



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

BRENO ZERAIK LIMA TURNER

Utilização de simulação a eventos discretos como ferramenta gerencial para auxiliar no planejamento de produção em uma fundição de grande porte

Guaratinguetá
2023

Breno Zeraik Lima Turner

Utilização de simulação a eventos discretos como ferramenta gerencial para auxiliar no planejamento de produção em uma fundição de grande porte

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
Coorientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Guaratinguetá
2023

T944u Turner, Breno Zeraik Lima
Utilização de simulação a eventos discretos como ferramenta gerencial para auxiliar no planejamento de produção em uma fundição de grande porte / Breno Zeraik Lima Turner - Guaratinguetá, 2023.
133 f : il.
Bibliografia: f. 102-112

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto S. Marins
Coorientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

1. Planejamento da produção. 2. Fundição. 3. Métodos de simulação . I. Título.

CDU 658.5

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Primeiramente, destaca-se o avanço tecnológico e a disseminação do conhecimento. Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta gerencial por meio de Simulação a Eventos Discretos, e um fluxograma detalhado foi estruturado com todas as etapas necessárias, desde a concepção até a validação estatística. Dessa forma, este trabalho pode ser utilizado como um guia para o desenvolvimento de modelos de Simulação a Eventos Discretos nos mais diversos setores da indústria, assim como no meio acadêmico.

Além disso, os resultados desta pesquisa permitiram melhorar a eficiência operacional da empresa estudada, que tem como principal atividade a produção de componentes ferroviários. Isso resultou na redução do custo de seus produtos, impactando positivamente toda a cadeia de suprimentos das companhias de transporte ferroviário, tornando-as mais competitivas. Como resultado, as mercadorias chegam ao consumidor final a preços mais acessíveis.

Vale ressaltar que o favorecimento do transporte ferroviário traz um impacto ambiental positivo, pois é considerado uma opção mais amigável ao meio ambiente quando comparado ao transporte rodoviário.

Por fim, a empresa estudada, como um dos poucos *players* no Brasil em seu segmento, enfrenta concorrência global na exportação de componentes ferroviários. Com a melhoria da eficiência operacional, a empresa tem a oportunidade de aumentar sua participação de mercado, o que resulta em geração de empregos e desenvolvimento da economia local, promovendo, assim, o desenvolvimento socioeconômico.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Firstly, technological advances and the dissemination of knowledge stand out. In this piece of work, a management tool has been developed by means of Discrete Event Simulation, and a detailed flowchart has been structured with all necessary steps, from conception to statistical validation. Thus, this study can be used as a handbook for the development of Discrete Event Simulation models in the most diverse sectors of industry, as well as in academia.

Furthermore, the results of this piece of research have improved the operational efficiency of the company studied, which is primarily involved in the production of railcar components. This has resulted in cost reduction of its goods, positively impacting the entire supply chain of railroad companies, making them more competitive. As a result, goods reach the final consumer at more affordable prices.

It is noteworthy that favoring rail transport has a positive environmental impact, as it is considered a more environmentally friendly option when compared to road transport.

Finally, the company studied, as one of the few players in Brazil in its sector, faces global competition in the export of railcar components. With the improvement in operational efficiency, the company might increase its market share, resulting in job creation and development of the local economy, thus promoting socioeconomic development.

BRENO ZERAIK LIMA TURNER

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: MESTRADO PROFISSIONAL**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 GISLAINE CRISTINA BATISTELA
Data: 15/05/2023 07:36:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. Gislane Cristina Batistela
Coordenadora - PPGE-PP

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Data: 20/03/2023 08:56:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Orientador - UNESP
participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 ERICA XIMENES DIAS
Data: 12/05/2023 19:36:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. ERICA XIMENES DIAS
EEL/USP
participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente
 FABRÍCIO MACIEL GOMES
Data: 24/03/2023 18:28:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES
EEL/USP
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

BRENO ZERAIK LIMA TURNER

NASCIMENTO 27/04/1989

FILIAÇÃO Eduardo Turner
Maria Lígia Zeraik Lima Turner

2007/2012 Graduação em Engenharia Mecânica
UNIFEI - Itajubá

Dedico este trabalho à minha esposa, Maíra, minhas filhas, Alice e Betina, e aos meus pais, Eduardo e Lígia, que acompanharam de perto, todo meu esforço para concluir esta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de vida e graça, pelas oportunidades que sempre colocou em meu caminho e pela força necessária para persistir nos momentos mais difíceis e para concluir este trabalho;

à minha esposa, Maíra, e minhas filhas, Alice e Betina, por todo o apoio, amor e carinho, pela compreensão nos momentos de ausência e por me motivarem quando o cansaço me alcançava;

igualmente aos meus pais, Eduardo e Lígia, e irmãos, Caio e Henrique, por me guiarem com exemplos que carrego comigo, por me apoiarem em todas as adversidades e por sempre incentivarem meus estudos;

à minha tia, Beatriz, e à memória de meu tio, Chammas, pela consideração que sempre tiveram comigo e que me cederam hospedagem, todas as vezes em que as aulas foram ministradas no câmpus de São Paulo;

ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva, que me acompanharam durante toda a jornada, pelas contribuições valiosas a este trabalho, pelos ensinamentos, paciência e prontidão;

aos professores Erica, Fabrício e Messias, pelas participações nas bancas de qualificação e defesa e pelas sugestões de ajustes e melhorias deste trabalho;

à Amsted Maxion, em especial, aos meus gestores, José Benedito, Mário e Luciano e à gestora de Recursos Humanos, Mariana, por acreditarem em mim, pela oportunidade que me foi dada e por entenderem que a minha participação neste programa seria importante para a empresa e para o meu crescimento profissional;

a todos os colegas de trabalho que contribuíram com seu tempo e conhecimento para me ajudar a desenvolver este trabalho;

ao meu amigo, João Victor, pela presteza, vontade de ajudar e por me auxiliar na modelagem computacional. Sem ele, certamente, este trabalho não seria concluído;

à minha professora de inglês, Márcia, que me ajudou com a revisão e correção dos textos em inglês, sempre com muita disposição e boa vontade;

a todos os professores e servidores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento;

por fim, à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que sempre terei uma dívida de gratidão. Sinto-me extremamente grato por tudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Amsted Maxion (AM).

“A persistência é o caminho do êxito”
Charles Chaplin

RESUMO

Em um contexto de crescente competitividade, o Planejamento e Controle de Produção vem desempenhando papel fundamental nas corporações e tem sido visto como elemento crítico para o sucesso de qualquer organização. Sobretudo em uma fundição, a tarefa de programar a produção é bastante complexa, dadas as características peculiares de seus processos. Enquanto a fabricação de aço corresponde a um processo em batelada, a produção de moldes opera em um fluxo contínuo. Deste modo, o Planejamento e Controle de Produção, numa fundição, tem o desafio de garantir o sincronismo dessas duas atividades, distintas entre si, mas que operam de forma simultânea. Apesar de existirem trabalhos relacionados à programação de produção em fundições, não foram identificadas, na revisão de literatura, pesquisas que abordaram a utilização de Simulação a Eventos Discretos para auxiliar no planejamento de produção. Nesse sentido, este trabalho mostrou-se inovador ao utilizar Simulação a Eventos Discretos para desenvolver uma ferramenta gerencial, com o objetivo de propor soluções viáveis para diminuir o *Work in Progress* nos pátios de vazamento, de modo a impedir a ocorrência de bloqueios nas linhas de moldagem. Adotou-se a técnica IDEF-SIM para a modelagem conceitual e um *software* comercial para construção do modelo computacional. O modelo foi validado estatisticamente por meio de uma técnica para dados normais, e a ferramenta desenvolvida provou-se apropriada para responder questões de planejamento de níveis operacional, tático e estratégico. Diferentes cenários foram experimentados e as respostas das simulações auxiliaram a gerência da empresa em processos de tomada de decisão, de determinação de escalas de trabalho a definição de investimentos em modernização de equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE: fundição; planejamento e controle de produção; simulação a eventos discretos; IDEF-SIM.

ABSTRACT

Under the increasing competitiveness environment, Production Planning and Control has been playing a key role in corporations and has been seen as a critical element for the success of any organization. Especially in a foundry, the task of scheduling is quite complex, given the specific characteristics of its processes. While melting is a batch process, moldmaking is a one-piece flow system. Hence, Production Planning and Control in a foundry has the challenge of guaranteeing the synchronism between these two processes, which are distinct, but operate simultaneously. Although there are researches related to production planning in foundries, studies which addressed the use of Discrete Event Simulation to assist in the production planning task have not been identified. Thus, this piece of research has been proved to be innovative by using Discrete Event Simulation to develop a management tool whose objective is to propose viable solutions to reduce the Work in Progress in the pouring floor in order to prevent the occurrence of blockage in the molding lines. The IDEF-SIM technique has been adopted to develop the conceptual modeling and a commercial software has been used to build the computational model. The model has been statistically validated by means of a technique for normal distributions and the developed tool has been demonstrated to be useful to answer production planning questions at operational, tactical, and strategic levels. Different scenarios have been experimented and the outputs have supported the company management in decision-making processes, from determining work shifts to defining investments in equipment modernization.

KEYWORDS: foundry; production planning and control; discrete event simulation; IDEF-SIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais mercados consumidores de fundidos no Brasil.....	19
Figura 2 – Matriz de planejamento da cadeia de suprimentos.....	21
Figura 3 – Número de publicações para os itens 1 e 2	26
Figura 4 – Publicações categorizadas por área de estudo para o item 1	27
Figura 5 – Publicações categorizadas por área de estudo para o item 2.....	27
Figura 6 – Principais países com publicações contendo as palavras-chaves do item 1	28
Figura 7 – Principais países com publicações contendo as palavras-chaves do item 2.....	28
Figura 8 – Número de publicações para os itens 4 e 9	29
Figura 9 – Rede de coocorrência de palavras-chaves do item 4.....	30
Figura 10 – Rede de coautoria por países do item 4.....	31
Figura 11 – Rede de coocorrência de palavras-chaves do item 9.....	31
Figura 12 – Classificação da pesquisa científica	34
Figura 13 – Fluxograma de processo de modelagem	36
Figura 14 – Processo de transformação da administração da produção.....	39
Figura 15 – Escala de tempo das atividades do PCP e seus respectivos objetivos.....	41
Figura 16 – Evolução dos sistemas de PCP.....	43
Figura 17 – Etapas de um projeto de Simulação a Eventos Discretos.....	51
Figura 18 – Teste de normalidade para amostra de dados <i>tap to tap</i> , realizado por meio do Minitab®.....	68
Figura 19 – Teste de aderência de distribuições para amostra de dados <i>tap to tap</i> , realizado por meio do Stat::Fit®	69
Figura 20 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 300, realizado por meio do Minitab®.....	70
Figura 21 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 150, realizado por meio do Minitab®.....	70
Figura 22 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 301, realizado por meio do Minitab®.....	71
Figura 23 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo do Sistema S1, realizado por meio do Minitab®.....	74
Figura 24 – Teste de aderência de distribuições para amostra de tempos de ciclo de desmoldagem do Sistema S1, realizado por meio do Stat::Fit®	74
Figura 25 – Planilha de chegada de entidades no simulador	76

Figura 26 – Escala de trabalho da Linha 150	77
Figura 27 – Teste de normalidade para os dados de saída da simulação	85
Figura 28 – Teste de normalidade para os dados de saída da simulação sem <i>outliers</i>	86
Figura 29 – Teste de normalidade para os dados de produção real com ajuste de tamanho amostral.....	87
Figura 30 – Histograma Teste t pareado.....	88
Figura 31 – Estados das linhas de moldagem – Cenário 1	89
Figura 32 – Utilização das pontes rolantes F6703 e F6730 – Cenário 1	90
Figura 33 – Estados da Linha 150 – Cenário 2.....	92
Figura 34 – Área disponível no pátio de vazamento da Linha 150 – Cenário 2.....	92
Figura 35 – Estados da Linha 301 – Cenário 3.....	93
Figura 36 – Estados das linhas de moldagem – Cenário 4	95
Figura 37 – Área disponível no pátio de vazamento da Linha 300 – Cenário 4.....	96
Figura 38 – Utilização da ponte rolante F6703 – Cenário 4.....	96
Figura 39 – Estados da Linha 300 e do Sistema S1 – Cenário 5	98
Figura 40 – Área disponível no pátio de resfriamento da Linha 300 – Cenário 5.....	98
Figura 41 – Planta baixa da área geradora de fundidos e identificação das linhas de moldagem	114
Figura 42 – Planta baixa da Linha 300 e pátio de vazamento da Linha C2	115
Figura 43 – Planta baixa da Linha 150	116
Figura 44 – Planta baixa da Linha 301	117
Figura 45 – Planta baixa da Linha C2	118
Figura 46 – Modelo computacional desenvolvido no <i>software</i> ProModel®.....	119
Figura 47 – IDEF-SIM Linha 300	120
Figura 48 – IDEF-SIM Linha 150	121
Figura 49 – IDEF-SIM Linha 301	122
Figura 50 – IDEF-SIM Linha C2.....	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM.....	56
Quadro 2 – Resumo das distribuições estatísticas utilizadas na validação do modelo computacional.....	75
Quadro 3 – Escalas de trabalho das linhas de moldagem.....	77
Quadro 4 – Escala de trabalho da Linha 150, considerando apenas um turno	91
Quadro 5 – Quadro resumo da distribuição estatística utilizada no Cenário 2.....	91
Quadro 6 – Escala de trabalho da Linha 150, considerando apenas um turno	93
Quadro 7 – Quadro resumo das distribuições estatísticas utilizadas no Cenário 3	93
Quadro 8 – Quadro resumo das distribuições estatísticas utilizadas no Cenário 4	94
Quadro 9 – Elementos presentes na Figura 47	120
Quadro 10 – Elementos presentes na Figura 48	121
Quadro 11 – Elementos presentes na Figura 49	122
Quadro 12 – Elementos presentes na Figura 50	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mundial de fundidos	20
Tabela 2 – Publicações na base de dados Scopus.....	25
Tabela 3 – Sistema de desmoldagem de acordo com a linha de moldagem.....	72
Tabela 4 – Linha de moldagem de acordo com o sistema de desmoldagem.....	73
Tabela 5 – Produção de moldes nas linhas de moldagem e corridas na aciaria	81
Tabela 6 – Dados de saída do modelo para 42 replicações	83
Tabela 7 – Produção de moldes – Cenário 4	94
Tabela 8 – Produção de moldes – Cenário 5	97
Tabela 9 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos.....	124
Tabela 10 – <i>Tap to tap</i> Aciaria	129
Tabela 11 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 300.....	130
Tabela 12 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 150.....	131
Tabela 13 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 301.....	132
Tabela 14 – Tempo de ciclo de desmoldagem no Sistema S1	133

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
PCP	Planejamento e Controle de Produção
WIP	<i>Work in Progress</i>
OTD	<i>On-Time Delivery</i>
JSS	<i>Job Shop Scheduling</i>
MIP	<i>Mixed Integer Programming</i>
PL	Programação Linear
HDMGWO	<i>Hybrid Discrete Multi-Objective Grey Wolf Optimizer</i>
SED	Simulação a Eventos Discretos
OvS	Otimização via Simulação
IDEF-SIM	<i>Integrated DEFinition Methods – SIMulation</i>
ROP	<i>Reorder Point</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MRP II	<i>Manufacturing Resource Planning</i>
MES	<i>Manufacturing Execution Systems</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
APS	<i>Advanced Planning and Scheduling</i>
SBA	Simulação Baseada em Agentes
SD	Sistemas Dinâmicos
BPM	<i>Business Process Modeling</i>
ACD	<i>Activity Cycle Diagram</i>
SSM	<i>Soft System Methodology</i>
DEVS	<i>Discrete Event Systems Specifications</i>
IDEF0	<i>Integration DEFinition for Process Modeling</i>
IDEF3	<i>Integrated DEFinition for Process Description Capture Method</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
MTO	<i>Make to Order</i>
GIGO	<i>Garbage In Garbage Out</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DA PESQUISA.....	19
1.2	OBJETIVOS, DELIMITAÇÃO, JUSTIFICATIVAS DE PESQUISA.....	23
1.3	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	33
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS.....	34
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	38
2	REFERENCIAL TEÓRICO	39
2.1	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO.....	39
2.1.1	Evolução dos sistemas de PCP	43
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	45
2.3	SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS.....	47
2.4	INTEGRAÇÃO ENTRE PCP E SED.....	51
2.5	MODELAGEM CONCEITUAL.....	54
2.5.1	Técnica de modelagem IDEF-SIM	55
3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA	58
3.1	A EMPRESA OBJETO DE ESTUDO.....	58
3.2	DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	59
3.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO OBJETO DE ESTUDO.....	66
3.3.1	Coleta e tratamento dos dados de entrada	67
3.3.2	Parâmetros de entrada complementares	76
3.3.3	Regime transitório e regime permanente	78
3.3.4	Escolha da variável de resposta adequada	78
3.3.5	Verificação do modelo computacional	79
3.3.6	Execução do modelo e validação estatística	80
3.4	RESULTADOS OBTIDOS E CENÁRIOS EXPERIMENTADOS.....	88
3.4.1	Panorama atual	88
3.4.1.1	Cenário 1.....	88
3.4.2	Alteração de escalas de trabalho	90
3.4.2.1	Cenário 2 – Linha de moldagem 150.....	90
3.4.2.2	Cenário 3 – Linha de moldagem 301.....	93
3.4.3	Aumento de demanda	94
3.4.3.1	Cenário 4 – Mesmos recursos.....	94

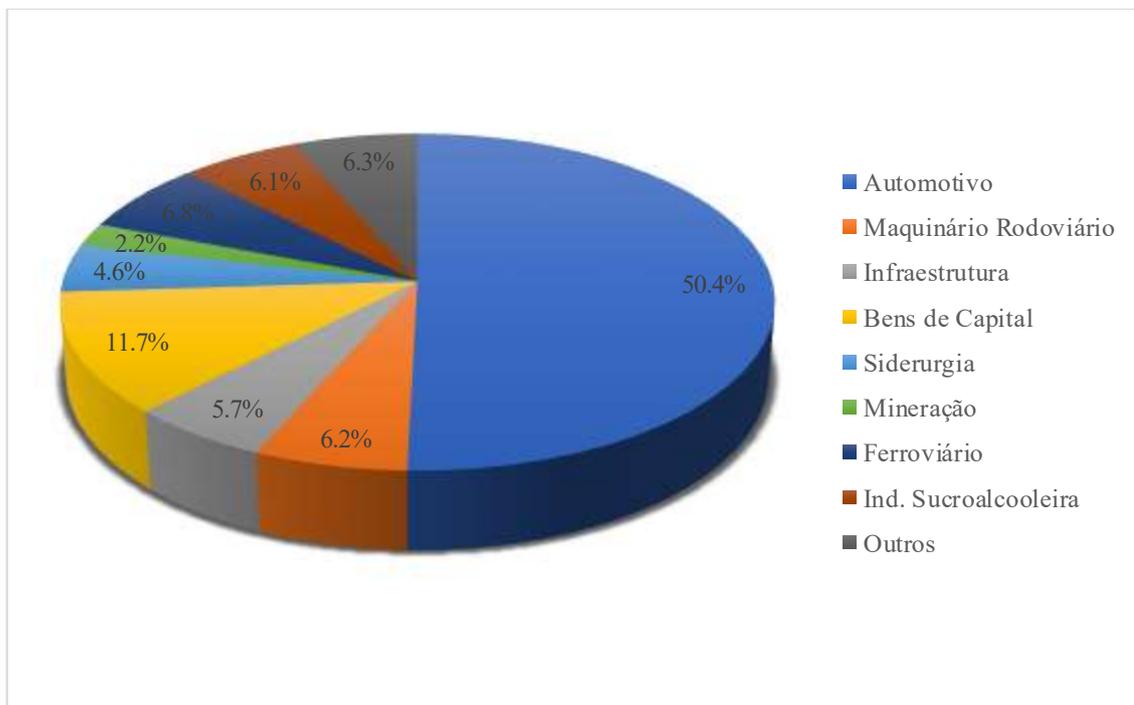
3.4.3.2	Cenário 5 – Acrescentada ponte rolante F6720	97
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99
4	CONCLUSÕES	100
4.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA 100	
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS.....	102
	ANEXO A – VISÃO DA EMPRESA PATROCINADORA.....	113
	ANEXO B – APRESENTAÇÃO DAS PLANTAS BAIXAS E IDENTIFICAÇÃO DOS OBJETOS RELEVANTES.....	114
	ANEXO C – APRESENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO.....	119
	ANEXO D – APRESENTAÇÃO DOS MODELOS CONCEITUAIS CONSTRUÍDOS POR MEIO DA TÉCNICA IDEF-SIM.....	120
	ANEXO E – PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO DOS FUNDIDOS.....	124
	ANEXO F – TEMPO DE CICLO DE PROCESSOS.....	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DA PESQUISA

O setor de fundição caracteriza-se especialmente pela produção de bens intermediários, ou seja, sua produção é quase que em sua totalidade voltada para as indústrias em geral, e apenas uma pequena parcela é destinada diretamente ao consumidor final (SILVA; MORABITO, 2004). Os principais mercados consumidores de fundidos são apresentados na Figura 1, numa projeção realizada pela Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) para o ano de 2020 (ABIFA, 2020a).

Figura 1 – Principais mercados consumidores de fundidos no Brasil



Fonte: ABIFA (2020)

De acordo com o *ranking* divulgado pela *American Foundry Society* (2019), a produção brasileira de fundidos foi de 2,28 milhões de toneladas no ano de 2018, o que coloca o Brasil na nona posição entre os maiores produtores globais, com um total de 1.024 plantas ativas, conforme disposto na Tabela 1. Além disso, segundo dados da ABIFA (2020b), a indústria brasileira gera pouco mais de 52 mil empregos diretos no setor.

Tabela 1 – Produção mundial de fundidos

Colocação / País	Produção em 2018 (milhões de toneladas)	Número de fundições
1. China	49,35	26.000
2. Índia	13,39	4.600
3. Estados Unidos	10,76	1.935
4. Japão	5,76	1.769
5. Alemanha	5,43	527
6. Rússia	4,20	1.140
7. México	2,91	800
8. Coreia do Sul	2,52	889
9. Brasil	2,28	1.024
10. Itália	2,26	1.044

Fonte: *American Foundry Society* (2019)

Programar a produção em uma fundição não é uma tarefa trivial. Trata-se de um processo bastante peculiar e complexo, pois possui características híbridas com aspectos muito diferenciados entre si. A etapa de fusão corresponde a um processo em batelada, onde a cada ciclo é produzida uma determinada quantidade de aço, que requer, ainda, uma sincronia perfeita com a moldagem, que opera em um fluxo contínuo (*one-piece flow*) (LANDMANN, 2005; HANS; VAN DE VELDE, 2011).

Em um cenário de crescente competitividade e contínua necessidade de redução de custos e atendimento às expectativas, o Planejamento e Controle de Produção (PCP) vem assumindo papel fundamental dentro das companhias, fazendo a ligação entre os níveis estratégico e operacional (JEON; KIM, 2016; SEITZ; NYHUIS, 2015; STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005).

Complementando essa ideia, Upadhyay e Askari-Nasab (2018) indicaram o planejamento como elemento crítico para o sucesso de qualquer operação. Nesse contexto, incluem-se como funções típicas do PCP, o planejamento de requisição de materiais, gerenciamento de demanda, planejamento da capacidade disponível, além da programação e sequenciamento de tarefas.

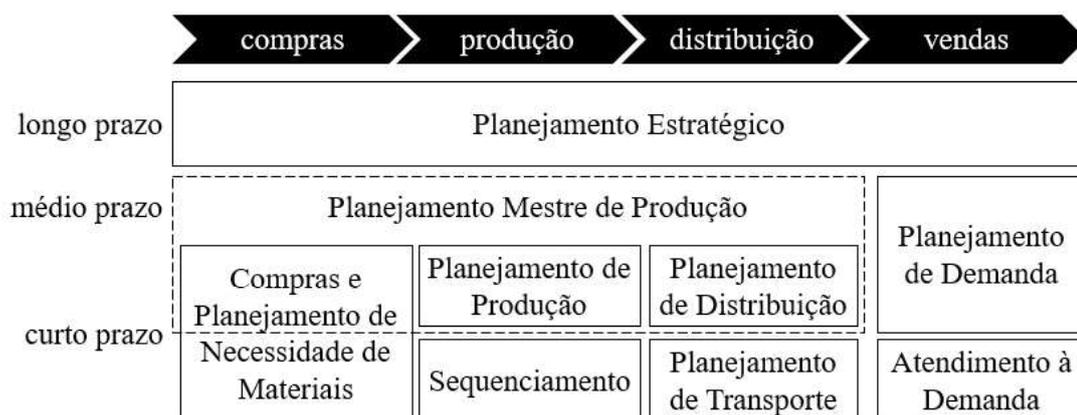
Dentre os objetivos de tais funções destacam-se: reduzir *Work in Progress* (WIP), minimizar *Throughput Time* (tempo de processamento) e prazos de entrega, reduzir custos de estocagem, melhorar a resposta às mudanças na demanda e melhorar a aderência à data de

entrega (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005), o que é, usualmente, medido pelo indicador OTD (*On-Time Delivery*).

Simplificando, pode-se dizer que o PCP é responsável por transformar os pedidos dos clientes em ordens de produção, considerando cronograma de entrega, capacidade instalada e quantidade a ser produzida (GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017; SEITZ; NYHUIS, 2015). Em outras palavras, o PCP deve responder a três perguntas principais: “onde”, “quando” e “quanto” produzir (JEON; KIM, 2016).

Para facilitar o entendimento, a matriz apresentada na Figura 2 aborda as tarefas desempenhadas pelo PCP que vão desde compras e produção até distribuição e vendas, levando em consideração decisões de longo prazo (nível estratégico) a curto prazo (nível operacional) (MARAVELIAS; SUNG, 2009).

Figura 2 – Matriz de planejamento da cadeia de suprimentos



Fonte: Adaptado de Maravelias e Sung (2009)

Enquanto o Planejamento de Produção é responsável pelo dimensionamento de lotes e é relacionado a decisões de médio prazo (nível tático), entende-se por sequenciamento, o planejamento de curto prazo (nível operacional), ou seja, a atribuição de uma quantidade finita de tarefas a um conjunto finito de máquinas (MARAVELIAS; SUNG, 2009; MEYR; WAGNER; ROHDE, 2015).

