT, E.; MERCIER, G. An Overview of Process Mapping Techniques and Algorithms in High-Performance Computing. Emmanuel Jeannot

and Julius Zilinskas. **High Performance Computing on Complex Environments**, Wiley, p.75-94, 2014.

HUNT, V. D. **Process Mapping: How to Reengineer your Business Process**. John Wiley & Sons, New York, 1996.

JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASEER, A.; STERGIOULAS, L. K.; YOUNG, T. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v.203, n.1, p.1-13, 2010.

KANG, P. S., BHATTI, R. S. Continuous process improvement implementation framework using multi-objective genetic algorithms and discrete event simulation. **Business Process Management Journal**, v.25, n.5, 1020-1039, 2018.

KIRIS, S.B.; ERYARSOY, E.; ZAIM, S.; DELEN, D. An integrated approach for lean production using simulation and data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, v.320, n.2, p. 863-886, 2023.

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. de; MONTEVECHI, J. A. B.. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação por meio de elementos do IDEF. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, **Anais [...]** João Pessoa, PB, 2008.

LEAL F.; SANTOS G.; RIBEIRO S.; QUEIROZ J.; ROCHA F. Aplicação do mapeamento do fluxo de valor integrado a simulação a eventos discretos para identificar desperdícios em uma fabrica de laticínios *In*: XLVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, **Anais [...]**, Salvador, 2014.

LEAL, Fabiano. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura por meio de projeto de experimentos simulados**. 2008. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

MIRANDA, R. C., MONTEVECHI, J. A. B., SILVA, A. F., MARINS, F. A. S. A New Approach to Reducing Search Space and Increasing Efficiency in Simulation Optimization Problems via the Fuzzy-DEA-BCC. **Mathematical Problems in Engineering**, 1–15, 2014.

MIRANDA, R. C., MONTEVECHI, J. A. B., SILVA, A. F., MARINS, F. A. S. Increasing the efficiency in integer simulation optimization: Reducing the search space through data envelopment analysis and orthogonal arrays. **European Journal of Operational Research**, v. 262, 673-681, 2017.

MONTEVECHI, J. A. B.; PINHO, AL. F.; LEAL, F.; MARINS, F. A. S. Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. *In*:

**Proceedings of the 39th conference on Winter simulation: 40 years! The best is yet to come.** IEEE Press, p. 1601-1609, 2007.

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. *In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE*, Baltimore, USA, 2010.

PINHO, A. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. Avaliação de um método de otimização proposto para modelos de simulação a eventos discretos. *In: XLI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, Anais [...]*, Porto Seguro, 2009.

PINTO, W. G. M., MONTEVECHI, J. A. B., MIRANDA, R. C., SANTOS, C. H., PEREIRA, A. B. M. Optimisation Via Simulation Applied to Reverse Logistics: A Systematic Literature Review. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 22, n. 1, 29-40, 2023.

RAZALI, M. M., RASHID, M.F.F.A.; MAKE, M.R.A. Optimization of automotive manufacturing layout for productivity improvement. **Journal of Mechanical Engineering**, v. SI4, n.1, p.171-184, 2017.

REKIEK, B., DOLGUI, A., DELCHAMBRE, A.; BRATCU, A. State of art of optimization methods for assembly line design. **Annual Reviews in Control**, v. 26, n. 2, p.163-174, 2002.

SAMANT, S.; MITTAL, V.K.; PRAKASH, R. Resource optimisation for an automobile chassis manufacturer through value stream mapping enhanced with simulation technique and constraint programming. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 28, n. 3, p.379-401, 2018

Sousa Junior, W. T., Montevechi, J. A. B., Miranda, R. C., Campos, A. T. Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 128, 526-540, 2019.

ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 3, p.278-290, 2008.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA*, 2009.

TIACCI, L. Mixed-model U-shaped assembly lines: Balancing and comparing with straight lines with buffers and parallel workstations. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 45, p. 286-305, 2017.

## **AUTORES**

### **Lucio Flore Maciel**

Graduado em Engenharia Mecânica pela UNESP (2006), mestrado em Pesquisa Operacional pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2016). É Gerente de Engenharia na Maxion Wheels do grupo lochpe Maxion. Tem experiência na área de desenvolvimento produtos, processos industriais e simulação de eventos discretos auxiliando tomada de decisão.

### **Aneirson Francisco da Silva**

Graduado em Administração pela UNITRI (2004), Especialização em Economia e Finanças pela UFU (2006), mestrado em Engenharia de Produção pela UNIFEI (2009), doutorado em Engenharia de Produção pela Unesp (2013), e estágio de Pós-doutorado na 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.

### **Elias Carlos Aguirre Rodríguez**

Graduado em Ciências Estatísticas pela Universidade Nacional de Trujillo - Perú (2019) e 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.

### **Fernando Augusto Silva Marins**

Graduado em Engenharia Mecânica pela UNESP (1976), mestrado em Pesquisa Operacional pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1981), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (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: 06/08/2023 e aceito para publicação em: 18/02/2024  
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i4.4967>