Os problemas de sequenciamento são comumente abordados na literatura como *job shop scheduling* (JSS). No geral, existem inúmeras pesquisas relacionadas aos problemas de planejamento de produção, dimensionamento de lotes e sequenciamento de tarefas, mas a literatura é pouco extensiva e, raramente são encontrados estudos especificamente voltados para o setor de fundição (ARAUJO; ARENALES; CLARK, 2008; STAWOWY; DUDA, 2017;

TONAKI; TOLEDO, 2010). Passa-se a comentar sobre alguns trabalhos publicados que abordaram esse tema:

- Araujo, Arenales e Clark (2008) propuseram um modelo de Programação Inteira Mista (MIP – *Mixed Integer Programming*) para representar o planejamento de produção em uma fundição de pequeno porte no Brasil, resolvido por meio de métodos heurísticos. Stawowy e Duda (2013) e Stawowy e Duda (2020) abordaram o mesmo problema assumindo como gargalo de produção o forno de fusão e a linha de moldagem respectivamente.
- Tonaki e Toledo (2010) apresentaram uma nova abordagem, decompondo o problema em dois: o sequenciamento de ligas metálicas e o número de itens a serem produzidos em um determinado período. Ambos os subproblemas foram solucionados aplicando heurística Lagrangiana.
- Já Camargo, Mattioli e Toledo (2012) usaram um algoritmo genético e o problema da mochila (*knapsack problem*) para resolver os dois subproblemas.
- Teixeira Junior, Fernandes e Pereira (2010) formularam um modelo de Programação Inteira Binária (*Binary Integer Programming*) e utilizaram um método heurístico para solucioná-lo, visando a redução de custos de produção.
- Com o mesmo propósito, Santos-Meza, Santos e Arenales (2002) estudaram o dimensionamento de lotes em uma fundição automatizada e aplicaram heurísticas específicas para resolver o problema.
- Mais recentemente, Li *et al.* (2017) otimizaram os custos de produção por meio de um algoritmo genético.
- No trabalho publicado por Duda e Stawowy (2013), foi feita uma comparação entre três algoritmos heurísticos para a resolução do modelo MIP proposto para o planejamento de produção em uma fundição de médio porte: algoritmo genético, busca tabu e evolução diferencial. Os autores concluíram que o algoritmo genético alcançou resultados melhores do que os demais.
- Park e Yang (2013) conduziram um trabalho no qual utilizaram técnicas de Programação Linear (PL) de forma a otimizar a eficiência dos fornos de fusão.
- Em trabalhos mais atuais, Bewoor, Prakash e Sapkal (2018) auxiliaram o programador de uma fundição a minimizar o *lead time*, definindo a sequência das tarefas por meio de um algoritmo chamado *Hybrid Particle Swarm Optimization*.

- Qin *et al.* (2019) empregaram o algoritmo *Hybrid Discrete Multi-Objective Grey Wolf Optimizer* (HDMGWO) para minimizar o *makespan*, que representa o tempo de término máximo de uma sequência de tarefas.
- Vale a pena destacar, também, o estudo feito por Ugarte *et al.* (2009) em uma fundição de alumínio, no qual os autores demonstraram como uma abordagem híbrida a partir de um algoritmo genético e Simulação a Eventos Discretos (SED), pode auxiliar a reprogramar o sequenciamento em reação a eventos inesperados.
- Na pesquisa de Creighton e Nahavandi (2003), realizada em uma fundição prestes a passar por uma renovação em suas instalações, SED foi usada como ferramenta para auxiliar na definição de processos robustos, ou seja, pouco sensíveis à variação de parâmetros (*robust system design*). Embora não tenha sido o objetivo principal, o modelo computacional desenvolvido, ainda pôde ser usado para avaliar a capacidade de produção da nova instalação, determinar o sequenciamento de tarefas e identificar gargalos de produção.

Dentro do contexto apresentado, este trabalho visa utilizar uma abordagem não encontrada nos trabalhos pesquisados: o uso de SED como ferramenta gerencial para auxiliar na tomada de decisão em busca de uma solução viável para o sequenciamento de tarefas na área de geração dos fundidos, compreendida pela moldagem, onde os moldes são produzidos e pela aciaria, onde se dá a fabricação do aço.

Work in Progress (WIP) pode ser definido como o volume de produtos semiacabados no sistema de produção (YANG *et al.*, 2015). Ao longo deste trabalho, WIP refere-se aos moldes nos pátios de vazamento, no contexto do objeto de estudo desta pesquisa.

Deste modo, este trabalho visa responder a seguinte questão de pesquisa: é possível por meio da SED encontrar uma solução viável de modo a melhorar o sequenciamento de tarefas na área de geração de fundidos para diminuir o WIP (moldes nos pátios de vazamento) e impedir o bloqueio das linhas de moldagem?

1.2 OBJETIVOS, DELIMITAÇÃO, JUSTIFICATIVAS DE PESQUISA

No sentido de buscar respostas à questão da pesquisa formulada, o objetivo geral desta dissertação foi desenvolver uma ferramenta gerencial, por meio da Simulação a Eventos Discretos, para analisar o fluxo produtivo na área de geração de fundidos (moldagem e aciaria),

em uma fundição de grande porte, de modo a diminuir o WIP (moldes nos pátios de vazamento) e impedir que ocorram bloqueios nas linhas de moldagem.

Como objetivos específicos desta pesquisa, têm-se:

- Mapear o processo e modelar o sistema real por meio da técnica de modelagem conceitual *Integrated DEFinition Methods – SIMulation* - IDEF-SIM (LEAL, 2008);
- Construir, a partir do modelo conceitual, o modelo computacional do fluxo produtivo utilizando o *software* ProModel®, escolhido pela empresa patrocinadora dada a prévia experiência bem-sucedida em outros projetos;
- Validar o modelo computacional construído, a partir de dados coletados internamente na empresa estudada, por meio de uma técnica própria para dados normais – Teste t pareado;
- Permitir maior compreensão do funcionamento do sistema e identificar gargalos de produção que, muitas vezes, são mascarados pelo excesso de WIP no sistema como um todo;
- Analisar cenários, a partir da alteração de escalas de trabalho e variação de parâmetros de demanda de produção e recursos disponíveis.

A pesquisa foi realizada nas dependências da Amsted Maxion, referência latino-americana na produção de rodas e componentes ferroviários, além de produzir itens de diferentes dimensões e complexidades para setores como: mineração, sucroalcooleiro e máquinas e equipamentos para a construção civil.

Existem duas divisões dentro da empresa: fundição areia, onde, como o próprio nome sugere, os moldes produzidos são de areia (moldes colapsáveis), e a divisão de rodas, dedicada exclusivamente à produção de rodas ferroviárias onde os moldes são permanentes (moldes de grafite).

O trabalho foi realizado na área de fundição areia, mais especificamente no setor de geração do fundido: moldagem, onde os moldes são produzidos; e aciaria, onde acontece a fabricação do aço. De forma macro, as etapas que se seguem são: vazamento, resfriamento e desmoldagem. Deste modo, a pesquisa é delimitada pela produção de moldes e fabricação do aço, definindo a fronteira de entrada, e a desmoldagem, caracterizada como fronteira de saída.

A justificativa desta dissertação se dá a partir de um estudo bibliométrico que identificou o interesse da comunidade científica e a contemporaneidade das questões abordadas neste

trabalho. Por meio desta análise foi possível, ainda, identificar oportunidades de pesquisa que corroboram para a importância do desenvolvimento deste trabalho.

A análise bibliográfica foi realizada na base de dados Scopus, que é um banco de dados de resumos e citações da literatura científica nas mais diversas áreas do conhecimento. Contém mais de 22.000 títulos e mais de 5.000 editores de todo o mundo e ainda conta com ferramentas inteligentes para rastrear, analisar e visualizar pesquisas.

A busca se deu a partir das palavras-chaves: “*discrete event simulation*”, “*production planning*”, “*job shop scheduling*”, “*lot sizing*”, “*decision making*”, “*lean manufacturing*”, “*production management*”, “*management tool*” e “*foundry*”. Os termos foram arranjados entre si de diferentes maneiras, considerando apenas artigos publicados na língua inglesa desde a primeira publicação até 27 de fevereiro de 2022. Os resultados do estudo realizado em relação ao número de publicações e o total de citações são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Publicações na base de dados Scopus

Item	Palavras-chaves	Publicações	Citações
1	"Discrete Event Simulation"	8.271	132.805
2	"Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing"	12.913	289.130
3	"Discrete Event Simulation" AND ("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing")	150	3.145
4	"Discrete Event Simulation" AND "Decision Making"	577	9.941
5	"Discrete Event Simulation" AND "Lean Manufacturing"	32	790
6	"Discrete Event Simulation" AND "Production Management"	22	257
7	"Discrete Event Simulation" AND "Management Tool"	15	321
8	"Discrete Event Simulation" AND "Foundry"	6	89
9	("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing") AND "Decision Making"	1.090	23.825
10	("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing") AND "Production Management"	273	6.146
11	("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing") AND "Management Tool"	18	175
12	("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing") AND "Foundry"	34	386
13	"Decision Making" AND "Production Management"	297	5.400
14	"Decision Making" AND "Lean Manufacturing"	141	2.869
15	"Decision Making" AND "Foundry"	74	776
16	"Lean Manufacturing" AND "Foundry"	11	98
17	"Production Management" AND "Foundry"	9	37
18	"Discrete Event Simulation" AND ("Production Planning" OR "Job Shop Scheduling" OR "Lot Sizing") AND "Foundry"	0	0

Fonte: Base de dados Scopus (2022)

Seguindo com a análise bibliométrica, alguns itens apresentados na Tabela 2 serão detalhados para um melhor entendimento.

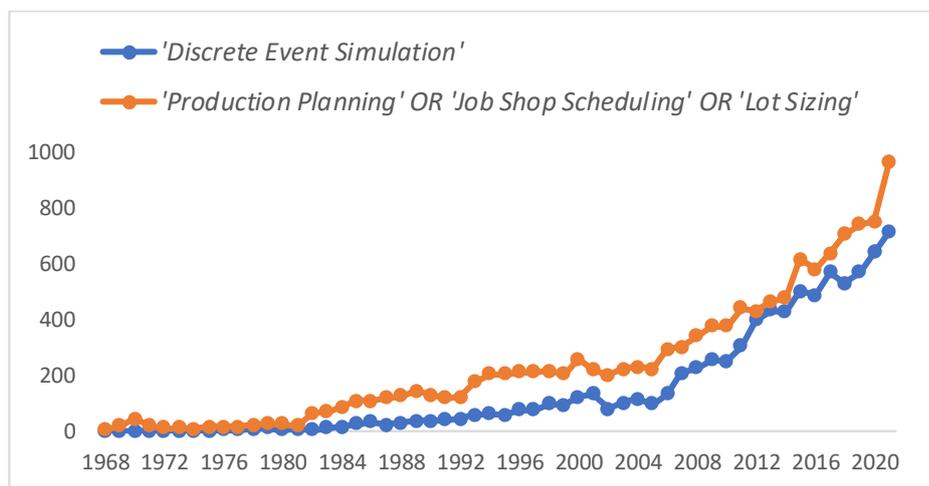
Na Figura 3 está apresentada a evolução do número de publicações ao longo dos anos para os itens 1 (“*Discrete Event Simulation*”) e 2 (“*Production Planning*” OR “*Job Shop Scheduling*” OR “*Lot Sizing*”) da Tabela 2. De todos os 8.271 artigos encontrados para o item 1, 72% foram publicados a partir de 2010, sendo que destes 72%, 70% foram publicados a partir de 2015, o que evidencia a contemporaneidade e relevância do assunto no meio acadêmico.

Fazendo a mesma análise para o arranjo formado pelas palavras do item 2, tem-se que 57% dos artigos foram publicados a partir de 2010, e 70% destes artigos foram publicados somente após 2015.

É possível perceber a partir da Figura 3 que as curvas seguem a mesma linha de tendência, e a diferença em relação à proporção de artigos publicados a partir de 2010 se deve especialmente à popularização do uso de simulação computacional, que se deu apenas a partir de meados da década de 70, enquanto pesquisas relacionadas a planejamento de produção e áreas correlatas já aconteciam antes desse período.

Para a construção da Figura 3 foram desconsideradas publicações anteriores a 1968 e do ano de 2022.

Figura 3 – Número de publicações para os itens 1 e 2

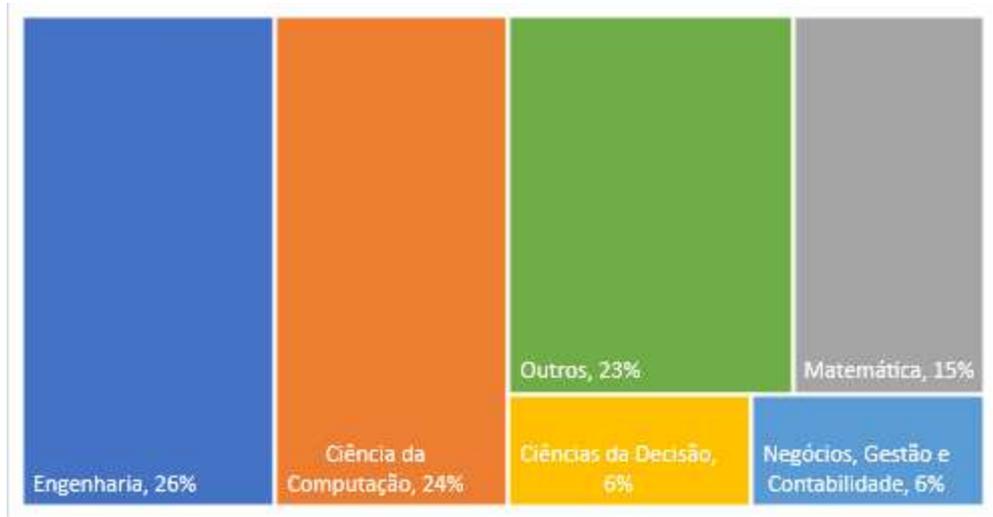


Fonte: Base de dados Scopus (2022)

Ainda a partir do item 1 da Tabela 2, os artigos foram categorizados de acordo com as áreas de estudo. Conforme disposto na Figura 4, as publicações são fortemente relacionadas às áreas de Engenharia (26%), Ciência da Computação (24%) e Matemática (15%), que juntas, representam 65% de todas as publicações encontradas. Ainda assim, há uma certa pulverização

em ‘Outros’ (23%) devido às diversas aplicações possíveis para SED. Dentre elas destacam-se: manufatura, cadeia de suprimentos, serviços e *healthcare*.

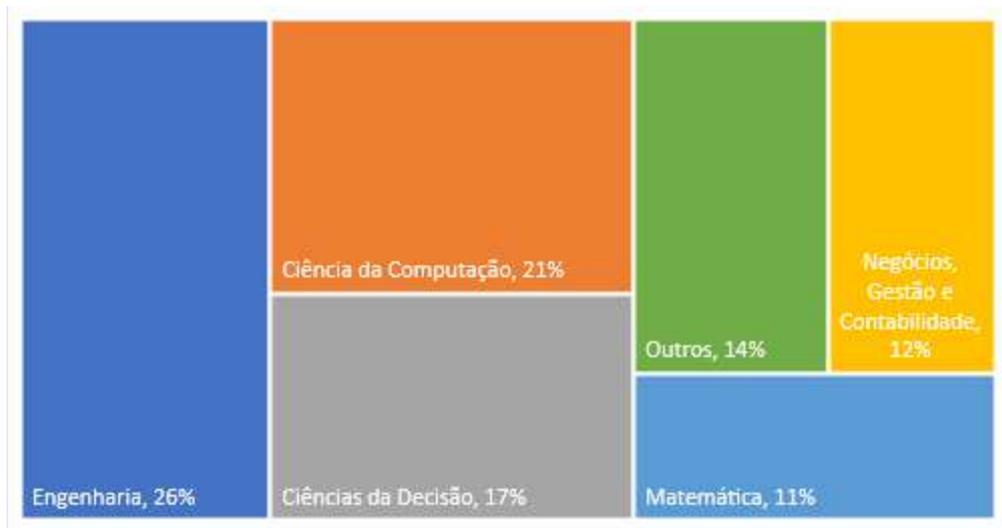
Figura 4 – Publicações categorizadas por área de estudo para o item 1



Fonte: Base de dados Scopus (2022)

As publicações também foram separadas por área de estudo para as palavras-chaves do item 2 (Tabela 2), conforme apresentado na Figura 5. Comparando-se as informações dispostas na Figura 4 e na Figura 5, é possível perceber que as áreas de estudo são basicamente as mesmas para as palavras-chaves buscadas para os itens 1 e 2, sendo que mais uma vez, Engenharia e Ciência da Computação aparecem como as principais áreas para os temas abordados.

Figura 5 – Publicações categorizadas por área de estudo para o item 2

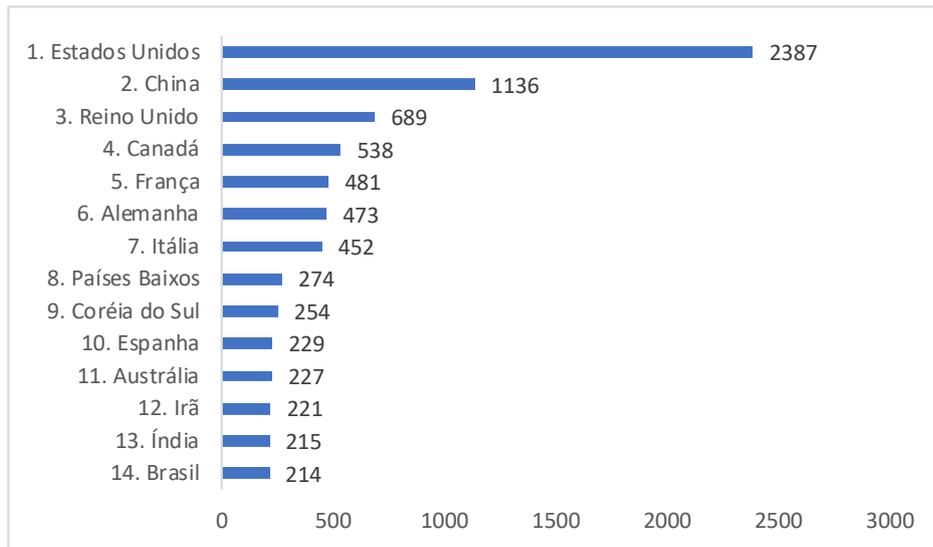


Fonte: Base de dados Scopus (2022)

Nas Figuras 6 e 7 estão apresentados os rankings dos principais países com mais publicações contendo as palavras-chaves dos itens 1 e 2, respectivamente. É válido destacar a relevância de Estados Unidos e China em pesquisas relacionadas às palavras-chaves dos itens 1 e 2, com aproximadamente metade das publicações dentre os 10 países mais bem ranqueados.

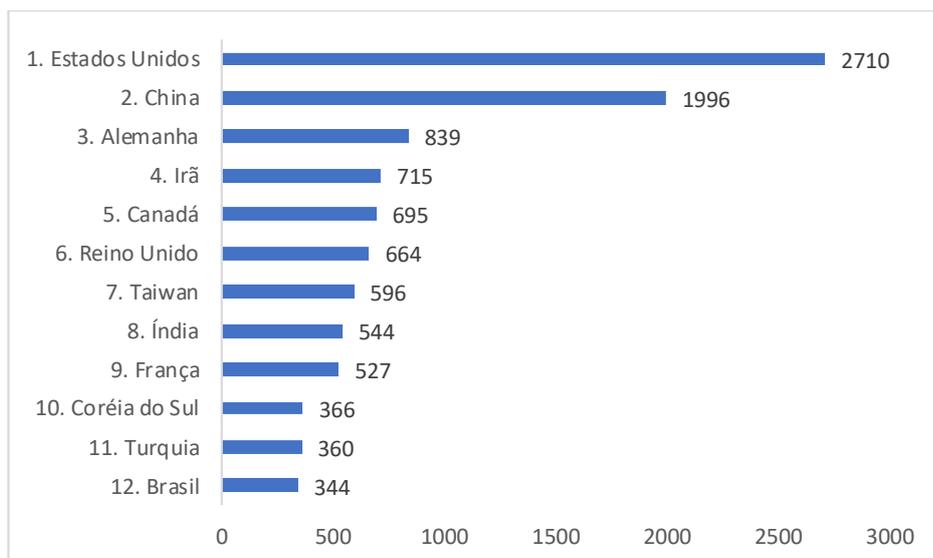
Mesmo não figurando entre os 10 primeiros países, optou-se por apresentar o número de publicações do Brasil de forma a evidenciar a relevância do país no cenário global.

Figura 6 – Principais países com publicações contendo as palavras-chaves do item 1



Fonte: Base de dados Scopus (2022)

Figura 7 – Principais países com publicações contendo as palavras-chaves do item 2



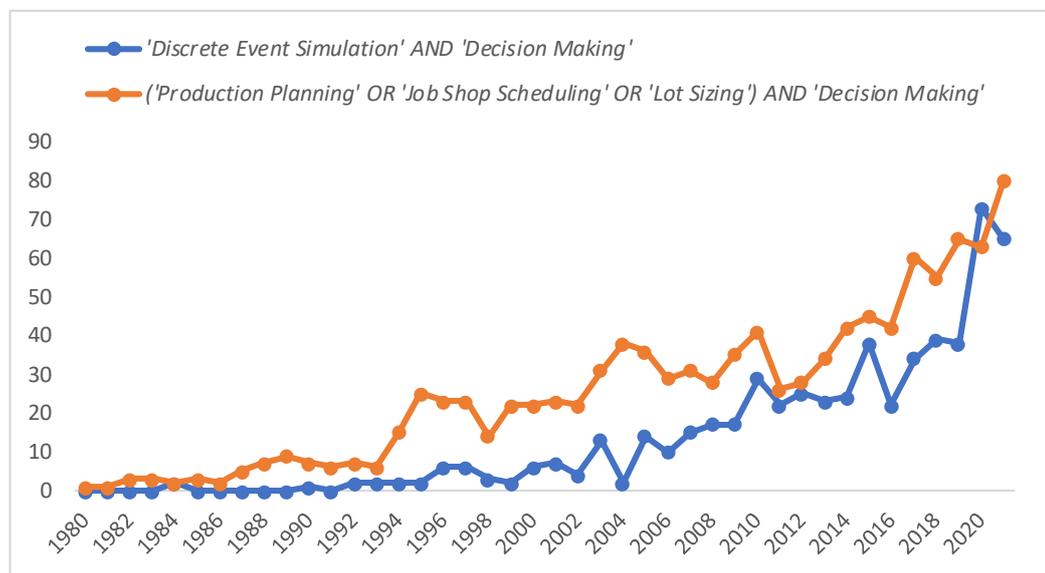
Fonte: Base de dados Scopus (2022)

Acrescentando-se a palavra-chave “*decision making*” aos itens 1 e 2, têm-se os itens 4 e 9 da Tabela 2. A evolução do número de publicações para estes itens ao longo do tempo é apresentada na Figura 8.

De todos os artigos para o item 4, 77% foram publicados a partir de 2010, sendo que destes, 72% são de 2015 em diante, com destaque para o ano de 2020 que aproximadamente dobrou o número de publicações em relação ao ano anterior.

Já para o item 9, 55% dos artigos foram publicados a partir de 2010, e destes, 72% a partir de 2015.

Figura 8 – Número de publicações para os itens 4 e 9



Fonte: Base de dados Scopus (2022)

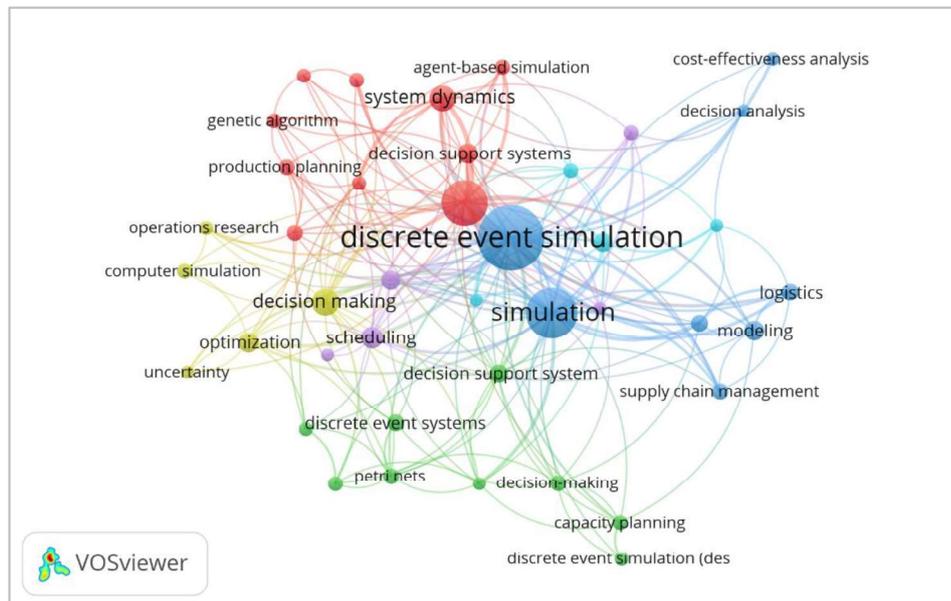
Foi dada sequência ao estudo bibliométrico com o uso do *software* VOSviewer, do inglês *Visualization Of Similarity*, ferramenta gratuita usada para a geração de redes de dados bibliométricos (WONG, 2018). Ainda segundo Wong (2018), o VOSviewer tem como finalidade:

- Visualizar o perfil de pesquisa de uma universidade pontuando seus pontos fortes e fracos podendo compará-la com outras universidades;
- Apontar as áreas de pesquisa em um campo disciplinar e apresentar o impacto em grupos de pesquisa ou áreas de interesse;
- Visualizar tópicos de alto impacto em mapas de densidade de palavras-chaves e títulos de publicações em um determinado período;
- Expor a colaboração entre autores ou universidades.

Deste modo, com base nas publicações encontradas a partir das palavras-chaves do item 4 e com auxílio do *software* livre VOSviewer, foram contabilizadas as palavras-chaves que ocorreram com frequência maior ou igual a 6. De todas as 1.743 palavras-chaves (*Author Keywords*), 41 atenderam ao critério estabelecido, resultando em 5 *clusters*. A conexão entre os termos é ilustrada na Figura 9.

Ainda, na Figura 9, está exposta a pouca interrelação entre os termos *discrete event simulation* e *production planning*, demonstrando que há oportunidades de pesquisa a serem exploradas nesse campo.

Figura 9 – Rede de coocorrência de palavras-chaves do item 4

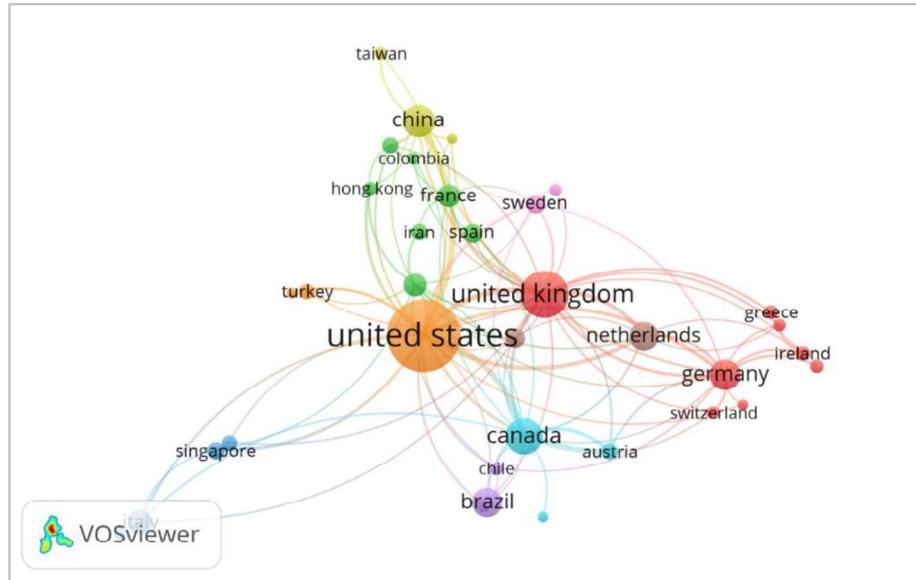


Fonte: VOSviewer (2022)

Já a Figura 10 apresenta a rede de coautorias a partir dos diferentes países que produziram pesquisas científicas relacionadas ao tema do item 4. Foram considerados apenas os países com ao menos 4 publicações. Dentre os 84 países, 37 atenderam ao critério, entretanto, 2 deles não apresentaram conexão com nenhum outro país e, dessa forma, não estão representados na Figura 10.

Os Estados Unidos é o país que apresenta mais conexões de coautoria. O Brasil, além de trabalhos de coautoria publicados com o próprio Estados Unidos, também apresenta conexões com Canadá e Chile.

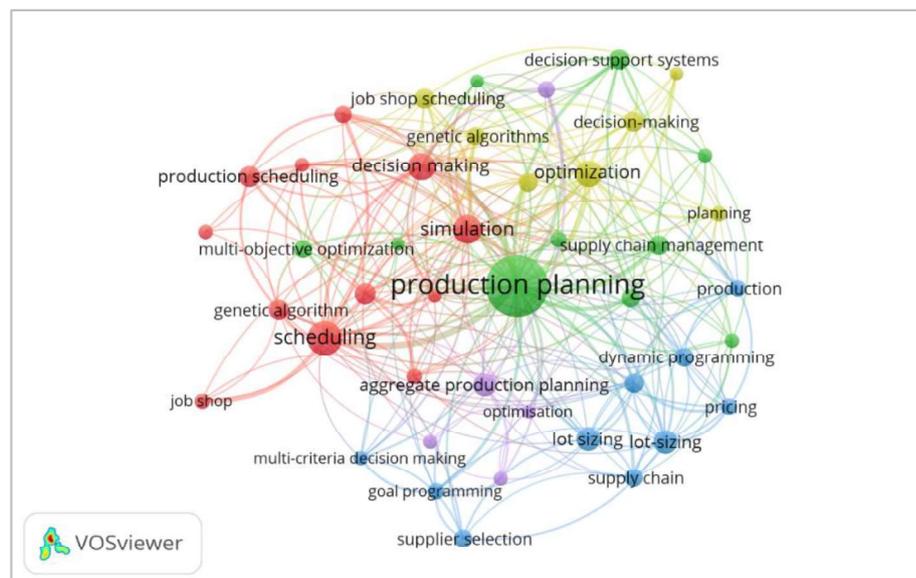
Figura 10 – Rede de coautoria por países do item 4



Fonte: VOSviewer (2022)

Repetindo a análise com base nas publicações encontradas a partir do item 9, definiu-se como 10 a frequência mínima de ocorrência das palavras-chaves. Dos 2.634 termos, 44 atenderam ao critério. Houve a formação de 5 *clusters* distintos, expostos na Figura 11, com destaque para os termos: *production planning*, *scheduling*, *decision making*, *simulation* e *optimization*.

Figura 11 – Rede de coocorrência de palavras-chaves do item 9



Fonte: VOSviewer (2022)

Modelos de simulação são amplamente usados como ferramentas para tomada de decisão em sistemas logísticos e gerenciamento da cadeia de suprimento como um todo. É bastante difundido que SED é usada especialmente em níveis táticos e operacionais, enquanto Sistemas Dinâmicos (SD) são mais frequentemente usados em níveis estratégicos (TAKO; ROBINSON, 2012).

Em seu estudo, Tako e Robinson (2012) exploraram 127 artigos para identificar a frequência com que os dois métodos de simulação são usados como ferramenta para tomada de decisão no gerenciamento da cadeia de suprimentos. Os autores sugerem que não há qualquer diferença em relação ao uso de cada um dos métodos envolvendo estudos de gerenciamento da cadeia de suprimentos, sejam eles do nível tático/operacional ou do nível estratégico.

Gambardella, Rizzoli e Zaffalon (1998) estudaram a alocação de recursos e o sequenciamento de operações de forma a maximizar os lucros em um terminal intermodal de contêineres, usando técnicas de MIP, algoritmos genéticos e simulação.

O trabalho de Vinod e Sridharan (2008) é um estudo experimental de um típico problema de JSS de designação de tarefas e alocação de recursos. Os autores utilizaram SED para comparar diferentes regras de sequenciamento encontradas na literatura.

No mesmo ano, Longo e Mirabelli (2008) buscaram desenvolver um simulador flexível, capaz de avaliar diferentes cenários implementando-o como ferramenta para tomada de decisão de gestores de uma cadeia de suprimento com nove lojas, quatro centros de distribuição, três plantas e vinte itens diferentes.

Já Gansterer, Almeder e Hartl (2014) aplicaram modelos de otimização combinados a simulação para determinar parâmetros de produção para um fornecedor automotivo; Ponsignon e Mönch (2014) modelaram o comportamento da demanda e da produção de semicondutores; e Altaf *et al.* (2018) utilizaram SED para o Planejamento e Controle de Produção de casas pré-fabricadas.

Há também pesquisas na área da saúde, como a de Hamrock *et al.* (2013) que conseguiram por meio de um modelo de SED diminuir em 10% o tempo de permanência dos pacientes em um centro emergencial, reduzindo, conseqüentemente, o tempo dos pacientes na sala de espera e a ocupação dos leitos. Além do trabalho de Osorio *et al.* (2017), que, a partir de SED, representaram toda a cadeia de suprimentos de um hemocentro na Colômbia, desde a coleta e preparação, até o armazenamento e distribuição.

Conforme apresentado, SED é usada nas mais variadas áreas de estudo, indo de manufatura e cadeia de suprimentos a *healthcare*, e pode também ser combinada a diversas outras técnicas dependendo da natureza e complexidade do estudo. Entretanto, nenhum trabalho

foi encontrado a partir das palavras-chaves do item 18 da Tabela 2, onde é acrescentado o termo “*foundry*”. Deste modo, pode-se afirmar também que há ineditismo no tema a ser estudado.

1.3 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2018), este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa aplicada quanto à sua natureza, ou seja, os resultados obtidos podem ser utilizados para a solução de problemas reais.

Quanto aos objetivos, Bertrand Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2018) classificam pesquisas baseadas em modelos quantitativos em duas classes distintas: axiomática e empírica.

As pesquisas axiomáticas são guiadas por um modelo idealizado, sendo que a principal preocupação do pesquisador é obter soluções que forneçam soluções acerca da estrutura do problema.

Diferentemente da pesquisa axiomática que estuda problemas idealizados a partir do uso intensivo de métodos matemáticos, estatísticos e de ciências da computação, as pesquisas empíricas são voltadas a criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais existentes no problema real. O objetivo principal do pesquisador, nesse caso, é assegurar que exista um ajustamento entre as observações e ações na realidade e o modelo formulado a partir daquela realidade.

Como esta pesquisa visa desenvolver uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão e buscar uma solução viável para o problema de sequenciamento na área de geração dos fundidos e dada a natureza empírica dos dados, conclui-se que a classificação mais adequada para este trabalho é a empírica.

Ainda segundo Bertrand Fransoo (2002) e Miguel *et al.* (2018), as pesquisas empíricas podem ser classificadas como descritivas ou normativas:

- Empírica descritiva: está interessada em criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que podem existir na realidade;
- Empírica normativa: está interessada em desenvolver estratégias e ações que melhorem a situação atual.

A partir das definições apresentadas e considerando que será criado um modelo conceitual que descreva adequadamente o processo e suas relações de causa e efeito, auxiliando na tomada de decisão, classifica-se esta pesquisa quanto aos objetivos como empírica descritiva.

Quanto ao meio, este trabalho é uma pesquisa de campo, pois baseia-se pela experiência que se está sendo aplicada na investigação e é realizada exatamente no local onde são observados os fenômenos estudados.

Por fim, o sistema será estudado a partir de um modelo experimental de simulação, deste modo, o método de pesquisa é classificado como modelagem e simulação. A classificação da pesquisa é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Classificação da pesquisa científica



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

1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS

Os registros de produção, disponíveis na rede interna da empresa estudada, foram utilizados como base de dados para a determinação das distribuições estatísticas utilizadas como variáveis de entrada no modelo desenvolvido.

Dentre as variáveis de saída geradas pelo modelo desenvolvido, faz-se necessária a definição de uma medida de desempenho, conhecida como variável de resposta, para a validação estatística do modelo computacional.

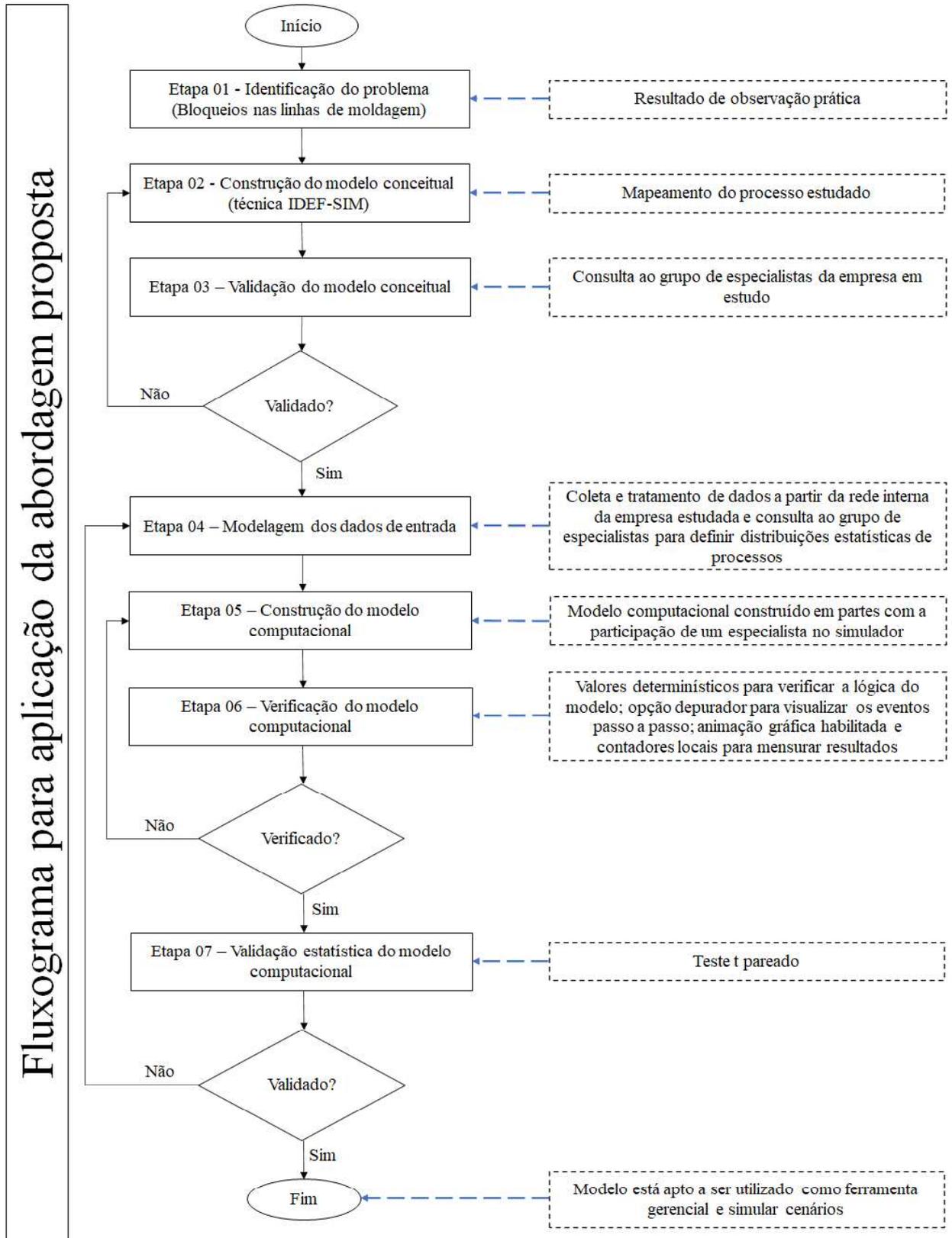
A determinação das distribuições estatísticas e a definição da variável de resposta estão apresentadas no Capítulo 3.

Foram empregados os seguintes *softwares* para a aplicação dos métodos quantitativos e desenvolvimento do modelo computacional, ao longo deste trabalho:

- ProModel®: *software* de SED utilizado para modelar computacionalmente o sistema estudado;
- AutoCAD®: utilizado para importar o *layout* do sistema estudado para o simulador;
- Minitab®: utilizado para o tratamento de dados e a determinação das distribuições estatísticas que serviram como variáveis de entrada no modelo estudado. Além de ter sido utilizado para a validação estatística do modelo computacional construído;
- Stat::Fit®: *software* integrado ao ProModel®, utilizado para analisar a aderência dos dados às distribuições encontradas no Minitab®;
- Microsoft Office Excel®: utilizado para importar as ordens de produção para o simulador;
- Output Viewer®: *software* integrado ao ProModel® que permite a análise das variáveis de saída do modelo simulado, tanto de forma numérica quanto gráfica.

Para realizar a fase de modelagem do problema, foi utilizado como referência, o fluxograma apresentado na Figura 13, que descreve o processo correspondente.

Figura 13 – Fluxograma de processo de modelagem



Fonte: Produção do próprio autor

Etapa 01 – Identificação do problema.

O problema foi identificado por meio de observação prática. Ocorrem bloqueios nas linhas de moldagem devido à falta de espaço físico para o posicionamento de moldes nos pátios de vazamento. Como trata-se de um sistema complexo, a solução do problema por meio de técnicas analíticas não é a mais apropriada. Deste modo, optou-se por desenvolver um modelo de SED para apresentar soluções viáveis.

Etapa 02 – Construção de modelo conceitual

De acordo com Chwif e Medina (2010), a etapa de criação de um modelo conceitual representa o aspecto mais importante de um estudo de simulação. Ainda segundo os autores, muitas vezes, uma modelagem conceitual efetiva, pode levar à identificação de uma solução adequada, sem a necessidade de um estudo completo de simulação.

A técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM foi utilizada para representar e documentar o modelo, de modo que os demais envolvidos no projeto pudessem compreendê-lo.

Etapa 03 – Validação do modelo conceitual

O modelo conceitual foi validado por meio da técnica face a face, que consiste em apresentar o modelo a especialistas do processo para avaliação do sistema como um todo. Ademais, a animação gráfica do modelo computacional contribui com a validação do modelo computacional, permitindo avaliar se o fluxo dos processos modelados condiz com o fluxo do sistema real.

Etapa 04 – Modelagem dos dados de entrada

Os dados de entrada do modelo simulado foram coletados a partir dos registros de produção da rede interna da empresa estudada. Para alguns processos específicos, não havia registros suficientes para a determinação de distribuições estatísticas representativas. Nesses casos, os especialistas dos processos foram consultados estabelecer as curvas probabilísticas mais adequadas.

Etapa 05 – Construção do modelo computacional

O modelo computacional foi construído e testado em partes. A construção de uma etapa seguinte só era construída após a verificação da etapa desenvolvida. Além disso, construiu-se

o modelo com a ajuda de um especialista no simulador ProModel®, que pôde verificar inconsistências e sugerir lógicas de programação ao longo do processo.

Etapa 06 – Verificação do modelo computacional

Foram utilizados valores determinísticos para a verificação da lógica construída em cada um dos processos; habilitou-se a opção depurador do simulador para visualizar os eventos passo a passo e observar inconsistências; inseriu-se contadores locais para mensurar os resultados enquanto a simulação estava em andamento; executou-se a simulação com a animação gráfica habilitada, utilizada para verificar tanto o modelo conceitual, quanto o modelo computacional.

Etapa 07 – Validação estatística do modelo computacional

Após a definição da medida de desempenho adequada, realizou-se, por meio do Minitab®, o Teste t pareado, para comprovar que não há diferenças significativas entre as variáveis de saída do modelo construído e dos dados reais. Estando validado estatisticamente, o modelo está apto a ser utilizado para a simulação dos cenários desejados.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este texto está estruturado em mais três capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se o referencial teórico, abordando conceitos e métodos pertinentes ao trabalho. No Capítulo 3, está apresentada a empresa e descrito o problema que motivou esta dissertação. Ainda no Capítulo 3, é apresentada a modelagem conceitual, a construção e validação do modelo computacional e os resultados dos cenários experimentados. No Capítulo 4, estão as considerações finais, bem como sugestões para trabalhos futuros, sendo seguido pelas referências bibliográficas. Finalmente, apresentam-se os Anexos, nos quais estão expostos: a visão da empresa patrocinadora, as plantas baixas dos setores estudados, os modelos conceituais construídos a partir da técnica de modelagem IDEF-SIM, os parâmetros de entrada do modelo computacional e os dados coletados na empresa estudada para determinar as distribuições estatísticas utilizadas nas simulações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são apresentados conceitos e definições a respeito do PCP e algumas de suas abordagens clássicas, bem como aspectos gerais de simulação computacional, em especial a SED.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Diversos autores, dentre eles, Kumar e Suresh (2008), Telsang (2018), Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) e Garg (2012), apontaram que a Administração da Produção tem como escopo gerenciar o processo produtivo de modo a fornecer serviços e produtos que satisfaçam às especificações do cliente, no momento certo e ao menor custo. De forma simplificada, a administração da produção gerencia o processo de transformação apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Processo de transformação da administração da produção



Fonte: Adaptado de Telsang (2018) e Garg (2012)

Kumar e Suresh (2008) apontam, ainda, as principais atividades atribuídas à administração da produção:

- Projeto da rede de operações produtivas (localização das instalações);
- Projeto de *layout* e manuseio de materiais;
- Projeto de produtos e serviços;
- Projeto de fluxo produtivo;
- **Planejamento e Controle da Produção (PCP);**
- Planejamento e controle da qualidade;
- Planejamento e controle de materiais;
- Planejamento e controle da manutenção.

O Planejamento e Controle de Produção vem evoluindo constantemente, e atualmente nas organizações, tornou-se essencial no gerenciamento e controle das atividades e pessoas (UPADHYAY; ASKARI-NASAB, 2018; STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005). Upadhyay e Askari-Nasab (2018), Kumar e Suresh (2008) e Telsang (2018) fazem uma analogia, comparando o PCP com a espinha dorsal do processo produtivo dentro de uma organização.

As empresas manufatureiras vêm sendo confrontadas com o desafio de alcançar um alto nível de aderência de entrega (OTD), em face de demandas extremamente voláteis e exigência de alta eficiência dos processos (baixo custo). Este desafio só pode ser superado por meio de um PCP que seja perfeitamente apropriado aos processos (NELLES *et al.*, 2016).

Seguindo a mesma linha, Shang e You (2018) citaram a importância do PCP nas tomadas de decisão nas organizações, em um mundo cada vez mais globalizado e competitivo.

Em linhas gerais, o PCP é o sistema da cadeia de suprimentos responsável por transformar os pedidos dos clientes em ordens de produção, resolvendo problemas de dimensionamento de lotes, correspondendo o sequenciamento das ordens com as capacidades disponíveis, resultando em um plano de produção (GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017).

Segundo Ciurana *et al.* (2008), o PCP tem como propósito otimizar o fluxo de materiais e a utilização de recursos nos processos de fabricação, buscando minimizar *WIP* e *lead time* e melhorando a capacidade de resposta à variação de demanda e o indicador OTD. Bendul e Knollmann (2016) citaram também que o PCP visa garantir altos níveis de qualidade e produtividade.

Para Stevenson, Hendry e Kingsman (2005), as principais funções do PCP são:

- Determinar o plano de produção com base nos pedidos de clientes e/ou previsão de demanda;
- Planejar a necessidade de matéria-prima e materiais de consumo;
- Manter o estoque em níveis ideais;
- Fazer a programação e o sequenciamento de tarefas;
- Balancear a capacidade produtiva da empresa;
- Liberar ordens de produção;
- Controlar o desempenho da produção e atuar em caso de desvios.

Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) apontaram que não há uma divisão clara entre “Planejamento” e “Controle”, por isso eles são tratados de forma conjunta. O Planejamento é

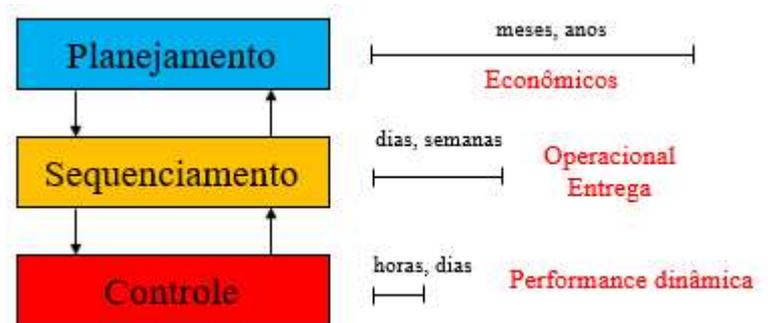
uma formalização do que deve acontecer: “o que”, “quando” e “quanto” deve ser produzido. Mas isso não garante que o plano será cumprido. Telsang (2018) citou alguns fatores que podem causar desvios no plano de produção:

- Indisponibilidade de matéria-prima;
- Quebra de equipamentos / máquinas;
- Alteração da demanda e pedidos urgentes;
- Absenteísmo de trabalhadores;
- Falta de coordenação e comunicação entre os diversos setores da companhia.

Dessa forma, o “Controle” lida com todos esses desvios entre a produção real e o plano de produção e faz ajustes e intervenções de modo a permitir que a operação atinja os objetivos pré-estabelecidos no plano de produção (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018).

Segundo Castro, Grossmann e Zhang (2018), a natureza das atividades do PCP muda ao longo do tempo. O Planejamento é definido pelos autores como a atividade de longo prazo, no qual os objetivos são estabelecidos em grande parte em termos econômicos. No médio prazo, o sequenciamento é o processo de alocação dos recursos disponíveis ao longo de um determinado período, de forma a atender as metas do plano de produção pré-estabelecido. Por fim, no curto prazo, o Controle faz intervenções nos recursos para corrigir os desvios dos planos. Na Figura 15 estão ilustradas as atividades do PCP de acordo com a escala de tempo e seus respectivos objetivos.

Figura 15 – Escala de tempo das atividades do PCP e seus respectivos objetivos



Fonte: Castro, Grossmann e Zhang (2018)

Da mesma forma, para Zhang, Gen e Jo (2014), o sequenciamento é a atividade de alocação e utilização eficazes dos recursos fabris. No entanto, buscar uma solução ótima a partir

de todas as combinações possíveis entre tarefas e recursos disponíveis, seguindo os critérios de fabricação especificados é muito difícil para o tomador de decisão.

Segundo Pinedo (2005), a atividade de sequenciamento em uma companhia depende de técnicas matemáticas e métodos heurísticos para alocar recursos finitos às atividades que devem ser realizadas. Pinedo (2005) ainda citou a minimização do *makespan* e *lead time* como objetivos típicos da atividade de sequenciamento.

Para Halevi (2001) os objetivos do PCP são conflitantes entre si. Ao minimizar o WIP, as tarefas devem começar o mais próximo possível da data de entrega. Isso também reduz o *lead time* de fabricação, por outro lado, pode afetar o cumprimento da data de entrega, pois podem faltar itens ou matérias-primas e ocorrer atrasos nas tarefas. Outro objetivo do PCP é minimizar a ociosidade dos recursos disponíveis, que pode ser alcançado mantendo *buffers* antes de cada recurso, no entanto, isso implica no aumento de WIP.

Castro (2005) citou, ainda, algumas dificuldades inerentes ao PCP:

- Previsão de demanda: é uma dificuldade existente especialmente em ambientes voltados para a reposição de estoques (*make to stock*), relacionada a decisões sobre “o que”, “quanto” e “quando” deve ser produzido;
- Gerenciamento de prazos e prioridades: O prazo de entrega de um determinado produto deve ser determinado não só pelo tempo de processamento, mas também pelo tempo de fila que a ordem aguarda nos estoques intermediários. Quanto mais variado for o *mix* de produção, mais difícil de se prever o *lead time* de entrega, pois os *setups* são mais frequentes. Muitas vezes ordens urgentes também são encaixadas na produção, o que dificulta o cumprimento do prazo de entrega estabelecido para outras ordens de produção;
- Perda de eficiência devido a constantes mudanças na programação: as mudanças na programação acontecem especialmente em sistemas voltados para o atendimento de pedidos (*Make to Order*). O dimensionamento de lotes para atendimento da carteira nesses casos é prejudicado, pois o *mix* de produção se torna diverso, o que implica em constantes *setups*, gerando ineficiência e aumento de WIP;
- Gestão de recursos humanos: a volatilidade de demanda e mudanças repentinas nos pedidos obrigam o PCP a, continuamente, administrarem o contingente de mão-de-obra direta, estendendo ou diminuindo turnos de produção, contratando

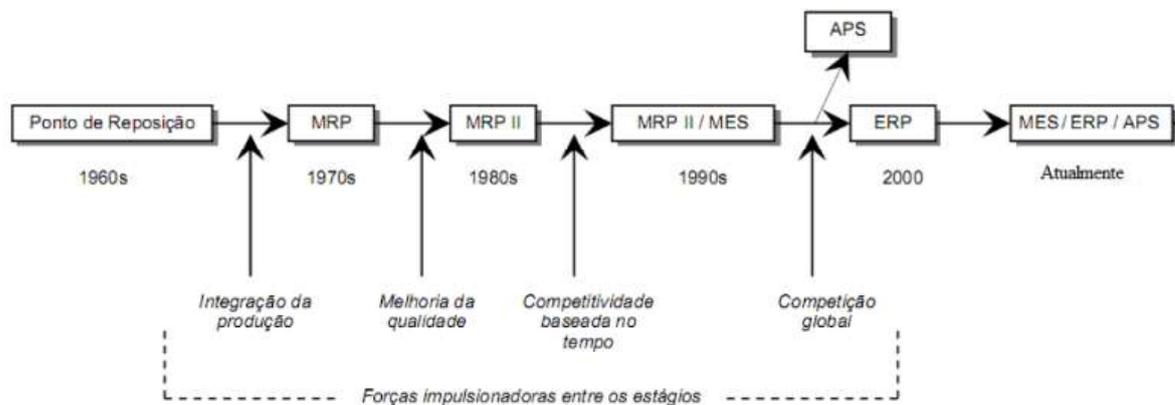
ou demitindo funcionários, ou pagando horas extras, gerando custos excessivos de produção;

- Gestão de estoques de matéria-prima: a baixa previsibilidade de demanda gera dificuldade ao se definir a reposição de matéria-prima, “quando” e “quanto” se deve comprar. Não é raro os casos em que há falta ou excesso de material.

2.1.1 Evolução dos sistemas de PCP

Os primeiros princípios do PCP foram adotados em meio à Revolução Industrial. Inicialmente, os sistemas de PCP visavam apenas a reposição de itens a partir de dados históricos para previsão da demanda futura (ROP – *Reorder Point*). Basicamente, sempre que o estoque ficasse abaixo de um nível pré-estabelecido, eram feitos novos pedidos ou novas ordens de produção (RONDEAU; LITTERAL, 2001). Na Figura 16 está representada a evolução dos sistemas de PCP ao longo do tempo.

Figura 16 – Evolução dos sistemas de PCP



Fonte: Pereira (2017)

Orlicky (1975) introduziu uma abordagem sistêmica para a requisição de materiais que alterou de maneira significativa o PCP, nascia ali o MRP (*Material Requirements Planning*) (MICLO *et al.*, 2019).

O MRP é uma técnica utilizada para planejar quantas peças ou materiais de tipos específicos são necessários e em que momento são exigidos (KUMAR; SURESH, 2008; SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018; TELSANG, 2018).

Do mesmo modo, Garg (2012) descreveu o MRP como um sistema para planejamento da produção e controle de estoque, normalmente viabilizado por meio de um computador.

A lógica do Sistema MRP é conhecida como “programação para trás” ou *back-scheduling*, porque a partir do produto acabado, realiza um cálculo para determinar as datas em que as etapas da produção precisam começar e terminar, quais os materiais e as quantidades necessárias em cada uma das etapas, de trás para frente (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018; TELSANG, 2018)

As primeiras entradas do MRP são os pedidos dos clientes e a demanda prevista, informados no plano mestre de produção. Em seguida, a estrutura de cada produto é “explodida”, o que se conhece como lista de materiais, para determinar as matérias-primas e componentes necessários em cada etapa. Considerando o registro de estoque atualizado, o MRP indica quanto e quando as matérias-primas e componentes devem estar disponíveis para suprir cada etapa de produção (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018; KUMAR; SURESH, 2008; TELSANG, 2018; MICLO *et al.*, 2019).

Rossi *et al.* (2017) apontaram que o sistema MRP segue sendo uma ferramenta atual e bastante empregada nas indústrias. Um levantamento feito por Jonsson e Mattsson (2006) indicou que 75% das companhias manufatureiras utilizam o MRP como principal método para o planejamento de materiais (MILNE; MAHAPATRA; WANG, 2015; RIEZEBOS; ZHU, 2015).

Entretanto, o sistema MRP apresenta algumas fragilidades: ele ignora as restrições de capacidade instalada e assume que não há variação de *lead time* (ROSSI *et al.*, 2017; RIEZEBOS; ZHU, 2015). Já Shofa e Widyarto (2017) apontaram deficiências do MRP ao lidar com o atual panorama do mercado global, marcado por uma grande variedade de produtos, *lead times* longos e demandas incertas.

De acordo com Rondeau e Litteral (2001), em meados dos anos 1970, o MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) passou a substituir gradativamente o MRP como principal sistema de gestão nas indústrias. O MRP II expandiu-se a partir do MRP incorporando funções relacionadas a planejamento de recursos e previsão de demanda. Além disso, a sofisticação do MRP II permitiu colocar em prática a modelagem de cenários hipotéticos (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018; HOPP; SPEARMAN, 2011; RONDEAU; LITTERAL, 2001).

Para Miclo *et al.* (2016), o MRP II é um sistema que integra e coordena diversos aspectos do negócio, como: vendas, compras, operações, capacidade dos recursos, engenharia e finanças e a partir de um banco de dados unificado planeja e atualiza as atividades em todos esses sistemas.

Segundo Naedele *et al.* (2015), ainda na década de 1980, foram introduzidos os sistemas MES (*Manufacturing Execution Ssystems*). Estes sistemas, utilizados no gerenciamento e monitoramento das atividades de produção, surgiram a partir da necessidade de se estabelecer uma relação direta entre o planejamento e o chão de fábrica.

Bibby e Dehe (2018) definiram MES como sistemas que geram informações precisas e em tempo real para promover a otimização de todas as etapas de produção, desde a emissão de uma ordem até os produtos acabados.

Sistemas MES não executam de fato a produção, mas sim, coletam, analisam, integram e apresentam os dados gerados na produção industrial, permitindo reações rápidas, tornando assim, os processos mais previsíveis (NAEDELE *et al.*, 2015). Ainda segundo Naedele *et al.* (2015), um MES é basicamente um sistema de suporte para tomadas de decisão dos gestores.

Em seguida, os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*) surgiram e tornaram-se a tecnologia comumente usada pelas empresas para a gestão empresarial em um nível mais estratégico (ROJKO, 2017). Manavalan e Jayakrishna (2019) definiram o ERP como uma ferramenta de gestão que integra as atividades de diferentes setores, consolidando as informações e permitindo que toda a comunicação aconteça dentro do próprio sistema.

Da mesma forma, Rojko (2017) definiu os ERPs como sendo sistemas de informação adquiridos na forma de pacotes de *softwares* comerciais, que oferecem suporte ao planejamento de toda a empresa, como: gerenciamento da cadeia de suprimentos, vendas e distribuição, contabilidade e gerenciamento de recursos humanos

Rojko (2017) e Moeuf *et al.* (2018) apontaram que a maioria dos sistemas ERP apresenta deficiência na adaptação do planejamento de produção devido a eventos não planejados. Deste modo, a integração dos sistemas MES-ERP é usualmente adotada pelas grandes organizações.

Por fim, as soluções de programação baseadas em sistemas APS (*Advanced Planning and Scheduling*) geram programas de produção e fazem o sequenciamento considerando recursos com capacidade finita. Ao programar a ordem das operações, os *softwares* APS consideram simultaneamente restrições como, capacidade instalada, precedência de tarefas, balanceamento de carga de trabalho, tempos de *setup* além de prioridades e datas de entrega prometidas (LEE; JEONG; MOON, 2002; GEN; LIN, 2014).

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional moderna se desenvolveu a partir do Projeto Manhattan durante a Segunda Guerra Mundial, com o intuito de modelar e simular de forma não destrutiva

a detonação nuclear, antes que a bomba atômica fosse lançada de fato em Hiroshima e Nagasaki, em 1945 (SAHINOGLU, 2013).

Para diversos autores, dentre eles Sousa Junior *et al.* (2019) Kikolski (2017), Bako e Božek (2016), Sahinoglu (2013), Kreke, Schaefer e Roberts (2004) e Kelton e Law (2000) o termo Simulação Computacional se refere a um conjunto de técnicas, empregadas em computadores, usadas para imitar as operações de um processo no mundo real, onde o processo analisado é conhecido como sistema e as suposições lógicas e matemáticas feitas para descrever seu funcionamento são chamadas de modelo (KREKE; SCHAEFER; ROBERTS, 2004).

Para Santos *et al.* (2021) a Simulação é uma das principais técnicas dentro da Pesquisa Operacional, com inúmeras aplicações no planejamento e análise de sistemas produtivos.

Kikolski (2017) destacou o uso de simulação para reduzir riscos de falha ao implementar mudanças significativas nos sistemas de manufatura existentes. Já Dong *et al.* (2012) apontaram que a partir da simulação é possível testar diferentes cenários e avaliar estratégias para melhorar a eficiência das operações.

Seguindo a mesma linha de Dong *et al.* (2012), Sousa Junior *et al.* (2019) e Chwif e Medina (2010) afirmaram que modelos de simulação são utilizados para responder perguntas do tipo “*what-if*”, ou seja, “o que ocorre se”, sendo portanto, uma ferramenta avaliadora de soluções. Enquanto Santos *et al.* (2021) relataram que, dentre suas vantagens, a simulação é capaz de fornecer respostas para a tomada de decisão a um custo relativamente baixo.

De acordo com Sousa Junior *et al.* (2019), Sahinoglu (2013), Chwif e Medina (2010) e Kelton e Law (2000), recomenda-se o uso de simulação computacional para o estudo de sistemas complexos, de natureza dinâmica (que muda seu estado ao longo do tempo) e aleatória (que é regida por variáveis aleatórias). Do contrário, é preferível utilizar técnicas de otimização analíticas, como programação linear ou programação não-linear.

Seguindo a mesma linha, Negahban e Smith (2014) apontaram que a simulação computacional é tratada como uma ferramenta poderosa para analisar sistemas estocásticos complexos e vem sendo usada nos mais diversos campos, incluindo marketing, cadeia de suprimentos, forças armadas, *healthcare*, e em especial, na manufatura.

Sahinoglu (2013) e Kelton e Law (2000) classificaram a natureza de um modelo de simulação em três diferentes aspectos, são eles:

- Dinâmicos vs. estáticos: um modelo estático representa um sistema em um instante determinado, isto é, o modelo não varia ao longo do tempo. Modelos de Monte Carlos são exemplos de simulação estática. Por outro lado, um modelo de simulação dinâmica representa a evolução do sistema ao longo do tempo;

- Determinísticos *vs.* estocásticos: modelos de simulação que não dependem de variáveis probabilísticas (aleatórias) são classificados como determinísticos, ou seja, para um conjunto conhecido de dados de entrada, haverá um único conjunto de resultados de saída. Já modelos estocásticos dependem de variáveis probabilísticas, ou seja, quando pelo menos uma das características operacionais é dada por uma distribuição de probabilidade, que levam saídas aleatórias;
- Contínuos *vs.* discretos: modelos contínuos são aqueles utilizados para modelar sistemas cujo estado varia continuamente no tempo. O voo de uma aeronave ou a variação do nível de um tanque de combustível são exemplos de sistemas contínuos. Em contrapartida, sistemas discretos são aqueles que mudam o seu estado a partir da ocorrência de eventos, isto é, em momentos discretos no tempo (CHWIF; MEDINA, 2010). O atendimento em uma agência bancária é um exemplo de sistema discreto, uma vez que seu estado se altera a partir da ocorrência de eventos: a chegada de um novo cliente, o início do atendimento no caixa e o fim do atendimento.

Para Santos *et al.* (2021) existem diferentes tipos de simulação que suportam as tomadas de decisão em processos produtivos. Dentre eles destacam-se a Simulação a Eventos Discretos (SED), a Simulação Baseada em Agentes (SBA) e Sistemas Dinâmicos (SD).

Macal e North (2014) definiram a SBA como uma estrutura computacional para simular processos dinâmicos que envolvem agentes autônomos, isto é, agentes que tomam decisões sem interferência externa, respondendo a situações que encontram durante a simulação.

Santos *et al.* (2021) apontaram, ainda, que a SED continua sendo a técnica de simulação computacional mais usada para modelagem de processos produtivos. Entretanto, a utilização de SBA tem se destacado devido ao crescente número de sistemas que não podem ser modelados por meio da SED.

2.3 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

Budgaga *et al.* (2016) descreveram a SED como uma ferramenta poderosa para modelagem e análise de sistemas complexos. Seguindo a mesma linha, Cassandras e Lafortune (2008) e apontaram que a SED é empregada especialmente em problemas sem soluções puramente analíticas, e Dong *et al.* (2012), afirmaram que a SED está entre as ferramentas mais aplicadas em análises de sistemas estocásticos.

Existem inúmeros métodos para a solução de problemas relacionados à Pesquisa Operacional, mas a SED é o mais abrangente dentre todos (KAMPA; GOLDA; PAPROCKA, 2017). Para Montevechi *et al.* (2015) a SED é uma ferramenta de modelagem computacional que replica sistemas reais, permitindo testar e analisar mudanças antes da implementação. Deste modo, Ghani, Monfared e Harrison (2015) destacaram a SED como uma importante técnica de apoio à tomada de decisão.

De acordo com Omogbai e Salonitis (2016), a SED modela as operações de um sistema como uma sequência de eventos discretos no tempo. Em outras palavras, qualquer sistema que envolva um fluxo de processo no qual os eventos mudam em sequências de tempo pode ser simulado. Os autores citaram, ainda, a aplicação de SED especialmente em sistemas de manufatura.

Para Prajapat e Tiwari (2017), a SED é utilizada, em sistemas de manufatura, para modelar e responder questões de nível operacional relacionadas a: *lead time*, gargalos de produção e alocação de recursos. Enquanto Kampa, Golda e Paprocka (2017) apontaram que a SED como um método amplamente utilizado para solucionar problemas complexos de sequenciamento de produção e eficiência de processos produtivos.

Schriber e Brunner (2017) apresentaram os elementos básicos de uma SED, que, devido à sua natureza orientada a eventos, pode ser dividida em: entidades, atividades, recursos e controles. Estes elementos serão apresentados ainda neste capítulo, juntamente com os demais elementos da técnica IDEF-SIM.

Prajapat e Tiwari (2017) fizeram um levantamento de publicações que utilizaram a SED para otimização de linhas de montagem. Os autores apontaram que, comumente, foram utilizados *softwares* comerciais para a modelagem desses sistemas, dentre eles destacam-se: QUEST, Witness, ProModel, Arena, Automod e AnyLogic.

Para Banks *et al.* (2010), há muitas similaridades entre todos esses *softwares* comerciais, incluindo uma interface gráfica, animação, coleta dos resultados para avaliar a performance do sistema e, em muitos deles, um *software* integrado para identificar a melhor distribuição estatística, dada uma certa amostragem de dados.

No trabalho de Dias *et al.* (2016) foram ranqueados os *softwares* comerciais de SED mais populares, considerando publicações em revistas científicas, resultados de buscas na internet e redes sociais. Os autores buscaram, a partir deste trabalho, trazer benefícios tanto para as companhias, tornando mais fácil a tarefa de encontrar especialistas em SED com *know-how* em uma ferramenta popular, quanto da perspectiva do especialista, na busca por empresas que trabalhem com um *software* amplamente difundido.

Pereira (2018) e Miranda (2015) apresentaram as seguintes vantagens da SED:

- Capacidade de reproduzir, em um sistema computacional, o mesmo comportamento que um sistema real teria, se fosse submetido às mesmas condições;
- Compreensão de como um sistema opera como um todo, e não apenas suas partes isoladamente;
- Identificação de gargalos produtivos;
- Auxílio na definição de *layouts*, projetos de equipamentos e sistemas de transportes;
- Alternativa à experimentação real, evitando os custos necessários para a implementação no chão de fábrica e interrupção do fluxo produtivo;
- Avaliação de interações entre variáveis e a importância de seus efeitos para o sistema como um todo;
- Identificação de estoques e materiais em excesso no sistema;
- Capacidade de responder perguntas do tipo “*what-if*” (“o que ocorre se”), útil na proposição de novos sistemas.

Os mesmos autores citaram, ainda, as desvantagens da SED:

- A modelagem de um sistema real por meio da SED, geralmente é cara e consome tempo para ser desenvolvida;
- É necessário que o modelador seja treinado em um *software* comercial ou conheça alguma linguagem de programação;
- Os resultados de uma SED podem ser difíceis de serem interpretados, devido ao seu caráter estocástico;
- É necessária a validação do modelo computacional, do contrário, os resultados podem não ter utilidade alguma;
- Cada rodada de uma SED produz apenas estimativas de uma dada saída do modelo. Sendo assim, tornam-se necessárias várias replicações para um conjunto de parâmetros, de forma que os resultados possam ser interpretados corretamente;
- A SED pode ser utilizada de forma equivocada, quando uma solução analítica é viável e preferível.

No trabalho de Montevechi *et al.* (2015) foram identificados oito métodos de pesquisa em SED, alguns mais simples, outros mais detalhados. Contudo, todos eles visam guiar o analista no desenvolvimento de projetos de simulação.

Dentre os métodos identificados por Montevechi *et al.* (2015), o método proposto por Montevechi *et al.* (2010) é o que requer o maior número de etapas a serem seguidas durante a condução de um projeto de simulação. Os autores estruturaram as atividades de um projeto de simulação em três fases: concepção, implementação e análise.

Durante a concepção, são definidos os objetivos do projeto e é construído o modelo conceitual, por meio de técnicas de mapeamento do processo do objeto de estudo. Um modelo conceitual bem definido guia o analista na etapa de coleta de dados e agiliza a construção do modelo computacional (MONTEVECHI *et al.*, 2010).

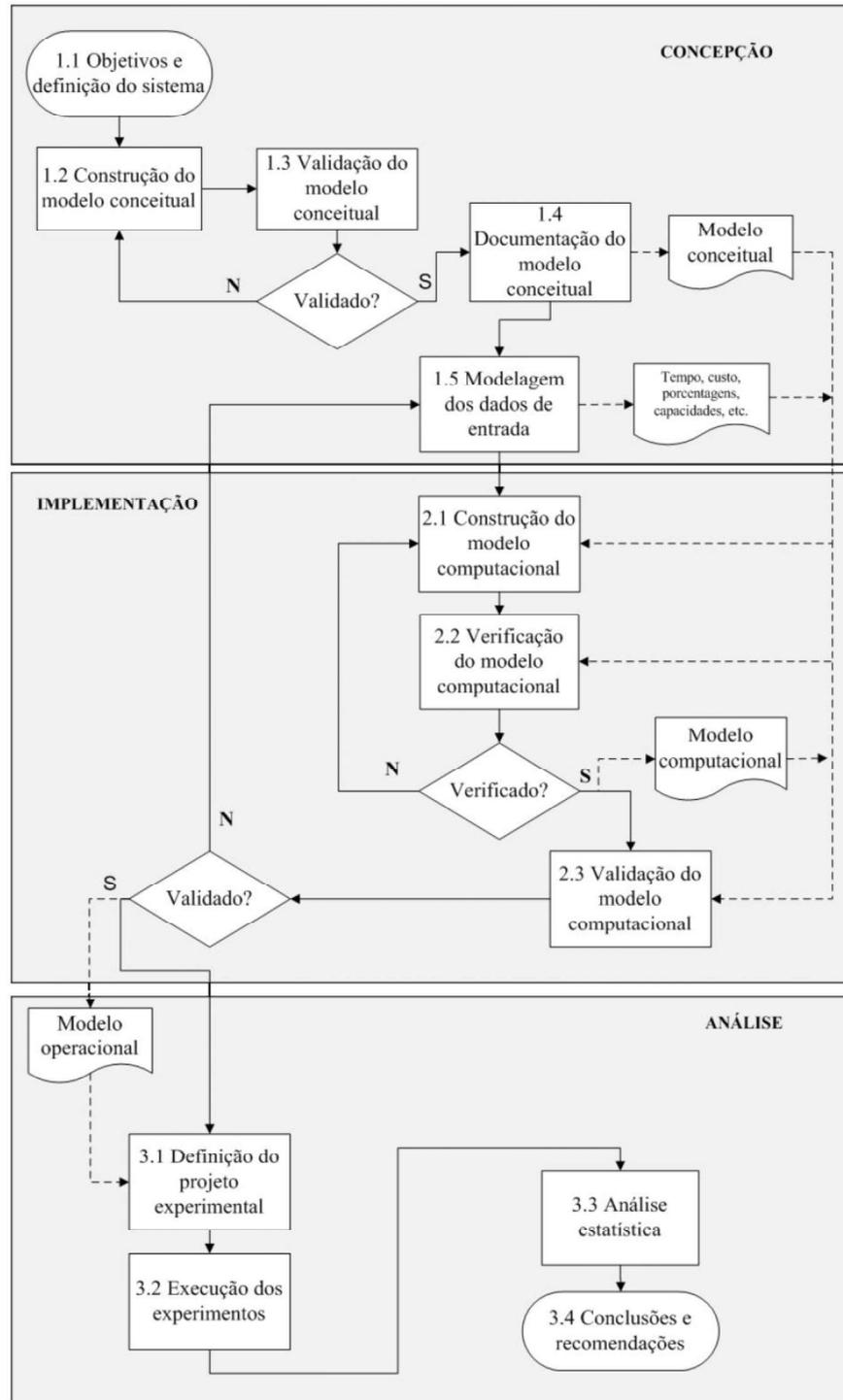
De acordo com Santana (2018), a fase de modelagem conceitual é a que recebe menor atenção durante o desenvolvimento de um projeto de simulação e, portanto, a menos entendida. O autor ainda citou que, observa-se um esforço maior durante esta etapa, quando o projeto é conduzido por pesquisadores mais experientes.

Na etapa de implementação, têm-se a construção do modelo computacional, a verificação e validação. Para Sargent (2020) a verificação de um modelo garante que a programação computacional e a implementação do modelo conceitual estejam corretas, de forma que o modelo seja executado corretamente. Ainda segundo o autor, a validação do modelo computacional determina se o comportamento de saída do modelo de simulação tem a precisão necessária para a finalidade pretendida. Pereira (2017) citou, ainda, que a validação de um modelo computacional pode ser dada de forma quantitativa, comparando as variáveis de saída do modelo com as variáveis de saída do sistema real.

Na última etapa, chamada de análise, é realizada a experimentação e análise dos resultados obtidos. Nesta etapa, o modelo verificado e validado pode ser usado na execução de diferentes cenários, recorrendo-se em muitas vezes das técnicas de OvS (AMARAL, 2021).

A estruturação das etapas de um projeto de simulação proposta por Amaral, (2021) é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Etapas de um projeto de Simulação a Eventos Discretos



Fonte: Amaral (2021)

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE PCP E SED

De acordo com Goodall, Sharpe e West (2019), técnicas de simulação computacional, como SED, SD e SBA têm sido usadas para descrever o comportamento de sistemas de

manufatura complexos e, dessa forma, auxiliar gestores nas tomadas de decisão, incluindo: definição de *layout*, gerenciamento da cadeia de suprimentos e estratégias de PCP.

Jeon e Kim (2016) realizaram um levantamento de trabalhos acadêmicos publicados no período de 2002 a 2014 que abordaram o uso de técnicas de simulação computacional para resolver problemas relacionados ao PCP. Neste trabalho, os autores sugeriram a técnica de simulação mais apropriada para cada um dos diferentes problemas enfrentados pelo PCP. Passa-se a comentar alguns trabalhos apresentados na publicação de Jeon e Kim (2016):

- Williams *et al.* (2001) propuseram um modelo de SED para auxiliar na construção de um estaleiro. Os autores pretendiam que o modelo auxiliasse não só na fase pré-operacional (implantação do estaleiro), permitindo visualizar as atividades de processamento do aço e identificando possíveis gargalos da instalação proposta, bem como, uma servisse com uma ferramenta de planejamento de produção, após a conclusão das instalações;
- Dohn e Clausen (2010) estudaram o planejamento de um pátio de placas de aço e a programação de guindastes em uma siderúrgica. Os autores combinaram um algoritmo heurístico com SED e decompueram o problema em duas etapas, definindo um conjunto de operações para os guindastes utilizados para transportar as placas de aço até os laminadores e atribuindo tais operações a cada um desses guindastes;
- Franke *et al.* (2006) integraram PL e SED para determinar a capacidade produtiva em uma indústria de remanufatura de telefones celulares;
- Gregg, Van Ande e Saylor (2011) apresentaram uma abordagem baseada em SED orientada a dados aplicada dentro da indústria aeronáutica para identificar a utilização de recursos e o planejamento da capacidade produtiva;
- Costa *et al.* (2008) descreveram os procedimentos usados para o planejamento de abastecimento de materiais para linhas de produção em uma indústria de eletrônicos. Por meio de SED, os autores realizaram experimentos para identificar e propor mudanças que levassem a uma melhor eficiência e precisão do funcionamento logístico;
- Miller e Simon (2014) lidaram com o planejamento de produção e atividades de logística de pequenas e médias empresas que se agrupam e cooperam entre si, ganhando força para competirem com as grandes empresas. Os autores utilizaram a SED para representar o processamento de pedidos e a produção dos produtos;

- Huang *et al.* (2009) desenvolveram um simulador em linguagem C++ para avaliar a eficácia e robustez de diferentes opções de planejamento e regras de atribuição da força de trabalho;
- Dombrowski e Ernst (2013) apresentaram uma abordagem de SED baseada em cenários para o planejamento de processos em uma companhia de médio porte fabricante de produtos de aço inoxidável;
- Vasudevan *et al.* (2010) aplicaram SED em conjunto com outras técnicas como: identificação de gargalos, análise de tempo de ciclo, avaliação de *layout* e Mapeamento de Fluxo de Valor para aumentar a confiabilidade e lucratividade de uma siderúrgica produtora de tubos de aço;
- Frantzén, Ng e Moore (2011) propuseram OvS para programar e reprogramar, de forma reativa e em tempo real, uma linha de usinagem em uma indústria automotiva na Suécia;
- Na abordagem de Son *et al.* (2002), os autores utilizaram SED não exclusivamente como ferramenta de análise e avaliação, mas também como um gerador de tarefas que conduzia as operações no chão de fábrica em tempo real;
- Do mesmo modo, Cho (2005) apresentou um modelo de SED para conduzir experimentos computacionais e avaliar o desempenho do sistema proposto em tempo real;
- Edis e Ornek (2009) aplicaram SED para estudar problemas de *Lot Streaming* – processo que consiste em dividir o trabalho em sublotes, permitindo que as operações sejam realizadas simultaneamente. Os autores utilizaram, ainda, um algoritmo heurístico para determinar o número de sublotes para cada tipo de produto;
- Korytkowski, Wiśniewski e Rymaszewski (2013) propuseram uma simulação baseada em regras de sequenciamento e utilizaram um algoritmo evolutivo para determinar soluções subótimas em um sistema de manufatura complexo com diferentes processos e produtos;
- Vinod e Sridharan (2011) empregaram SED e conduziram experimentos para avaliar a interação entre regras de sequenciamento e a data de entrega em um sistema produtivo dinâmico;

- Tavakkoli-Moghaddam e Daneshmand-Mehr (2005) apresentaram um modelo de simulação para resolver problemas de sequenciamento com o objetivo de minimizar o *makespan*;
- Ranaiefar *et al.* (2009) estudaram o fluxo de materiais dentro da maior fabricante de peças de aço do Irã, e conseguiram por meio de SED, melhorar a capacidade produtiva da companhia;
- Hübl *et al.* (2011) introduziram um modelo de SED para analisar um sistema de manufatura complexo e avaliar a performance logística, considerando fatores estocásticos em tempo de processamento, tempos de *setup* e recebimento de materiais.

2.5 MODELAGEM CONCEITUAL

De acordo com Kelton e Law (2000), a criação do modelo abstrato ou conceitual é o primeiro passo para o processo de modelagem em simulação. Para Brailsford *et al.* (2019), a modelagem conceitual descreve o sistema real que será simulado, independentemente de qualquer linguagem (código) de programação ou *software*. Ainda, segundo os autores, na modelagem conceitual, são descritos os objetivos, entradas e saídas, conteúdo, premissas e simplificações do modelo.

Montevechi *et al.* (2010) afirmaram que a modelagem conceitual pode aumentar a qualidade dos modelos de simulação e ainda reduzir o tempo necessário para a construção dos modelos computacionais. Para os autores, essa é a principal razão pela qual pesquisadores apresentam uma interligação entre técnicas de mapeamento de processos e projetos de simulação em seus trabalhos.

Santana (2018) defendeu que a validade das respostas de um modelo depende do que foi considerado na descrição do sistema. Por este motivo, faz-se necessária, a construção de um modelo conceitual, de modo que o modelo possa ser verificado antes de se investir recursos no desenvolvimento de um modelo computacional.

O autor apontou, ainda, que por meio de uma representação diagramática (fluxograma), é possível modelar um sistema de forma conceitual, e traduzindo as relações existentes entre seus elementos para uma ferramenta de simulação computacional, torna-se possível visualizar e caracterizar seu desempenho.

Segundo Montevechi *et al.* (2010), poucas técnicas de modelagem conceitual oferecem o suporte necessário para projetos de simulação. Os autores ainda apontaram que, apesar de

existirem diversas técnicas de mapeamento de processos, apenas algumas delas se concentram em projetos de simulação.

Para preencher esta lacuna, Leal, Almeida e Montevechi (2008) propuseram, a partir da combinação de técnicas de modelagem já existentes, uma nova técnica desenvolvida com foco em projetos de simulação, denominada IDEF-SIM.

Além da IDEF-SIM, técnica escolhida para modelagem deste trabalho, Scheidegger *et al.* (2018) citaram as técnicas usualmente utilizadas para modelagem conceitual de projetos envolvendo SED, são elas: BPM (*Business Process Modeling*), ACD (*Activity Cycle Diagram*), Fluxograma, SSM (*Soft System Methodology*) aplicada à SED e DEVS (*Discrete Event Systems Specifications*).

2.5.1 Técnica de modelagem IDEF-SIM

A técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM surgiu a partir de técnicas de modelagem já consagradas dentro do contexto do BPM, visando diminuir a distância entre a modelagem clássica de processos e a modelagem conceitual com foco em simulação (LEAL, 2008).

Leal, Almeida e Montevechi (2008) apontaram que, embora tenha sido desenvolvida com foco em projetos de simulação, a técnica deve ser compatível para outras finalidades, como projetos de melhoria em geral.

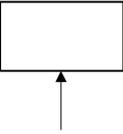
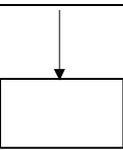
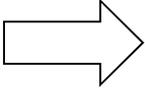
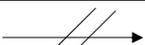
O IDEF-SIM foi desenvolvido a partir de elementos e simbologias já utilizados em técnicas de modelagem da família IDEF (*Integrated DEFinition Methods*), são elas: IDEF0 (*Integration DEFinition for Function Modeling*) e IDEF3 (*Integrated DEFinition for Process Description Capture Method*), além de um símbolo do Fluxograma (LEAL, 2008). Os elementos e símbolos utilizados são apresentados no Quadro 1.

De acordo com Montevechi *et al.* (2010), a principal característica da técnica IDEF-SIM é a semelhança de sua lógica de aplicação com a lógica utilizada na SED via *software*.

Para Pereira (2018), a utilização da técnica IDEF-SIM permite:

- diminuir o tempo de modelagem computacional;
- auxiliar na etapa de validação do modelo conceitual, facilitando a comunicação entre o especialista do processo e o programador;
- facilitar o registro e a documentação dos projetos de simulação, desconsiderando qualquer linguagem de programação, e, deste modo, favorecendo o entendimento do projeto.

Quadro 1 – Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM

Elementos	Simbologia	Técnica de origem	
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)	
Funções		IDEF0	
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3	
Recursos		IDEF0	
Controles		IDEF0	
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &	Regra E	IDEF3
	 X	Regra OU	
	 O	Regra E/OU	
Movimentação		Fluxograma	
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3	
Fluxo de entrada no sistema modelado			
Ponto final do sistema			
Conexão com outra figura			

Fonte: Leal (2008)

Isto posto, detalha-se a função de cada um dos elementos apresentados no Quadro 1, segundo a definição de Leal (2008):

- Entidade: itens a serem processados pelo sistema, representando matéria-prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros. As entidades podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo, e são movimentadas por meios próprios ou por meio de recursos. Uma vez que a entidade é representada, o símbolo aparecerá novamente, apenas, quando uma nova entidade for criada. Deste modo, fica claro o número de entidades a ser utilizada e em quais momentos a entidade passará por uma transformação;

- Funções: representam os locais nos quais a entidade sofrerá uma ação. Entendem-se como funções: postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques e postos de atendimento. Estas funções podem modificar uma entidade, como no caso de postos de trabalho, ou mesmo alterar o ritmo desta entidade, como uma fila de espera (fila, estoque);
- Fluxo de entidade: direcionamento das entidades dentro do modelo. Caracteriza os momentos de chegada e saída da entidade nas funções;
- Recursos: representam os elementos utilizados para movimentar as entidades e executar as funções. Os recursos podem representar pessoas e equipamentos, e podem ser estáticos ou dinâmicos. Os recursos estáticos não são dotados de movimento, enquanto os recursos dinâmicos podem se mover sobre um caminho definido;
- Controles: regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros;
- Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: Estas regras são chamadas de junções na técnica IDEF3. Dois ou mais caminhos podem ser executados juntos, após uma função (junção E), de forma alternativa (junção OU), ou então permitindo ambas as regras (junção E/OU);
- Movimentação: representa um deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita ter efeito importante sobre o modelo. Ao representar este elemento, espera-se encontrar no modelo computacional uma programação específica para este movimento, como tempo gasto e recurso utilizado;
- Informação explicativa: utilizado para inserir uma explicação no modelo, com o objetivo de facilitar o entendimento;
- Fluxo de entrada no sistema: define a entrada ou a criação de entidades dentro do modelo;
- Ponto final do sistema: define o final de um caminho dentro do fluxo modelado. Tudo o que estiver além deste ponto, está fora dos limites do modelo;
- Conexão com outra figura: utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo será apresentada a aplicação da SED no PCP em um problema real de uma fundição de grande porte, de modo que a implementação do modelo computacional atue como uma ferramenta gerencial e dê suporte às tomadas de decisão. Além disso, serão apresentados os modelos conceituais construídos a partir da técnica IDEF-SIM, a coleta e a preparação dos dados de entrada e a etapa de validação do modelo computacional.

3.1 A EMPRESA OBJETO DE ESTUDO

Criada a partir de uma *joint venture* entre os grupos americanos Amsted Industries e The Greenbrier Companies e a multinacional brasileira Iochpe-Maxion, a Amsted Maxion sucedeu a antiga FNV – Fábrica Nacional de Vagões, tornando-se a maior referência latino-americana no desenvolvimento e fabricação de fundidos ferroviários.

A fundição, situada na cidade de Cruzeiro, interior do estado de São Paulo, é também consolidada no fornecimento de fundidos industriais para os setores de mineração, máquinas e equipamentos para construção civil, sucroalcooleiro e caminhões fora de estrada, utilizando tecnologia de ponta para produzir peças de 10 quilos a 5 toneladas em aço carbono e baixa liga, atendendo tanto o mercado doméstico quanto internacional.

De forma geral, a planta conta com duas subdivisões:

- RAF – Rodas Ferroviárias: nesta divisão, a Amsted Maxion produz rodas ferroviárias para vagões de carga e locomotivas em aço microligado. Com um portfólio de mais de 10 modelos e capacidade instalada anual para produção 80 mil unidades, as rodas são produzidas a partir de moldes de grafite, chamados também de moldes permanentes, já que permitem a fabricação de diversas rodas com um único molde;
- Fundição Areia: nesta divisão, são produzidos os demais componentes ferroviários e todos os itens do segmento industrial. A produção destes itens exige a utilização de moldes de areia, por permitirem a fabricação de peças com maior complexidade geométrica. Entretanto, estes moldes são colapsáveis e, portanto, são utilizados para a produção de uma única peça. A Fundição Areia possui capacidade instalada anual para produção de 30 mil toneladas de peças e conta com dois Fornos Elétricos a Arco (FEA) de 12 toneladas cada.

O objeto de estudo se caracteriza pelas áreas geradoras dos fundidos na Fundação Areia, que serão descritas com maior nível de detalhes na descrição do problema, Seção 3.2.

3.2 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Primeiramente, é imprescindível em um trabalho de SED que seja feita uma análise preliminar, de forma a determinar todos os aspectos que serão realmente relevantes e que terão impacto na avaliação que se deseja fazer (PEREIRA, 2018).

Ainda segundo o autor, deve-se ter atenção ao nível de detalhamento do modelo de modo a não comprometer a qualidade da simulação em relação ao sistema real, mas, por outro lado, evitar detalhes desnecessários que possam tornar o modelo computacional excessivamente complexo, aumentando o tempo computacional para obtenção das respostas da simulação e/ou OvS.

A área geradora de fundidos na Fundação Areia é compreendida pela aciaria, as linhas de moldagem e seus respectivos pátios de vazamento e, por fim, os sistemas de desmoldagem, que separam a peça do molde de areia.

A empresa estudada conta com quatro linhas de moldagem distintas, são elas: Linha 300, Linha 150, Linha 301 e Linha C2. A produção destes moldes é destinada a cada uma das linhas levando-se em consideração fatores como: custo de produção, capacidade produtiva, demanda, características do ferramental, e restrições de máquinas e equipamentos relacionadas a peso e tamanho dos moldes. A disposição das linhas de moldagem é apresentada na Figura 41 – Anexo B.

Em geral, na Linha 300, são produzidos moldes de peças grandes e alta demanda. Em alguns casos, toma-se a decisão de confeccionar o ferramental com mais de uma peça por placa, de modo que o tamanho do molde se adeque à linha. Devido à característica dos ferramentais da Linha 300, se faz necessária a utilização de caixas de moldagem, empregadas para conferir sustentação e manter a areia utilizada na produção dos moldes.

Da mesma forma, na Linha 150, a demanda dos itens produzidos também é considerável. Entretanto, os moldes produzidos são menores, sendo considerados de médio porte. A Linha 150 difere, ainda, da Linha 300 em relação ao uso de caixas de moldagem, não sendo necessárias caixas de moldagem, devido à característica do ferramental. Portanto, os ferramentais não são intercambiáveis entre as duas linhas, de modo que um molde produzido na Linha 150 não pode ser produzido na Linha 300 e vice-versa.

Os moldes extragrandes são produzidos na Linha 301. Estes moldes não podem ser produzidos nas Linhas 150 ou 300 devido a restrições de capacidade de máquinas e equipamentos. Na Linha 301 são, majoritariamente, produzidos moldes de peças denominadas internamente na empresa de “industrial pesado”, podendo chegar a 5 toneladas. Em alguns casos, peças menores, mas com demandas inexpressivas são produzidas na Linha 301, de forma a não impactar negativamente no *takt time* das Linhas 150 ou 300.

Por fim, na Linha C2, são produzidas peças pequenas, cujo ferramental contempla diversas peças por ferramental e que, a partir dos quais, os moldes produzidos são empilhados, unidos por um único canal de vazamento em comum, denominados moldes em “árvore”.

Para cada uma das linhas descritas, existe um respectivo pátio de vazamento. Os pátios de vazamento são áreas nas quais os moldes são depositados depois de produzidos e aguardam até que aconteça o processo de vazamento.

As plantas baixas das linhas de moldagem, bem como a identificação dos objetos relevantes estão apresentadas no Anexo B.

A estratégia de produção utilizada pela empresa estudada representa um caso típico de sistema *Make to Order* (MTO), ou seja, a produção de um determinado item se inicia apenas após a ordem de um cliente ser recebida e aprovada pela empresa. Isso se deve ao fato de que os itens são produzidos de forma customizada, seguindo as especificações técnicas fornecidas por determinado cliente e, portanto, são de uso exclusivo deste mesmo cliente.

Após o recebimento e aprovação dos pedidos pela área comercial, o Plano Mestre de Produção é gerado pelo PCP. Nele, são listados todos os itens que devem ser produzidos em um determinado mês, com a data correspondente em que cada um desses itens deve ser disponibilizado no estoque final, liberado para embarque e entrega no cliente.

As datas de liberação são determinadas com base nas capacidades das linhas de acabamento e tempos definidos pela Engenharia de Fundição para a execução dos processos de cada um dos itens. Entende-se, aqui, por linha de acabamento, a área responsável pelos processos de rebarbação, calibração, ensaios não-destrutíveis (END) e recuperação por soldagem de possíveis defeitos de fundição. Portanto, o tempo de acabamento engloba todos esses processos citados.

A partir das datas de liberação dos itens já definidas e do *lead time* já conhecido de todos os processos intermediários entre geração e acabamento (corte e quebra de canais e massalotes, tratamento térmico e decapagem mecânica), o PCP determina a data de moldagem. No caso de itens novos (em desenvolvimento), o *lead time* é estimado pela Engenharia e, ao longo do desenvolvimento, os tempos dos processos são ajustados.

Com base no Plano Mestre de Produção mensal, o PCP libera as ordens de produção semanalmente para a moldagem, sempre levando em consideração o atendimento ao programa da semana anterior e fazendo ajustes necessários de acordo com imprevistos, como quebra de equipamentos ou reparos no ferramental, e ordens urgentes que precisam ser encaixadas no programa.

O programa semanal da moldagem gera o sequenciamento da fabricação de aço na aciaria, conhecido como “corrida”. Este sequenciamento é constantemente controlado e alterado, uma vez que, para a fabricação do aço, deve-se ter uma corrida fechada, ou seja, a somatória da quantidade de um determinado tipo de aço requerida para preencher os moldes aguardando vazamento no pátio, deve ser ao menos igual ao volume de aço de uma panela de vazamento, do contrário, haveria desperdício de aço.

A aciaria da fundição areia dispõe de dois FEA (F1000 e F1001) com capacidade nominal para a produção de 12 toneladas de aço cada. Entretanto, a produção é restringida pela capacidade das panelas, que limita a produção de aço a 11 toneladas por corrida.

Considera-se como capacidade efetiva de geração, 10,5 toneladas por corrida, já que, das 11 toneladas produzidas, cerca de 500 kg (0,5 tonelada) não é aproveitada, sendo uma parte do aço produzido destinada para a lavagem da válvula da panela antes do vazamento e outra parte que não pode ser aproveitada pois trata-se de escória, formada durante a fabricação do aço.

Vale destacar que, no momento que este trabalho é conduzido, dificilmente os dois FEA trabalham em paralelo. A fabricação do aço consiste em uma parte considerável dos custos de produção dos fundidos e, portanto, não é viável manter os dois FEA em operação, a menos que isso seja justificado por um aumento expressivo da demanda.

O intervalo entre a produção de uma corrida e a corrida subsequente é conhecido como *tap to tap*. Embora tenham a mesma capacidade de fabricação de aço em volume, os dois FEA não possuem a mesma potência e, portanto, a capacidade de fusão do aço não é a mesma.

Com apenas um FEA em operação, a fabricação acontece de segunda a sábado, e aos domingos acontece a reforma do forno, necessária devido ao desgaste natural do revestimento refratário.

Conforme já abordado, na aciaria acontece a fabricação do aço de acordo com a produção dos moldes nas linhas de moldagem.

A principal matéria-prima é a sucata de aço e, em seguida, acontece o refinamento, no qual adicionam-se elementos de liga para se obter a especificação técnica de composição química, conhecida como receita. O tipo de aço requerido por cada um dos itens está

apresentado na Tabela 9 – Anexo E, juntamente com outros atributos que ainda serão detalhados.

A Linha 300 opera sempre com três diferentes itens por vez no *loop* de enchimento. Entende-se por *loop* de enchimento a seção desde a entrada do modelo na linha até a extração do molde produzido.

Após a entrada na linha de produção, os modelos recebem a caixa de moldagem e os insumos necessários para sua produção. Em seguida, seguem para a etapa de enchimento, na qual um equipamento denominado misturador despeja areia sobre a caixa onde está o modelo.

Transcorrido o tempo de cura da areia, a areia fica enrijecida e o molde pronto para ser extraído do modelo. Neste ponto, o molde segue para as demais etapas do fluxo de produção dos moldes (pintura, montagem de machos e fechamento) e o modelo volta para a produção de um novo molde ou sai da linha para permitir a entrada de um novo modelo, caso a demanda deste item já tenha sido atendida.

O processo descrito é feito duas vezes por peça (metade tampa e metade fundo) e no final da linha, na operação de fechamento, essas duas partes são unidas com auxílio de um pórtico e uma talha. Todo o processo anterior ao fechamento não é de interesse de estudo deste trabalho e, portanto, é a partir deste ponto que se inicia o modelo conceitual da Linha 300 apresentado na Figura 47 – Anexo D.

Na sequência à operação de fechamento, os moldes são transportados para um *buffer* (L1 da Figura 47), com capacidade para armazenar até 6 moldes. Neste momento, os moldes são identificados com uma etiqueta com um código de barras que informa: modelo, número de série e data e hora de moldagem. A produção é registrada por um coletor de dados portátil que envia as informações para um banco de dados da rede interna da empresa estudada. A partir deste banco de dados, é possível gerar relatórios e determinar o tempo de ciclo de moldagem.

Os moldes no *buffer* (E1 da Figura 47), aguardam a disponibilidade de uma ponte rolante (R1 da Figura 47) para serem transportados até o pátio de vazamento. O pátio de vazamento da Linha 300 possui uma área de 250 m², portanto, a capacidade de armazenamento varia de acordo com a área efetiva ocupada por cada um dos moldes. A área efetiva ocupada pelos moldes está disposta na Tabela 9 – Anexo E.

No pátio de vazamento, os moldes aguardam até que seja formada uma corrida, isto é, até que a soma do volume de um determinado tipo de aço requerido pelos moldes, seja suficiente para disparar a produção deste aço (E2 da Figura 47) na aciaria (L2 da Figura 47).

Assim que a fabricação do aço é concluída de acordo com os parâmetros definidos pela Engenharia de Processos, uma ponte rolante (R2 da Figura 47) carrega a panela com o aço para

ser vazado nos moldes. Nota-se que, não necessariamente, todo o aço da panela será destinado exclusivamente a moldes de um mesmo pátio de vazamento.

O número da corrida, temperatura, data e hora de vazamento, tipo de aço entre outros parâmetros são inseridos num banco de dados por meio de um coletor de dados portátil, que também registra os moldes vazados, permitindo a rastreabilidade dos itens gerados.

Uma vez vazados (E3 da Figura 47), os moldes da Linha 300 aguardam a solidificação do aço no pátio de vazamento e um tempo mínimo de movimentação, definido pela Engenharia de Processos, apresentado na Tabela 9 – Anexo E.

Os moldes são, então, transportados por uma ponte rolante (R1 da Figura 47) até o pátio de resfriamento. Ali, aguardam até que se passe o tempo mínimo de desmoldagem, também definido pela Engenharia de Processos (Tabela 9 – Anexo E), e que a temperatura da areia dos moldes seja inferior a 120 °C, do contrário, o sistema de regeneração da areia desarma como medida protetiva do equipamento.

Satisfazendo essas duas condições o molde é levado para a área de desmoldagem (R1 da Figura 47) onde acontece a separação da peça (E4 da Figura 47) e do molde (E5 da Figura 47), com auxílio de uma ponte rolante (R3 da Figura 47)

Em um equipamento denominado desmoldador (R4 da Figura 47), remove-se o excesso de areia da peça e da caixa de moldagem e, assim como na produção de moldes e no vazamento, os itens desmoldados são registrados por meio de um coletor de dados portátil.

Neste ponto, é estabelecido o limite final do sistema, sendo que, a peça segue para os demais processos do fluxo produtivo e a caixa de moldagem retorna para a produção de um novo molde. A areia, por sua vez, é reutilizada no processo após passar pelo sistema de regeneração.

O *modus operandi* da Linha 150 não difere muito da Linha 300, exceto por algumas particularidades. Conforme já descrito nesta seção, para a produção de moldes na Linha 150 não são necessárias caixas de moldagem, devido à característica do ferramental. Dessa forma, os moldes são produzidos em “bolo”, como é conhecido dentro da empresa estudada.

A Linha 150 também conta com um *loop* de enchimento, onde ocorrem as etapas de preparação do molde, enchimento e cura da areia. Entretanto, diferentemente da Linha 300, a Linha 150 opera sempre com cinco ferramentais diferentes, de forma a otimizar a produtividade da linha, de acordo com estudos prévios já realizados.

Após a cura da areia, a extração ocorre por meio de um equipamento denominado *rollover*, que faz a extração dos moldes tampa e fundo de forma automática. Os moldes seguem para as etapas de pintura e montagem de machos e, em seguida, são unidos na etapa de

fechamento. Neste ponto, se inicia o mapeamento para construção do modelo conceitual por meio da técnica IDEF-SIM.

Os moldes aguardam em uma mesa de roletes (L1 da Figura 48) até serem transportados pela ponte rolante (R1 da Figura 48) para o pátio de vazamento da Linha 150 (L3 da Figura 48). Assim que uma corrida é formada, é disparada a fabricação do aço na aciaria (L2 da Figura 48) para que ocorra o vazamento.

Dado o vazamento, os moldes aguardam um tempo mínimo para movimentação (Tabela 9 – Anexo E) e, em seguida, seguem para a área de desmoldagem com auxílio da ponte rolante (R1 da Figura 48). A área de desmoldagem (L4 da Figura 48) é compartilhada pelas Linhas 150 e 301, e sua capacidade de armazenamento de moldes é bastante limitada. É neste ponto que o processo se difere da Linha 300, que conta com um pátio próprio para o resfriamento dos moldes.

Caso a área de desmoldagem esteja completamente ocupada, os moldes seguem seu resfriamento no próprio pátio de vazamento e seguem diretamente para a desmoldagem (L5 da Figura 48), tendo transcorrido o tempo mínimo necessário (Tabela 9 – Anexo E).

A desmoldagem na Linha 150 acontece com auxílio de um pórtico (R3 da Figura 48) e um desmoldador (R4 da Figura 48), que também são compartilhados com a Linha 301. Assim como é feito na Linha 300 e nas demais linhas de moldagem, os itens desmoldados são registrados por meio de um coletor de dados portátil e alimentam o sistema interno da empresa.

A Linha 301 é onde são produzidos os maiores moldes e, diferentemente das Linhas 300 e 150, não funcionam em “linha” propriamente dito. Os ferramentais são posicionados no piso, sob o raio de ação do misturador. Até 3 modelos podem ser posicionados de uma só vez (6 modelos, considerando tampa e fundo) mas, dependendo do tamanho dos modelos, apenas 2 já ocupam toda a área destinada ao enchimento.

Enquanto acontece o enchimento de um molde, outro modelo já está sendo preparado com os insumos necessário para receber a areia em sequência. Após o enchimento e a cura da areia, acontece a extração e os moldes são levados para outra área, onde acontece a pintura com tinta refratária, a montagem dos machos e o fechamento, com auxílio de um pórtico, das partes tampa e fundo, que formam um molde completo. Neste ponto, se inicia o mapeamento para a construção do modelo conceitual.

Os moldes seguem com a ponte rolante (R2 da Figura 49) até o pátio de vazamento, ou, com um pórtico (R1 da Figura 49) seguem para uma área onde aguardam até que seja liberada área suficiente para receber o molde em questão. O transporte dos moldes desta área de espera até o pátio de vazamento também é feito com a ponte rolante (R2 da Figura 49).

No pátio de vazamento (L3 da Figura 49), o processo não difere das Linhas 300 e 150. Os moldes aguardam até que uma corrida seja formada para o disparo da fabricação do aço correspondente. O aço é, então, produzido na aciaria (L2 da Figura 49) e transportado na panela de vazamento pela ponte rolante (R3 da Figura 49) para ser vazado nos moldes.

Nesta etapa, o fluxo da Linha 301 se assemelha ao fluxo da Linha 150, pois não conta com um pátio para o resfriamento dos moldes. Desta forma, os moldes seguem para a área de desmoldagem (L4 da Figura 49 – compartilhada com a Linha 150), passado o tempo mínimo necessário para a movimentação, ou, em caso de ocupação total desta área, os moldes seguem resfriando no próprio pátio de vazamento, até atingirem o tempo necessário para desmoldagem.

Tanto o transporte dos moldes para a área de desmoldagem, como o transporte dos moldes direto para a desmoldagem é feito por meio de uma ponte rolante (R2 da Figura 49). O processo de desmoldagem acontece com auxílio de um pórtico (R4 da Figura 49) e um desmoldador (R5 da Figura 49). Neste ponto está delimitado o limite final do modelo conceitual da Linha 301, de modo que a caixa de moldagem volta para a produção de um novo molde e a peça segue seu processo produtivo dentro da planta. Finalmente, a produção é registrada por meio de um coletor de dados portátil.

Por fim, a Linha C2 opera com no máximo 3 modelos de uma vez. Os modelos tampa e fundo são posicionados em um carrossel, onde ocorrem as etapas de preparação do modelo, enchimento, cura da areia e, quando o carrossel dá uma volta completa, acontece a extração do molde e o modelo segue novamente para preparação e enchimento.

Conforme já apresentado nesta seção, os moldes de um mesmo modelo são empilhados formando o que é conhecido como moldes em “árvore”. Cada modelo possui uma quantidade específica de moldes empilhados, e isso é previsto durante o projeto de alimentação do fundido.

O modelo conceitual da Linha C2 passa a ser mapeado a partir do momento em que estes moldes já estão prontos e encontram-se numa área de moldes fechados (L1 da Figura 50). As pontes rolantes não têm acesso à Linha C2 e, portanto, os moldes são transportados para o pátio de vazamento com auxílio de empilhadeira (R1 da Figura 50).

No pátio de vazamento (L4 da Figura 50), os moldes aguardam a formação de uma corrida completa para serem vazados. Estes moldes, especificamente, não possuem tempo mínimo de movimentação, portanto, aguardam no próprio pátio de vazamento o tempo necessário para desmoldagem.

Dado este tempo requerido, apresentado na Tabela 9 – Anexo E, os moldes seguem para a desmoldagem (L5 da Figura 50 – o mesmo sistema de desmoldagem utilizado pelos moldes das Linhas 150 e 301). Os moldes são, então, posicionados diretamente sobre o desmoldador

(R5 da Figura 50), com auxílio de uma ponte rolante (R4 da Figura 50). Os registros da produção acontecem da mesma forma como já descrito para as demais linhas de moldagem.

Assim, todas as linhas de moldagem foram apresentadas com detalhes. Na Tabela 9 – Anexo E, estão descritos os tipos de aço para cada um dos itens, o peso (leia-se massa) de aço que cada um dos moldes requer para ser vazado, o tempo mínimo para movimentação dos moldes após o vazamento, o tempo para desmoldagem e a área que cada um deles ocupa nos pátios de vazamento.

A operação na aciaria não foi descrita, uma vez que a intenção deste trabalho não é apresentar no detalhe como se dá a fabricação do aço. O mais importante aqui, é o tempo para a fabricação de uma corrida, e como se dá a sequência do tipo de aço que será produzida. Para tal, foi feita uma consideração que se assemelha bastante com o que acontece na prática: o disparo para a produção de aço se dá assim que a soma do peso necessário para vaziar um conjunto de moldes no pátio de vazamento de um mesmo tipo de aço, é igual a 10,5 toneladas.

A transferência de moldes para os pátios de vazamento, pátio de resfriamento e sistemas de desmoldagem pode ser impossibilitada durante o processo de vazamento, uma vez que o trilho das pontes rolantes é o mesmo ao longo de todo o galpão da área de moldagem.

Os tempos definidos para a produção de moldes nas linhas de moldagem e os tempos para desmoldagem nos desmoldadores foram levantados a partir dos dados registrados pelos coletores portáteis que ficam disponíveis no banco de dados interno da empresa estudada. Estes dados estão apresentados no Anexo F.

3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO OBJETO DE ESTUDO

Com o modelo conceitual desenvolvido, passa-se para as fases de modelagem dos dados de entrada e construção do modelo computacional. O *software* escolhido para a construção do modelo computacional foi o ProModel®, já usado pela empresa patrocinadora.

Foi utilizada como cenário para a simulação, a própria planta da área de geração de fundidos em escala, extraída do projeto em *dwg* (formato do *software* AutoCAD®), conforme Figura 41 – Anexo B.

Foram usados, também, os *softwares* estatísticos Stat::Fit®, que vem integrado ao ProModel® e o Minitab®, no tratamento de dados e geração das distribuições probabilísticas, e o Microsoft Office Excel® que, por meio de uma interface com o ProModel®, foi usado para importar as ordens de produção pra o simulador e os parâmetros de produção de cada item

(Tabela 9 – Anexo E). Ainda no Capítulo 3, a utilização de cada um dos *softwares* será apresentada com mais detalhes.

3.3.1 Coleta e tratamento dos dados de entrada

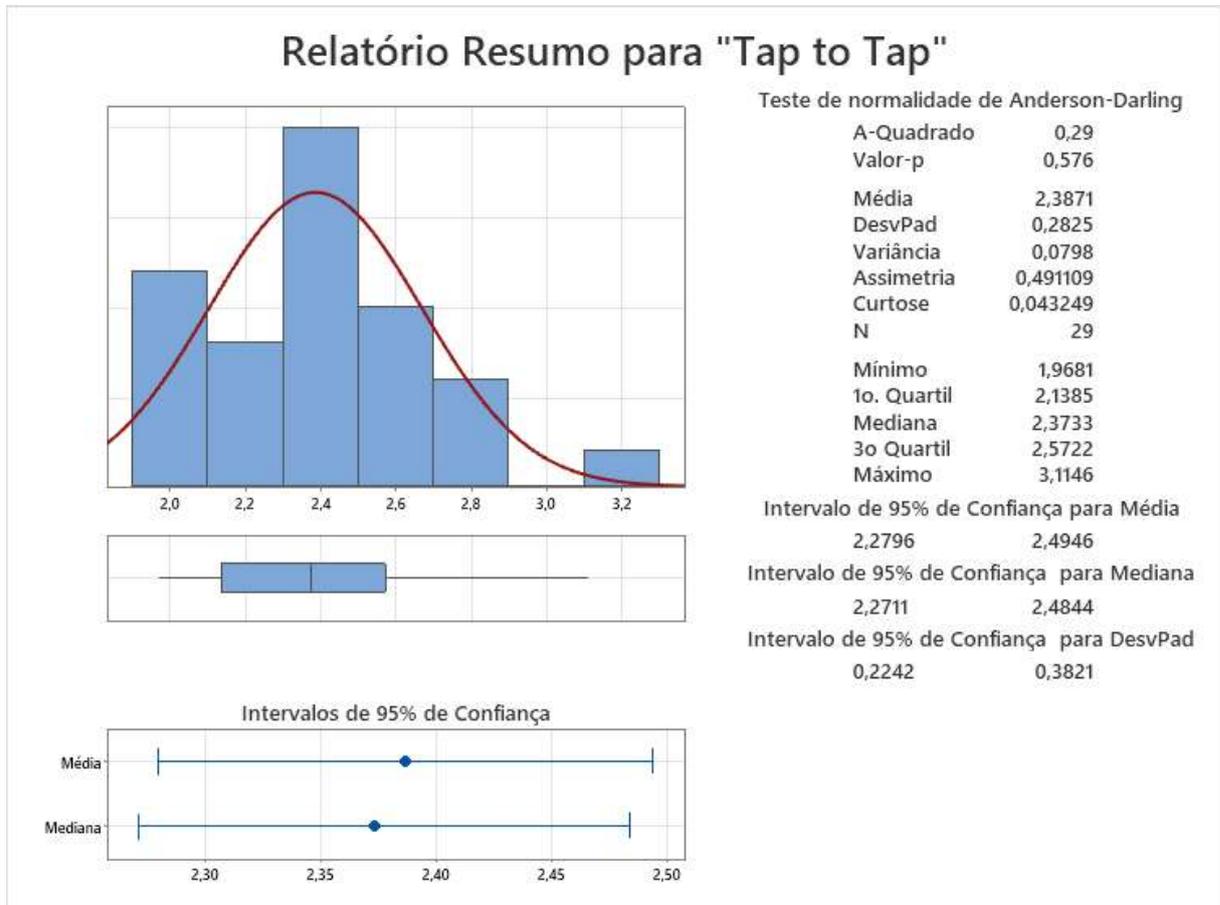
Primeiramente é importante, durante a coleta de dados, atentar-se à qualidade das informações levantadas. Essa preocupação em dispor de dados adequados é exposta na expressão GIGO (*Garbage In Garbage Out*) (MACIEL, 2016), que significa que dados de entrada equivocados ou pouco trabalhados geram resultados igualmente equivocados (LEAL, 2008).

A distribuição probabilística para representar o *tap to tap* da aciaria foi gerada da seguinte forma: a partir da rede interna da empresa estudada, foi gerado um relatório de todas as corridas ocorridas no mês de outubro de 2022. Para cada corrida há o registro de data e hora e, dessa forma, tornou-se possível calcular o tempo entre corridas (*tap to tap*). Em seguida foi calculado o *tap to tap* médio para cada dia do mês. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 10 do Anexo F, e foram exportados para que pudessem ser trabalhados no Minitab®.

Primeiramente, aplicou-se aos dados uma formatação condicional para analisar e expurgar, se necessário, tempos em que ocorreram eventos especiais (*outliers*). Os tempos encontrados em dois dias (16/out e 30/out) foram eliminados e estão destacados em vermelho na Tabela 10 – Anexo F. Os valores expurgados são referentes a domingos, sendo assim, a análise é válida, já que, usualmente, a reforma dos fornos acontece aos domingos e, portanto, não há corridas suficientes para calcular o *tap to tap*.

Na Figura 18, está o teste de normalidade, realizado por meio do Minitab®. Vale lembrar que os *outliers* já foram removidos da amostra para a realização do teste.

Figura 18 – Teste de normalidade para amostra de dados *tap to tap*, realizado por meio do Minitab®

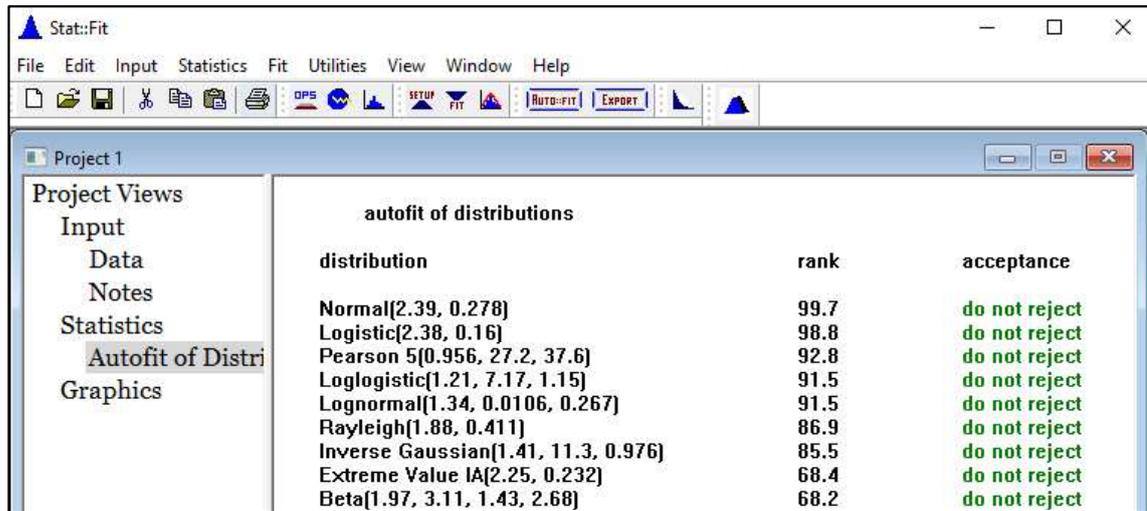


Fonte: Empresa estudada (2022)

No teste realizado, o valor-p encontrado foi 0,576. Como o valor-p encontrado é maior do que o nível de significância 0,05, aceita-se a hipótese de normalidade para os dados da amostra.

Para efeito de comparação, o *software* Stat::Fit® também foi usado para verificar a aderência dos dados da amostra *tap to tap* a uma distribuição normal. O resultado das distribuições probabilísticas aceitas, estando entre elas a distribuição normal, está apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Teste de aderência de distribuições para amostra de dados *tap to tap*, realizado por meio do Stat::Fit®



distribution	rank	acceptance
Normal(2.39, 0.278)	99.7	do not reject
Logistic(2.38, 0.16)	98.8	do not reject
Pearson 5(0.956, 27.2, 37.6)	92.8	do not reject
Loglogistic(1.21, 7.17, 1.15)	91.5	do not reject
Lognormal(1.34, 0.0106, 0.267)	91.5	do not reject
Rayleigh(1.88, 0.411)	86.9	do not reject
Inverse Gaussian(1.41, 11.3, 0.976)	85.5	do not reject
Extreme Value IA(2.25, 0.232)	68.4	do not reject
Beta(1.97, 3.11, 1.43, 2.68)	68.2	do not reject

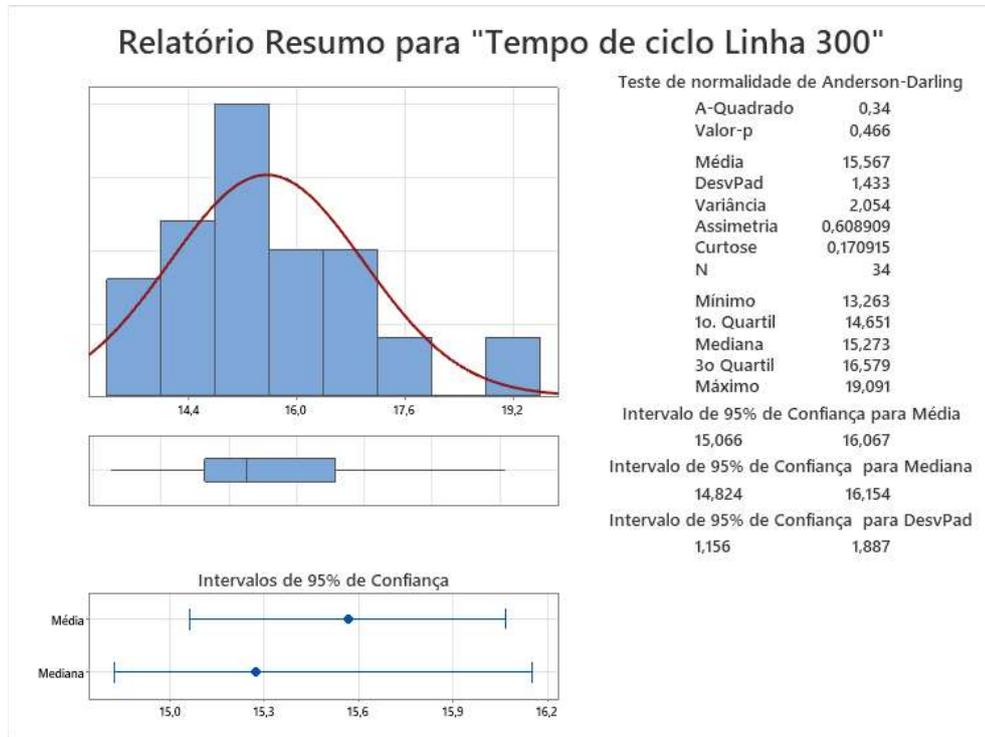
Fonte: Empresa estudada (2022)

Igualmente ao *tap to tap*, os tempos de processo das linhas de moldagem foram obtidos por meio da rede interna da empresa estudada.

A produção de moldes foi estruturada por dia e por linha de moldagem. Em seguida, dividiu-se o número de moldes produzidos pelas horas trabalhadas e, a partir deste valor, tornou-se possível determinar o tempo de ciclo (em minutos) da produção de moldes, dividindo 60 (minutos) pelo número de moldes produzidos.

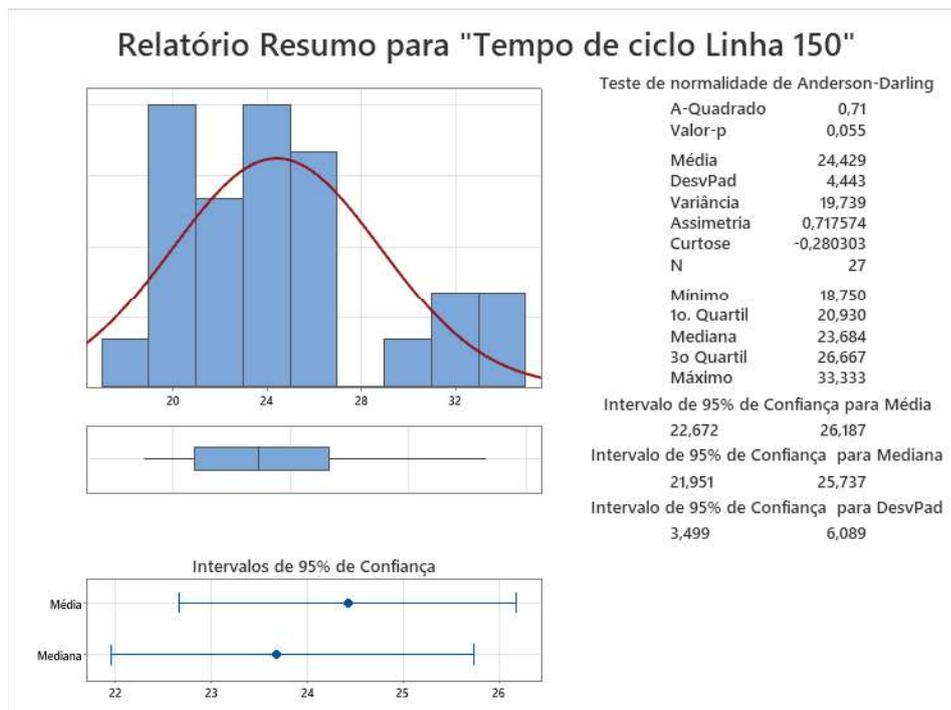
Nas Figuras 20, 21, e 22 estão apresentados os testes de normalidade para os dados obtidos das Linhas 300, 150, e 301, respectivamente. Os testes foram realizados a partir dos tempos de ciclo expostos nas Tabelas do Anexo F, expurgando os *outliers*, destacados em vermelho.

Figura 20 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 300, realizado por meio do Minitab®



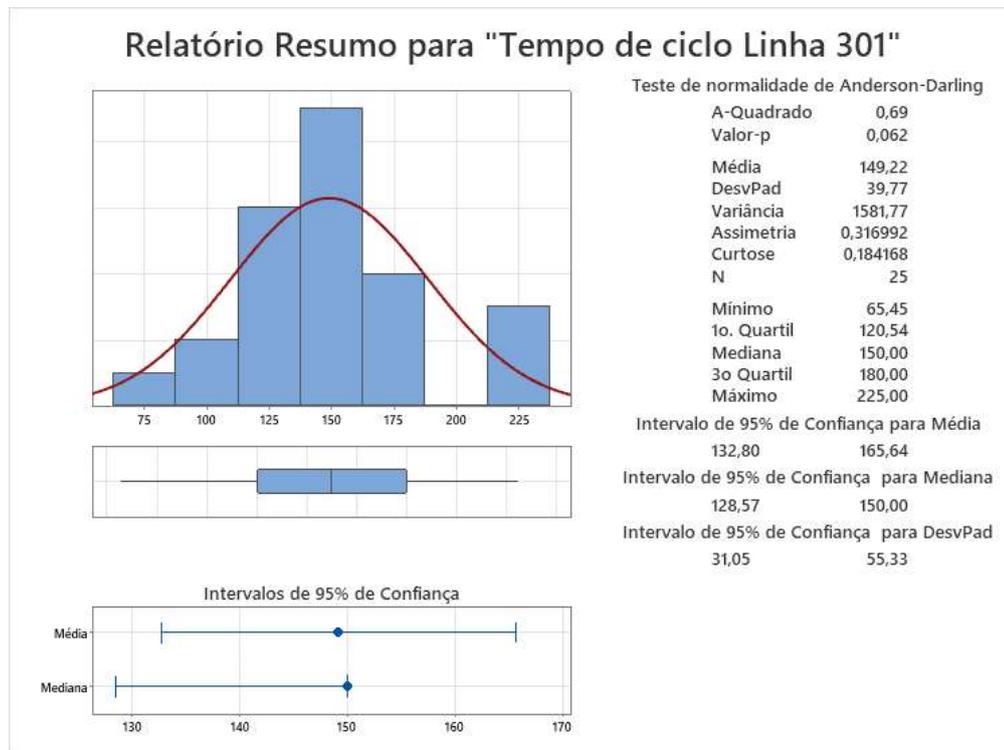
Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 21 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 150, realizado por meio do Minitab®



Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 22 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo da Linha 301, realizado por meio do Minitab®



Fonte: Empresa estudada (2022)

A hipótese de normalidade foi satisfeita para as amostras de tempos de ciclo das linhas de moldagem apresentadas, uma vez que o valor-p encontrado é maior que o nível de significância 0,05.

A demanda para a Linha C2 esteve, ao longo do ano de 2022, bem abaixo da capacidade produtiva. Por este motivo, se tornou difícil determinar uma distribuição estatística que representasse de forma adequada o tempo de ciclo desta linha de produção, com base nos relatórios de produção gerados internamente. Logo, uma distribuição triangular se apresenta como uma boa alternativa para representar o tempo de ciclo da Linha C2.

Conforme afirmaram Chwif e Medina (2010), uma distribuição triangular modela situações em que não se conhece a forma exata da distribuição, mas têm-se estimativas para o menor valor, para o valor mais provável de ocorrer (moda) e para o maior valor. A distribuição triangular utilizada está apresentada no Quadro 2.

O último processo do sistema a ser simulado pelo qual os moldes passam é a desmoldagem. A empresa estudada conta com três sistemas de desmoldagem independentes, são eles: S1, S2 e S3.

Não há restrições quanto ao sistema de desmoldagem a ser usado de acordo com a linha de moldagem em que o item foi produzido. Entretanto, os moldes da Linha 300 são, em sua grande maioria, desmoldados no Sistema S1 (devido à proximidade física dos locais), enquanto os moldes da Linha 150, por exemplo, são predominantemente desmoldados no Sistema S2. Na Tabela 3, estão apresentados os locais de desmoldagem dos moldes, de acordo com a linha em que foram moldados, em termos proporcionais.

Tabela 3 – Sistema de desmoldagem de acordo com a linha de moldagem

Linha de Moldagem	Sistema de Desmoldagem	Itens desmoldados
Linha 300	S1	86%
	S2	9%
	S3	5%
Linha 150	S1	14%
	S2	67%
	S3	19%
Linha 301	S1	14%
	S2	48%
	S3	38%
Linha C2	S1	15%
	S2	72%
	S3	13%

Fonte: Empresa estudada (2022)

Os valores apresentados na Tabela 3 foram inseridos no modelo computacional por meio da regra de roteamento das entidades (moldes).

Os Sistemas S1 e S2 possuem a mesma capacidade de produção. Já o Sistema S3 possui uma capacidade de processamento maior, entretanto este equipamento é compartilhado para realizar outro processo denominado *Shakeout*, que não faz parte do sistema estudado. Deste modo, é esperado que o resultado da simulação apresente certa ociosidade para o Sistema S3, que representa o tempo empregado neste processo não estudado.

Para efeito de simplificação, considerou-se o mesmo tempo de ciclo de desmoldagem para moldes das linhas de moldagem 300, 150 e C2, independente do sistema utilizado para realizar o processo (S1, S2 ou S3). A mesma consideração não pode ser feita para moldes da Linha 301. Naturalmente, por serem muito maiores, os moldes da Linha 301 possuem muito mais areia para ser processada pelos desmoldadores e, conseqüentemente, o tempo de desmoldagem é maior.

Na Tabela 4 estão apresentadas, em termos proporcionais, as linhas de moldagem em que os itens processados por cada um dos sistemas de desmoldagem foram produzidos. E, a partir dela, pode-se inferir que o sistema de desmoldagem que menos processa itens da linha de moldagem 301 é o Sistema S1 (apenas 1% dos itens desmoldados no Sistema S1 são moldados na Linha 301).

Tabela 4 – Linha de moldagem de acordo com o sistema de desmoldagem

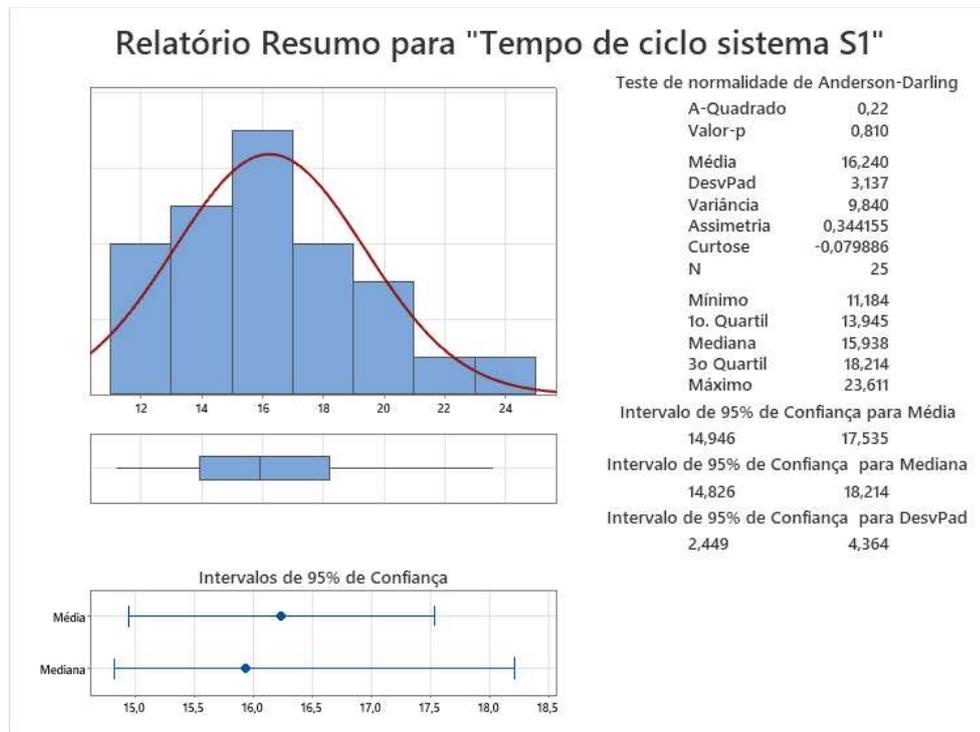
Sistema de Desmoldagem	Linha de Moldagem	Itens desmoldados
Sistema S1	Linha 300	93%
	Linha 150	5%
	Linha 301	1%
	Linha C2	1%
Sistema S2	Linha 300	28%
	Linha 150	59%
	Linha 301	6%
	Linha C2	7%
Sistema S3	Linha 300	27%
	Linha 150	40%
	Linha 301	7%
	Linha C2	26%

Fonte: Empresa estudada (2022)

Deste modo, o registro de produção do mês de outubro de 2022 do Sistema S1 foi utilizado para determinar e gerar a distribuição estatística de tempo de ciclo de desmoldagem de itens das Linhas 300, 150 e C2. O registro de produção com o tempo de ciclo de desmoldagem do Sistema S1 está apresentado no Anexo F.

Os dados foram tratados com auxílio do Minitab® e os *outliers* foram expurgados antes da realização do teste de normalidade, exposto na Figura 23.

Figura 23 – Teste de normalidade para amostra de tempos de ciclo do Sistema S1, realizado por meio do Minitab®

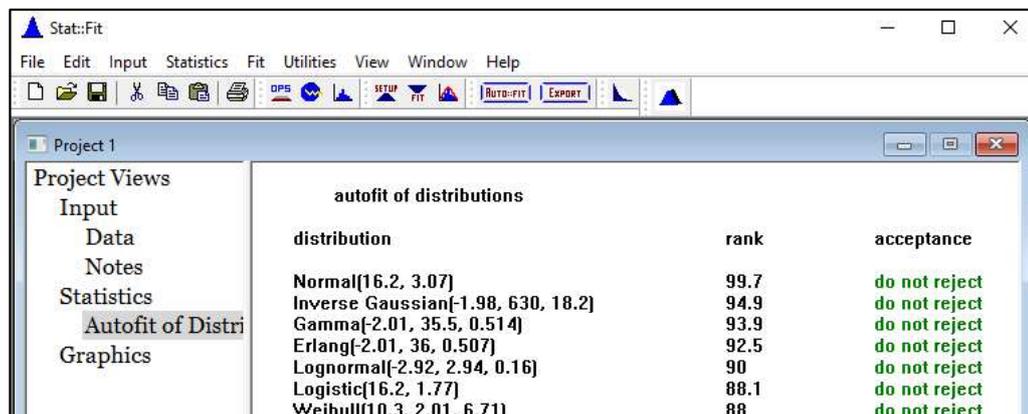


Fonte: Empresa estudada (2022)

Assim como para as outras distribuições já analisadas, o valor-p encontrado é maior do que 0,05 e, portanto, aceita-se a hipótese de normalidade para as amostras de tempo de ciclo do sistema de desmoldagem S1.

Na Figura 24 estão apresentadas algumas das distribuições que se adequam aos dados da amostra de tempo de ciclo de desmoldagem do Sistema S1.

Figura 24 – Teste de aderência de distribuições para amostra de tempos de ciclo de desmoldagem do Sistema S1, realizado por meio do Stat::Fit®



Fonte: Empresa estudada (2022)

Fica, deste modo, restando determinar, apenas, a distribuição estatística a ser utilizada para representar o tempo de ciclo de desmoldagem de molde grandes, produzidos na linha de moldagem 301.

Pelos registros de produção, não há como filtrar os dados e tratá-los de forma a determinar o tempo de ciclo de desmoldagem de moldes da Linha 301. Deste modo, assim como foi definido para a Linha C2, utilizou-se, também, uma distribuição triangular para representar o tempo de ciclo desta operação.

Os especialistas do processo foram consultados e asseguraram que o tempo de ciclo de desmoldagem de moldes da Linha 301 seria bem representado por uma distribuição triangular na qual: 30 minutos representam o menor valor, o valor mais provável corresponde a 40 minutos e o maior valor equivale a 60 minutos, independente do sistema de desmoldagem utilizado.

Em síntese, foi apresentado como se chegou a cada uma das distribuições estatísticas utilizadas no modelo computacional. No Quadro 2, estão dispostas as distribuições estatísticas utilizadas para representar o tempo de ciclo dos processos comentados ao longo deste capítulo, bem como a sintaxe utilizada para representá-las no *software* ProModel® e seus componentes individuais.

Quadro 2 – Resumo das distribuições estatísticas utilizadas na validação do modelo computacional

Parâmetro	Distribuição estatística	Sintaxe	Componentes individuais
Tap to tap	Normal	N(2.4, 0.3)	$\mu = 2,4 ; \sigma = 0,3$
Moldagem Linha 300	Normal	N(15.6, 1.4)	$\mu = 15,6 ; \sigma = 1,4$
Moldagem Linha 150	Normal	N(24.4, 4.4)	$\mu = 24,4 ; \sigma = 4,4$
Moldagem Linha 301	Normal	N(149.1, 34.7)	$\mu = 149,1 ; \sigma = 34,7$
Moldagem Linha C2	Triangular	N(50, 80, 120)	$a = 50 ; m = 80 ; b = 120$
Desmoldagem*	Normal	N(16.2, 3.1)	$\mu = 16,2 ; \sigma = 3,1$
Desmoldagem**	Triangular	T(30, 40, 60)	$a = 30 ; m = 40 ; b = 60$

Fonte: Empresa estudada (2022)

No Quadro 2, tem-se:

- Desmoldagem* corresponde ao tempo de ciclo de desmoldagem de moldes produzidos nas linhas de moldagem 300, 150 e C2;
- Desmoldagem** corresponde ao tempo de ciclo de desmoldagem de moldes produzidos na linha de moldagem 301;
- μ representa a média em uma distribuição normal;
- σ representa o desvio padrão em uma distribuição normal;
- a representa o menor valor em uma distribuição triangular;

- m representa o valor que mais ocorre (moda) em uma distribuição triangular;
- b representa o maior valor em uma distribuição triangular.

3.3.2 Parâmetros de entrada complementares

Faz-se necessária a apresentação de alguns outros parâmetros que são imprescindíveis para o funcionamento do modelo computacional e sua validação.

As semanas 42 (de 17 de outubro a 23 de outubro de 2022) e 43 (de 24 de outubro a 30 de outubro de 2022) foram utilizadas para a validação do modelo computacional. O programa de produção das linhas de moldagem é fornecido pelo PCP e, é a partir deste programa, que são geradas as ordens de produção inseridas no modelo.

Entretanto, a planilha eletrônica, com as ordens de produção, gerada pelo PCP não possui interface com o simulador. Para tal, foi desenvolvida uma planilha em Excel® para automatizar o processo de conversão da planilha original em uma segunda planilha que pode ser lida pelo *software* ProModel®, de modo a facilitar a entrada das ordens de produção no sistema a ser simulado.

Na Figura 25, está ilustrada parte da planilha que faz interface com o simulador, responsável por inserir as ordens de produção no sistema, indicando a entidade, o local, a quantidade, a frequência e a prioridade com que chegam.

Figura 25 – Planilha de chegada de entidades no simulador

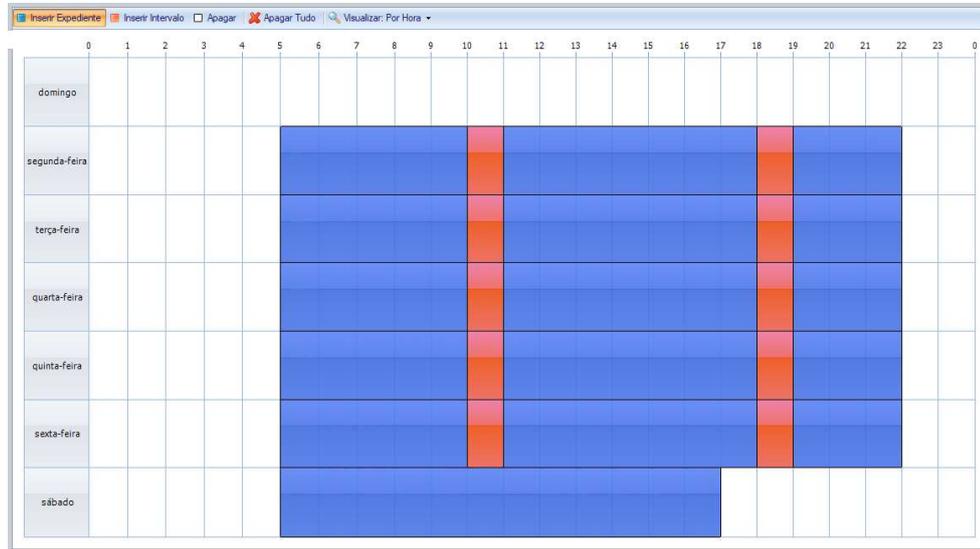
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Entidade	Local	Qtde	Início	Ocorrência	Interva	aSKU	aQtd_por_Orde	aPrioridade
2	eOrdem	Ordem_Esperando_L300	1	0	1	1	126	57	50
3	eOrdem	Ordem_Esperando_L300	1	0	1	1	79	24	49
4	eOrdem	Ordem_Esperando_L300	1	0	1	1	126	58	48
52	eOrdem	Ordem_Esperando_L150	1	0	1	1	84	8	46
53	eOrdem	Ordem_Esperando_L150	1	0	1	1	147	8	45
54	eOrdem	Ordem_Esperando_L150	1	0	1	1	103	13	44
98	eOrdem	Ordem_Esperando_L301	1	0	1	1	4	5	23
99	eOrdem	Ordem_Esperando_L301	1	0	1	1	128	1	22
100	eOrdem	Ordem_Esperando_L301	1	0	1	1	128	4	21
121	eOrdem	Ordem_esperando_C2	1	0	1	1	99	6	13
122	eOrdem	Ordem_esperando_C2	1	0	1	1	99	6	12
123	eOrdem	Ordem_esperando_C2	1	0	1	1	99	6	11

Fonte: Empresa estudada (2022)

Os últimos parâmetros inseridos no modelo computacional foram as escalas de trabalho dos setores que compreendem o sistema estudado. Existe um módulo no simulador chamado “Designações de Turno” para atribuir escalas de trabalho a locais e recursos, que especificam

os horários de trabalho, intervalos e folgas. A Figura 26 apresenta, como exemplo, a escala de trabalho da linha de moldagem 150.

Figura 26 – Escala de trabalho da Linha 150



Fonte: Empresa estudada (2022)

As escalas de trabalho das linhas de moldagem estão apresentadas no Quadro 3. Considerou-se, para efeito de validação do modelo computacional, que a aciaria operou de forma ininterrupta e que, aos domingos, quando se exigiu a parada do FEA 1000 para reforma, o FEA 1001 entrou em operação, dando continuidade ao processo de fabricação de aço.

Da mesma forma, também foi considerado que os sistemas de desmoldagem operaram de forma contínua durante as duas semanas estudadas.

Quadro 3 – Escalas de trabalho das linhas de moldagem

Setor	Dias da semana	Horário	Intervalos
Linha de moldagem 300	dom - dom	00:00 - 23:59	02:00 - 03:00 / 10:00 - 11:00 / 18:00 - 19:00
Linha de moldagem 150	seg - sex	05:00 - 22:00	10:00 - 11:00 / 18:00 - 19:00
	sáb	05:00 - 17:00	-
Linha de moldagem 301	seg - sex	05:00 - 22:00	10:00 - 11:00 / 18:00 - 19:00
	sáb	05:00 - 17:00	-
Linha de moldagem C2	seg - sex	18:00 - 03:15	23:00 - 00:00

Fonte: Empresa estudada (2022)

3.3.3 Regime transitório e regime permanente

Os programas de produção das semanas 42 e 43 foram utilizados como dados de entrada para validar o modelo computacional. Nesta subseção, explica-se por qual razão apenas uma semana de produção não é suficiente para a validação.

Entende-se como regime transitório, o período em que o modelo não está aquecido, ou seja, os locais e estações de trabalho não estão ocupadas pelas entidades. Durante o regime transitório as medidas de desempenho e as saídas do modelo podem não ser precisas.

O regime permanente representa o período em que todos os locais e estações de trabalho já foram ocupadas pelas entidades e, portanto, entende-se que o sistema está “aquecido”. No regime permanente, as medidas de desempenho e as saídas do modelo são mais precisas e devem ser compatíveis com as saídas do sistema real.

De acordo com Leal (2008), o período transitório é conhecido como *warm-up* e a seleção deste período continua sendo problemático para a SED. O autor ainda afirmou que o modo mais prático para determinar o tempo de *warm-up* é por meio da observação.

Com base em consulta aos especialistas do processo e por meio de observação, conforme sugerido por Leal (2008), determinou-se que uma semana é um período suficientemente bom para que o sistema simulado entrasse em regime permanente. Deste modo, utilizou-se a semana 42 como tempo de *warm-up*.

3.3.4 Escolha da variável de resposta adequada

Leal (2008) definiu resposta ou variável de resposta como a medida de desempenho ou saída do modelo de simulação ou, ainda em outras palavras, os resultados obtidos de uma variável de saída de interesse para o estudo.

Ainda segundo o autor, torna-se interessante determinar quanto uma alteração em um fator de entrada afeta uma variável de resposta em uma simulação.

Softwares de simulação, usualmente, acompanham ferramentas para exibição e análise dos resultados em gráficos e tabelas. Esses resultados podem, ainda, ser exportados em forma de planilhas para serem trabalhados por meio do Excel®.

Muitas variáveis podem ser extraídas a partir dos relatórios de simulação, mas apenas algumas influenciam diretamente no fenômeno que está sendo observado.

Chwif e Medina (2010) afirmaram que a primeira etapa para uma boa análise de resultados é a escolha da variável de resposta do sistema, a partir dos objetivos da simulação.

Deste modo, devem-se ser escolhidas variáveis de resposta que interessam diretamente à análise de resultados e, conseqüentemente, à tomada de decisão.

De acordo com o objetivo geral desta pesquisa, definiu-se como variável de resposta para a avaliação e validação do modelo o número de moldes produzidos pelas linhas de moldagem. Isso se deve ao fato de que, os processos subsequentes (vazamento, resfriamento e desmoldagem) impactam diretamente na produção de moldes, podendo gerar paradas de produção, devido ao pátio de vazamento estar completamente ocupado.

3.3.5 Verificação do modelo computacional

Embora muitas vezes confundidos entre si, os conceitos de verificação e validação de um modelo computacional são completamente distintos entre si e são fundamentais para que um estudo de simulação seja bem-sucedido (CHWIF; MEDINA, 2010).

Conforme apontado por Leal (2008), a etapa de verificação está sempre relacionada ao modelo computacional e visa responder à seguinte pergunta: “o modelo está sendo desenvolvido corretamente?”. De uma maneira mais simplista, o autor ainda aponta que a etapa de verificação corresponde a retirar os *bugs* do modelo.

Foram apontadas, pelos autores, algumas técnicas para a verificação do modelo e, aqui, serão apresentadas as técnicas que foram utilizadas, conjuntamente, para a verificação do modelo em estudo:

- O modelo foi construído em partes e, somente após sua verificação é que se iniciava o desenvolvimento da próxima etapa;
- Valores determinísticos foram utilizados a fim de verificar a lógica do modelo e permitir a comparação das saídas do modelo com os resultados obtidos por meio de métodos analíticos;
- Foi utilizada a opção depurador do ProModel®, permitindo visualizar os eventos passo a passo e examinar as variáveis durante a execução do modelo;
- A simulação era executada com a animação gráfica habilitada, o que permitiu observar inconsistências no fluxo;
- Foram inseridos contadores locais no modelo para a mensuração de resultados;
- O modelo computacional foi construído com a participação de um especialista no simulador e com a constante revisão de especialistas do processo.

3.3.6 Execução do modelo e validação estatística

Antes da validação do modelo computacional por meio de técnicas estatísticas, foi realizada a validação face a face, para validar o modelo conceitualmente. O modelo foi apresentado para especialistas do processo que puderam avaliar o sistema como um todo, por meio da animação gráfica.

Neste primeiro nível de validação o modelo foi validado, ou seja, em linhas gerais, se comportou conforme o sistema real.

Finalizadas as etapas de verificação e validação conceitual, o modelo torna-se operacional e está pronto para ser utilizado. A partir deste momento, tem-se, em mãos, uma fonte poderosa de experimentos estatísticos utilizados para análise do comportamento do sistema (CHWIF; MEDINA, 2010).

Contudo, como as entradas do modelo são determinadas por distribuições estatísticas e, portanto, são aleatórias, a cada replicação ou experimento realizado, têm-se saídas também aleatórias. Torna-se importante, a partir deste ponto, diferenciar os termos replicação e rodada.

Maciel (2016) apontou que, quando se fala em rodada refere-se ao que ocorre quando se seleciona ou se inicia o comando que executa a simulação no computador. Deste modo, cada rodada é entendida como um novo experimento. Já a replicação é uma repetição da simulação do modelo, com a mesma duração, os mesmos parâmetros de entrada, porém com uma semente de geração dos números aleatórios diferentes.

Segundo Leal (2008), a confiança estatística e a precisão devem ser levadas em consideração ao apresentar os resultados da simulação. O autor referiu confiança estatística ao intervalo de confiança, ou seja, um intervalo de valores que contém a média da população, com uma certa probabilidade. Já quando se fala em precisão, refere-se ao tamanho do intervalo.

Logo, de acordo com Pereira (2018), para aumentar a precisão em um processo de simulação, basta aumentar o número de replicações, de acordo com a precisão desejada/requerida (considerando que houve uma boa execução nas etapas de modelagem anteriores).

Também foram apresentadas no trabalho de Pereira (2018), as equações para cálculo do intervalo de confiança:

$$P(\bar{x} - h \leq \mu \leq \bar{x} + h) = 1 - \alpha \quad (1)$$

$$\bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Onde, os termos apresentados nas equações (1) e (2) são os seguintes:

- \bar{x} é a média da amostra;
- $h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$ é a metade do intervalo, denominado de precisão;
- $t_{n-1, \alpha/2}$ é o $(1-\alpha/2)$ percentil da distribuição t de *Student* com $n-1$ graus de liberdade;
- s é o desvio padrão da amostra;
- n é o número de dados da amostra. O número de dados da amostra pode ser entendido como o número de réplicas utilizado.

Para Leal (2008), a seleção do número inicial de replicações é arbitrária. Para se estabelecer o número de replicações necessárias, deve-se extrair da população um número n de amostras e construir o intervalo de confiança do parâmetro desejado. Se a precisão h do intervalo obtido ainda não for menor do que a desejada h^* , então calcula-se o número de amostras (replicações) necessário pela equação (3):

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (3)$$

Neste capítulo, já se abordou sobre a definição da variável de resposta definida para a validação do modelo computacional: o número médio de moldes produzidos pelas linhas de moldagem.

Na Tabela 5, estão apresentados o número de moldes produzidos pelas linhas de moldagem e o número de corridas vazadas, desde a semana 2 até a semana 43. Tem-se, deste modo, a medida de desempenho utilizada para validar o modelo, que é a amostra da produção total de moldes.

Tabela 5 – Produção de moldes nas linhas de moldagem e corridas na aciaria

(continua)

Semana	Linha 300	Linha 150	Linha 301	Linha C2	Total Moldes	Aciaria
2	366	316	31	38	751	56
3	330	249	37	34	650	42
4	441	301	36	26	804	72
5	416	317	41	32	806	63
6	511	303	47	29	890	60
7	525	323	48	33	929	69
8	509	322	45	18	894	68
9	524	310	46	14	894	68
10	501	295	46	21	863	66
11	492	282	33	20	827	64

Tabela 6 – Produção de moldes nas linhas de moldagem e corridas na aciaria

(conclusão)

Semana	Linha 300	Linha 150	Linha 301	Linha C2	Total Moldes	Aciaria
12	522	340	11	16	889	62
13	538	350	17	4	909	58
14	558	318	25	4	905	61
15	404	181	19	21	625	46
16	538	228	20	31	817	51
17	589	312	28	12	941	71
18	584	283	29	7	903	67
19	568	274	33	10	885	66
20	549	266	20	42	877	63
21	652	244	26	32	954	75
22	613	181	33	20	847	80
23	585	182	40	21	828	74
24	479	145	35	18	677	70
25	541	122	38	35	736	69
26	611	184	37	14	846	75
27	512	191	36	32	771	69
28	548	184	30	19	781	66
29	536	168	36	30	770	68
30	553	216	33	30	832	71
31	513	225	34	14	786	68
32	585	182	32	33	832	69
33	566	203	39	32	840	74
34	526	214	29	4	773	70
35	588	192	33	35	848	70
36	500	187	27	9	723	60
37	623	228	32	41	924	73
38	566	251	36	33	886	74
39	568	249	30	37	884	80
40	568	233	41	40	882	70
41	585	191	28	14	818	67
42	550	157	27	21	755	73
43	547	206	40	30	823	67
Média	532.9	240.6	33	24	830.4	66.8

Fonte: Empresa estudada (2022)

Admitiu-se como valores adequados, para este estudo, uma confiança estatística de 95% ($\alpha = 0,05$), com uma precisão tal que h^* seja, no máximo, 20 moldes.

A simulação foi, então, executada com 42 replicações e os dados de saída estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 7 – Dados de saída do modelo para 42 replicações

(continua)

Replicação	Linha 300	Linha 150	Linha 301	Linha C2	Total Moldes	Aciaaria
1	562	218	35	34	849	70
2	552	220	40	32	844	70
3	562	212	38	35	847	70
4	555	206	39	33	833	69
5	562	209	38	32	841	69
6	567	209	37	32	845	68
7	559	217	40	31	847	69
8	556	217	39	31	843	69
9	553	213	38	32	836	69
10	551	217	37	31	836	68
11	561	218	40	31	850	70
12	557	219	36	33	845	70
13	548	207	38	32	825	68
14	558	219	35	33	845	68
15	562	219	37	32	850	70
16	561	216	40	30	847	68
17	562	219	36	34	851	69
18	565	213	39	31	848	69
19	558	219	39	32	848	69
20	561	218	39	33	851	70
21	556	216	38	31	841	69
22	552	220	38	33	843	68
23	564	209	40	32	845	69
24	556	217	38	32	843	68
25	558	212	40	34	844	69
26	557	213	38	31	839	68
27	562	216	36	32	846	68
28	547	217	39	32	835	68
29	560	215	36	34	845	67
30	560	216	36	33	845	68
31	557	212	39	34	842	70
32	562	214	36	33	845	68
33	564	210	40	32	846	70
34	566	219	37	31	853	68
35	560	214	36	30	840	68
36	552	219	39	31	841	69
37	562	216	38	32	848	71
38	557	218	38	32	845	70
39	558	222	37	32	849	68
40	553	200	40	33	826	69
41	557	218	37	33	845	69

Tabela 8 – Dados de saída do modelo para 42 replicações

Replicação	Linha 300	Linha 150	Linha 301	Linha C2	(conclusão)	
					Total Moldes	Aciaria
42	556	218	41	33	848	68
Média	558.3	215.1	38	32.2	843.7	68.9
Desvio padrão	4.7	4.5	1.6	1.1	6	0.9

Fonte: Produção do próprio autor

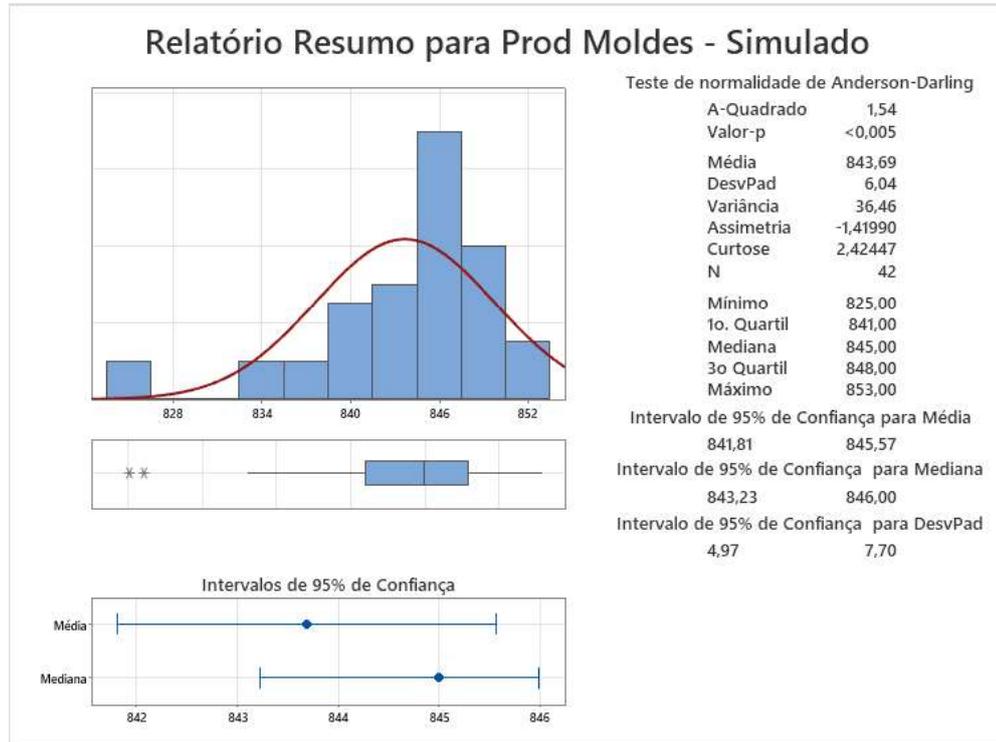
A partir dos dados de saída da amostra-piloto de 42 replicações, aplica-se a equação (2) para se obter a precisão do intervalo:

$$h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{\eta}} = 2,02 \times \frac{6,0}{\sqrt{42}} = 1,9$$

Deste modo, o intervalo de confiança com 95% de significância para a média de produção de moldes é igual a [841,8; 845,6]. Como a precisão do intervalo h é menor do que a precisão desejada h^* , conclui-se que o tamanho da amostra é suficiente para simular o sistema, e existe uma probabilidade de 95% de que o intervalo [841,8; 845,6] contém a média de produção total de moldes do sistema.

Dando sequência à etapa de validação e dada à não normalidade dos dados de saída da simulação (valor-p < 0,05 no teste de Anderson-Darling), apresentada na Figura 27, um Teste t pareado não seria apropriado para verificar uma associação estatisticamente significativa entre as amostras de produção real e os dados de saída do modelo computacional.

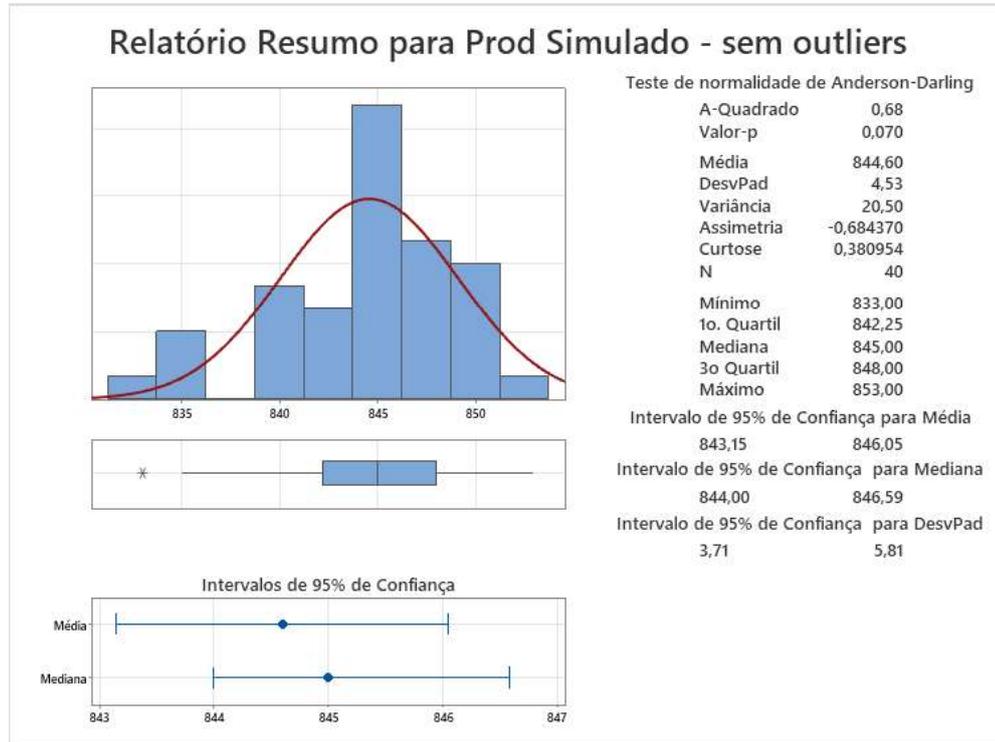
Figura 27 – Teste de normalidade para os dados de saída da simulação



Fonte: Produção do próprio autor

Assim, excluiu-se os *outliers*, destacados em vermelho na Tabela 6 e aplicou-se, novamente, o teste de normalidade aos dados de saída da simulação. Pode-se inferir, a partir da Figura 28, que sem os *outliers*, a amostra pode ser representada por uma distribuição normal (valor-p > 0,05).

Figura 28 – Teste de normalidade para os dados de saída da simulação sem *outliers*



Fonte: Produção do próprio autor

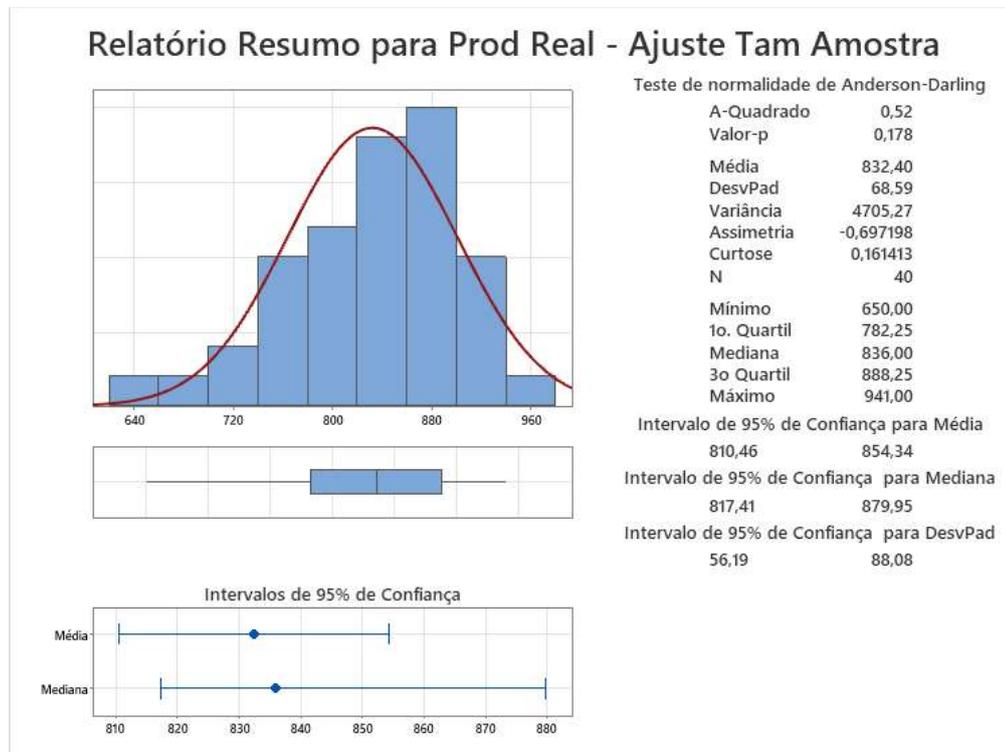
O Teste t pareado implica em verificar se a média das diferenças entre duas amostras diferem significativamente entre si. Para determinar se os resultados do teste são estatisticamente significativos, basta comparar o valor-p a um dado nível de significância α .

Se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, deve-se rejeitar a hipótese nula. Neste caso, conclui-se que a média das diferenças entre as duas amostras analisadas é estatisticamente significativa.

Do contrário, se o valor-p for maior que o nível de significância, a hipótese nula não deve ser rejeitada. Isso significa que não há evidências suficientes para concluir que a média das diferenças entre as observações pareadas é estatisticamente significativa.

Entretanto, para realizar o Teste t pareado é necessário que o tamanho das duas amostras analisadas seja o mesmo. Como foram expurgados os *outliers* dos dados de saída do modelo simulado, se fez necessário excluir duas observações dos dados reais. Assim, foram excluídos os valores mínimo e máximo da produção real, destacados em vermelho na Tabela 5. O teste de normalidade para os dados de produção real, considerando o ajuste do tamanho amostral, está apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Teste de normalidade para os dados de produção real com ajuste de tamanho amostral



Fonte: Produção do próprio autor

Utilizou-se o Teste t pareado para comparar a média das diferenças entre a amostra de produção real de moldes, apresentada na Tabela 5, e os dados de saída do modelo simulado, expostos na Tabela 6, adotando um nível significância α igual a 0,05.

Teste:

Hipótese nula $H_0: \mu_d = \mu_0$

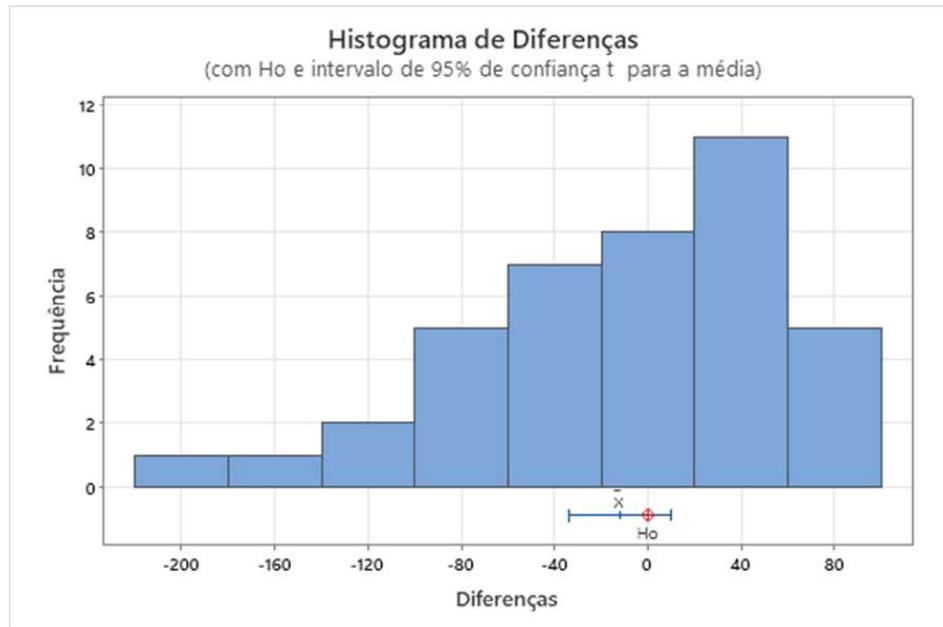
Hipótese alternativa $H_1: \mu_d \neq \mu_0$

Onde,

- μ_d é a média das diferenças na população;
- μ_0 é a média hipotética das diferenças.

Como o valor-p encontrado 0,269 é maior que o nível de significância 0,05, não se rejeita a hipótese nula. Na Figura 30, estão apresentados o histograma com as diferenças entre as observações pareadas e o valor $H_0: \mu_d - \mu_0 = 0$, compreendido dentro do intervalo de confiança [-34,2; 9,8]. Dessa forma, pode-se dizer que o modelo foi validado estatisticamente.

Figura 30 – Histograma Teste t pareado



Fonte: Produção do próprio autor

3.4 RESULTADOS OBTIDOS E CENÁRIOS EXPERIMENTADOS

Nesta seção, serão avaliados diferentes cenários, de modo a responder perguntas do tipo “*what-if*”, e examinar como o sistema se comporta, ao alterar parâmetros de entrada como: recursos, escalas de trabalho, demanda de produção e, conseqüentemente, *takt time*.

Todos os cenários experimentados foram executados com 10 replicações, com exceção do Cenário 1 que foi utilizado para a validação do modelo, no qual se utilizou 25 replicações.

3.4.1 Panorama atual

3.4.1.1 Cenário 1

Ao longo de todo o ano de 2022 e durante a execução deste trabalho, não houve mudanças significativas em relação à demanda de produção.

Já foram apresentadas, na Tabela 5, as produções de moldes em cada uma das linhas de moldagem e o número de corridas (vazamentos) produzidos pela aciaria. Considerando que os pedidos foram atendidos, os dados da tabela comprovam que não houve variação significativa de demanda ao longo das semanas observadas.

Deste modo, a partir do cenário utilizado na validação do modelo computacional, alguns resultados podem ser apresentados e algumas conclusões podem ser tomadas, comprovando a percepção dos envolvidos no processo produtivo: Engenharia, Produção e PCP.

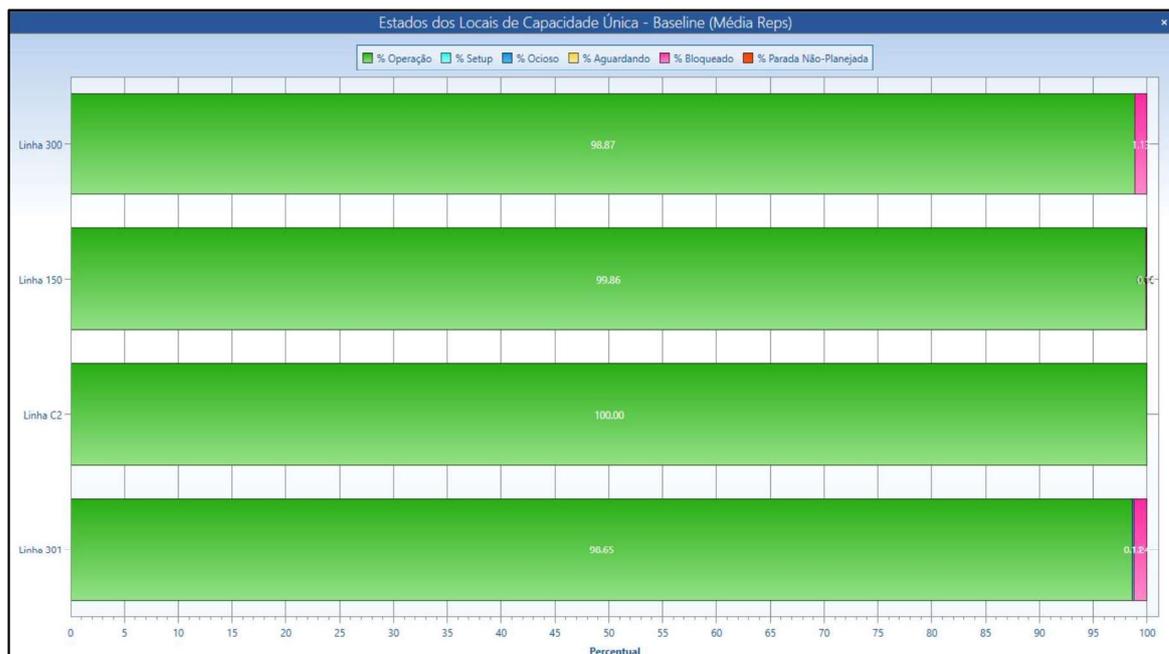
A partir dos resultados obtidos, foi possível tirar algumas conclusões. Tanto as linhas de moldagem, como a área dos pátios de vazamento possuem capacidade suficiente para atender à demanda atual, tendo em vista os dados de saída apresentados na Tabela 6, utilizada na validação do modelo.

A aciaria produziu, na média das 42 replicações, 68,9 corridas, em linha com a produção observada nos dados da Tabela 5. Sendo assim, também pode-se dizer que a capacidade produtiva da aciaria satisfaz as condições atuais de demanda.

Caso a aciaria não fosse capaz de atender à demanda, o fluxo dos pátios de vazamento seria comprometido. Os moldes precisam ser vazados para seguirem para a desmoldagem, do contrário, chegaria um momento em que os pátios de vazamento não teriam mais capacidade para receber novos moldes, interrompendo a produção nas linhas de moldagem.

Na Figura 31, pode-se observar que as linhas de moldagem se mantiveram em operação ao longo de, praticamente, toda a simulação (todas as linhas acima de 98%). Ou seja, não houve bloqueio por falta de capacidade nos pátios de vazamento e a demanda foi atendida.

Figura 31 – Estados das linhas de moldagem – Cenário 1



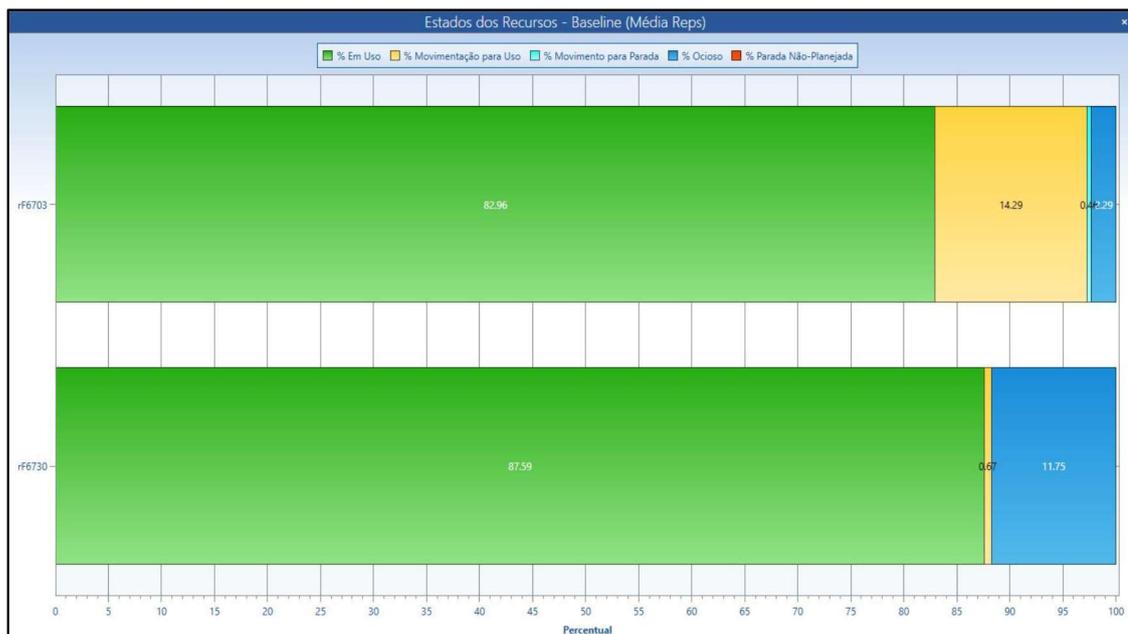
Fonte: Produção do próprio autor

Outra constatação que pôde ser feita por meio da simulação foi a do uso intensivo, das pontes rolantes F6703, que faz toda a movimentação de moldes da Linha 300 e F6730, utilizada na área de resfriamento da Linha 300 e desmoldagem no Sistema S1.

Há, ainda, movimentações realizadas pelas pontes rolantes que não foram consideradas na simulação para efeito de simplificação do modelo, além de outras que acontecem no dia a dia da empresa que ocorrem por solicitações circunstanciais que, de certo modo, tornam estes recursos ainda mais utilizados.

Os resultados da simulação contribuíram para comprovar a alta taxa de utilização da ponte rolante F6703 (acima de 97% considerando, também, o tempo de movimentação para uso, em amarelo) e, deste modo, decidiu-se retrofitar uma ponte rolante que estava inoperante e deixá-la em operação já para o início de 2023. A utilização das pontes rolantes mencionadas está ilustrada na Figura 32.

Figura 32 – Utilização das pontes rolantes F6703 e F6730 – Cenário 1



Fonte: Produção do próprio autor

3.4.2 Alteração de escalas de trabalho

3.4.2.1 Cenário 2 – Linha de moldagem 150

Neste segundo cenário simulado, considerou-se a mesma demanda, porém com alterações nas escalas de trabalho. A demanda atual para a linha de moldagem 150 poderia ser suprida em

apenas um turno de produção. Entretanto, resta saber como o fluxo produtivo se comporta como um todo, considerando, também, o pátio de vazamento e aciaria.

Decidiu-se, então, simular o cenário 1 já comentado na subseção anterior, alterando, apenas, a escala de trabalho da linha de moldagem 150 e, conseqüentemente, o tempo de ciclo necessário para produzir toda a demanda em apenas um turno.

A jornada de trabalho da linha de produção está apresentada no Quadro 4, enquanto a nova distribuição estatística utilizada para representar o tempo de ciclo da linha está exposta no Quadro 5.

Quadro 4 – Escala de trabalho da Linha 150, considerando apenas um turno

Setor	Dias da semana	Horário	Intervalo
Linha de moldagem 150	seg - sex	05:00 - 13:35	10:00 - 11:00
	sáb	05:00 - 11:00	-

Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 5 – Quadro resumo da distribuição estatística utilizada no Cenário 2

Parâmetro	Distribuição estatística	Sintaxe	Componentes individuais
Moldagem Linha 150	Normal	$N(12,8, 2,2)$	$\mu = 12,8 ; \sigma = 2,2$

Fonte: Empresa estudada (2022)

A média de produção de moldes na Linha 150 após 10 replicações foi de 205,5 moldes, ou seja, não há diferença significativa entre produzir em dois turnos ou em um turno e, em ambos os casos, pôde-se cumprir o plano de produção definido.

Pode-se imaginar que a alteração da jornada de trabalho pudesse alterar o sincronismo entre as linhas de moldagem e a aciaria, entretanto, do mesmo modo, não houve alteração em relação à produção total de moldes.

Houve um pequeno aumento no tempo em que a linha ficou bloqueada (3%) por falta de capacidade no pátio de vazamento. Tal afirmação pode ser confirmada na Figura 33.

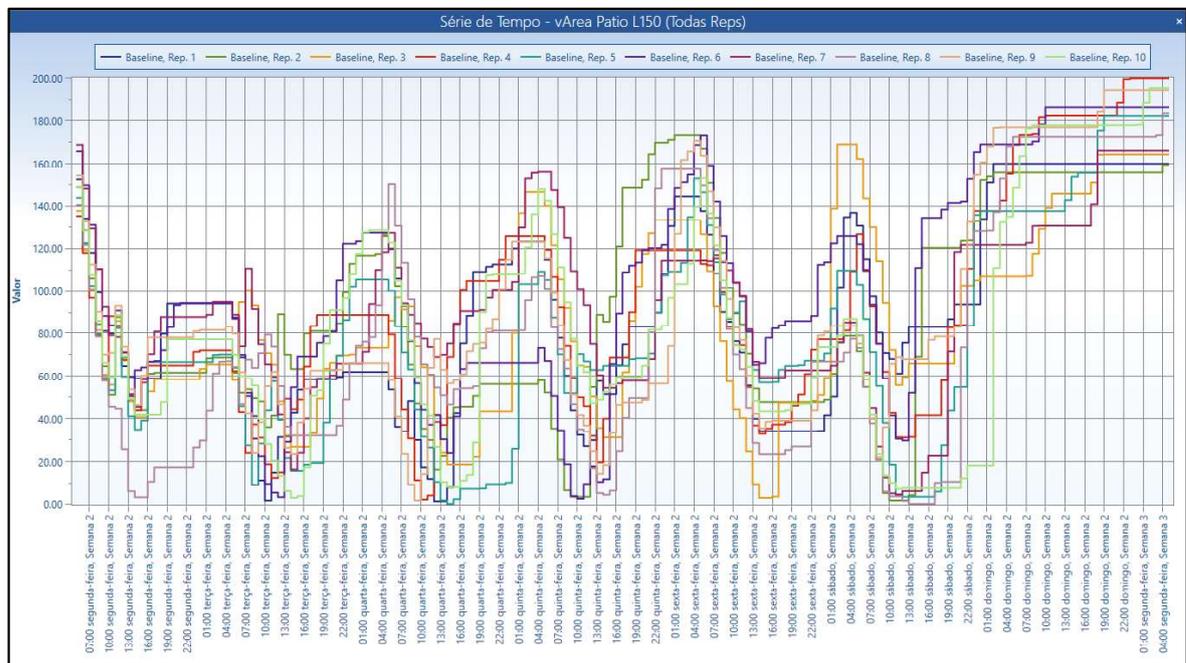
Já na Figura 34, é possível visualizar a evolução da área disponível no pátio de vazamento da Linha 150 ao longo de toda a simulação (10 replicações). Vale destacar os pontos em que a área disponível se aproxima de zero, bloqueando a linha de produção da moldagem.

Figura 33 – Estados da Linha 150 – Cenário 2



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 34 – Área disponível no pátio de vazamento da Linha 150 – Cenário 2



Fonte: Produção do próprio autor

3.4.2.2 Cenário 3 – Linha de moldagem 301

A mesma análise foi feita para a linha de moldagem 301. A nova escala de trabalho e o tempo de ciclo utilizado para simular este cenário estão apresentados nos Quadros 6 e 7, respectivamente.

Quadro 6 – Escala de trabalho da Linha 150, considerando apenas um turno

Sector	Dias da semana	Horário	Intervalo
Linha de moldagem 301	seg - sex	05:00 - 13:35	10:00 - 11:00
	sáb	05:00 - 11:00	-

Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 7 – Quadro resumo das distribuições estatísticas utilizadas no Cenário 3

Parâmetro	Distribuição estatística	Sintaxe	Componentes individuais
Moldagem Linha 150	Normal	$N(66,5, 12,6)$	$\mu = 66,5 ; \sigma = 12,6$

Fonte: Empresa estudada (2022)

Igualmente ao apresentado no cenário 2, a linha foi capaz de atender à demanda atual, produzindo, na média das 10 replicações, 42,1 moldes. Entretanto, houve um aumento considerável no tempo de linha bloqueada (aproximadamente 9%) em relação à simulação com dois turnos de produção (menos de 2%), como pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Estados da Linha 301 – Cenário 3



Fonte: Produção do próprio autor

3.4.3 Aumento de demanda

3.4.3.1 Cenário 4 – Mesmos recursos

Neste cenário avaliado, estipulou-se um aumento de demanda de 20% para todas as linhas de moldagem. Além disso, considerou-se uma performance 50% melhor da aciaria, admitindo que os dois FEA trabalhem em paralelo.

Os tempos de ciclo dos sistemas de desmoldagem e as áreas dos pátios de vazamento foram mantidos os mesmos. Assim como as escalas de trabalho, que permaneceram as mesmas do cenário utilizado para a validação do modelo e os recursos envolvidos no fluxo produtivo.

As novas distribuições estatísticas utilizadas, levando em conta as considerações apresentadas para este cenário estão apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Quadro resumo das distribuições estatísticas utilizadas no Cenário 4

Parâmetro	Distribuição estatística	Sintaxe	Componentes individuais
Tap to tap	Normal	N(1.6, 0.2)	$\mu = 1,6 ; \sigma = 0,2$
Moldagem Linha 300	Normal	N(13.4, 1.3)	$\mu = 13,4 ; \sigma = 1,3$
Moldagem Linha 150	Normal	N(21.3, 3.6)	$\mu = 21,3 ; \sigma = 3,6$
Moldagem Linha 301	Normal	N(111.0, 20.7)	$\mu = 111,0 ; \sigma = 20,7$
Moldagem Linha C2	Normal	N(67.7, 21.7)	$\mu = 67,7 ; \sigma = 21,7$

Fonte: Produção do próprio autor

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios de produção de moldes para cada uma das linhas de moldagem.

Tabela 9 – Produção de moldes – Cenário 4

Média de produção de moldes	
Linha 300	532,7
Linha 150	247,4
Linha 301	50,1
Linha C2	38,4
Total	868,6

Fonte: Produção do próprio autor

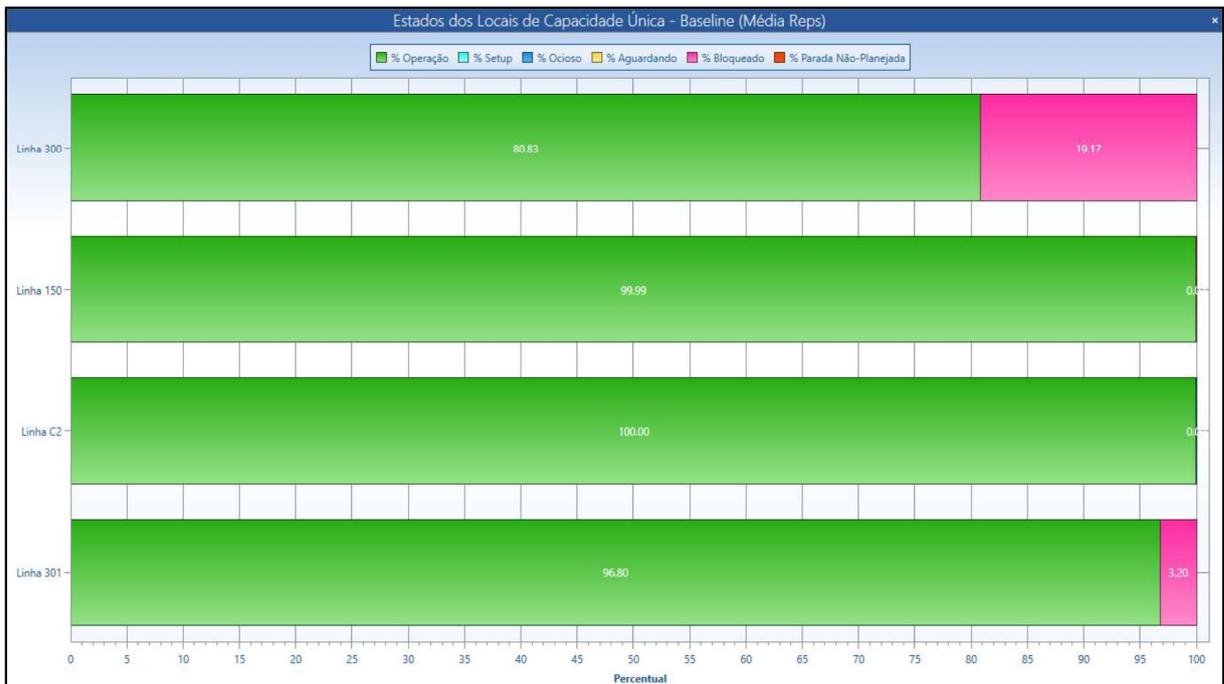
Apenas com os dados expostos na Tabela 7, já é possível fazer algumas considerações: a produção de moldes nas linhas 150, 301 e C2 aumentou em cerca de 20%, em linha com o que

foi previsto. Confirmando, assim, que a aciaria foi capaz de manter o fluxo produtivo dessas linhas sem bloqueios.

Entretanto, a produção de moldes na Linha 300, além de não aumentar os 20% propostos, ainda apresentou uma queda de cerca de 2%, em relação ao Cenário 1. Isso se deve ao fato de que, não basta apenas aumentar a capacidade da aciaria, pois existem outros gargalos de produção, discutidos nos próximos cenários simulados.

A partir da Figura 36, é possível inferir que houve bloqueios de 19% do tempo simulado na linha de moldagem 300, enquanto nas demais linhas, os bloqueios foram inexpressivos.

Figura 36 – Estados das linhas de moldagem – Cenário 4



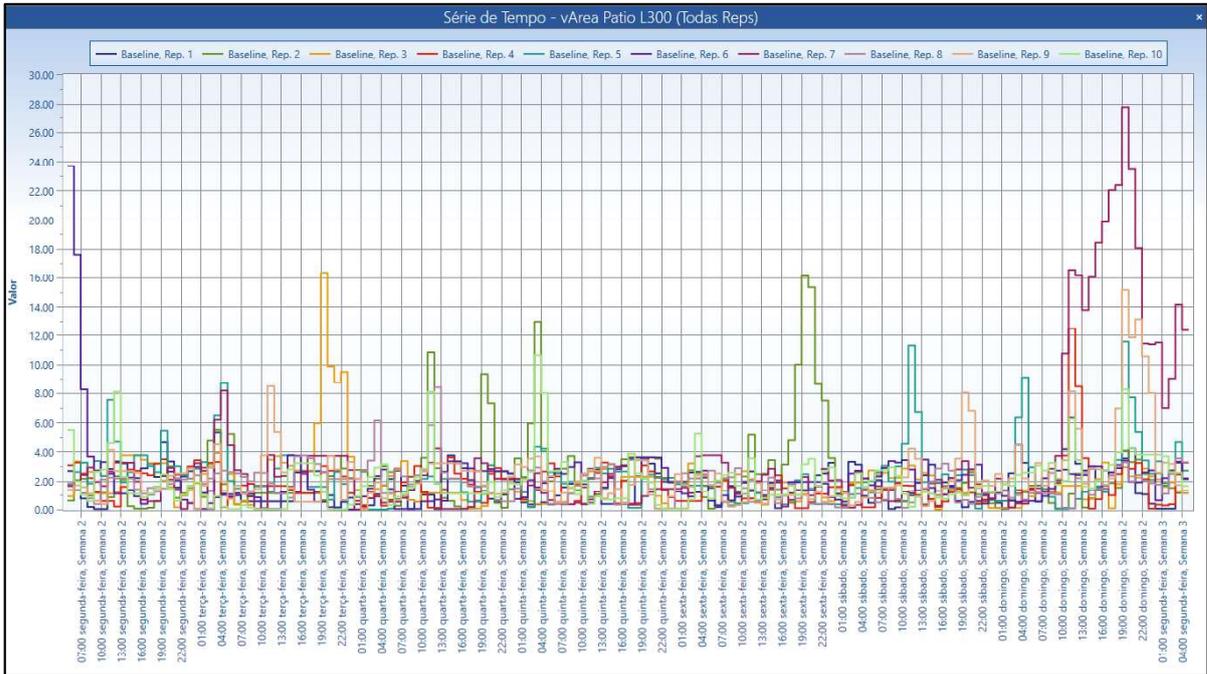
Fonte: Produção do próprio autor

Do mesmo modo, a Figura 37 permite comprovar que a área livre no pátio de vazamento da linha de moldagem 300 permaneceu em patamares muito baixos (abaixo de 4 m²) em grande parte da simulação, gerando os bloqueios na linha de produção.

A utilização da ponte rolante F6703, disposta na Figura 38, manteve-se acima dos 97%, assim como apresentado no Cenário 1. Entretanto, no Cenário 1, pôde-se cumprir a produção planejada, diferente do que aconteceu neste cenário.

No Cenário 5, será possível concluir se a ponte rolante F6703, por si só, representa o gargalo do sistema.

Figura 37 – Área disponível no pátio de vazamento da Linha 300 – Cenário 4



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 38 – Utilização da ponte rolante F6703 – Cenário 4



Fonte: Produção do próprio autor

3.4.3.2 Cenário 5 – Acrescentada ponte rolante F6720

Neste cenário, tem-se o intuito de verificar se a ponte rolante F6703 realmente é um gargalo e quais os impactos nos resultados da simulação ao adicionar uma ponte rolante (F6720) no sistema. Evidentemente, há conflito entre as duas pontes rolantes, já que estão sobre os mesmos trilhos, portanto, para determinadas movimentações, uma delas deve aguardar até que a operação seja finalizada.

Os resultados médios de produção de moldes para o Cenário 5 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 10 – Produção de moldes – Cenário 5

Média de produção de moldes	
Linha 300	596,7
Linha 150	249,1
Linha 301	50,1
Linha C2	38,6
Total	934,5

Fonte: Produção do próprio autor

Mesmo adicionando a ponte rolante F6720, a produção de moldes na Linha 300 atingiu uma produção 10% a mais em relação ao produzido no Cenário 1, quando o previsto era 20%. Isso sugere que há outros gargalos.

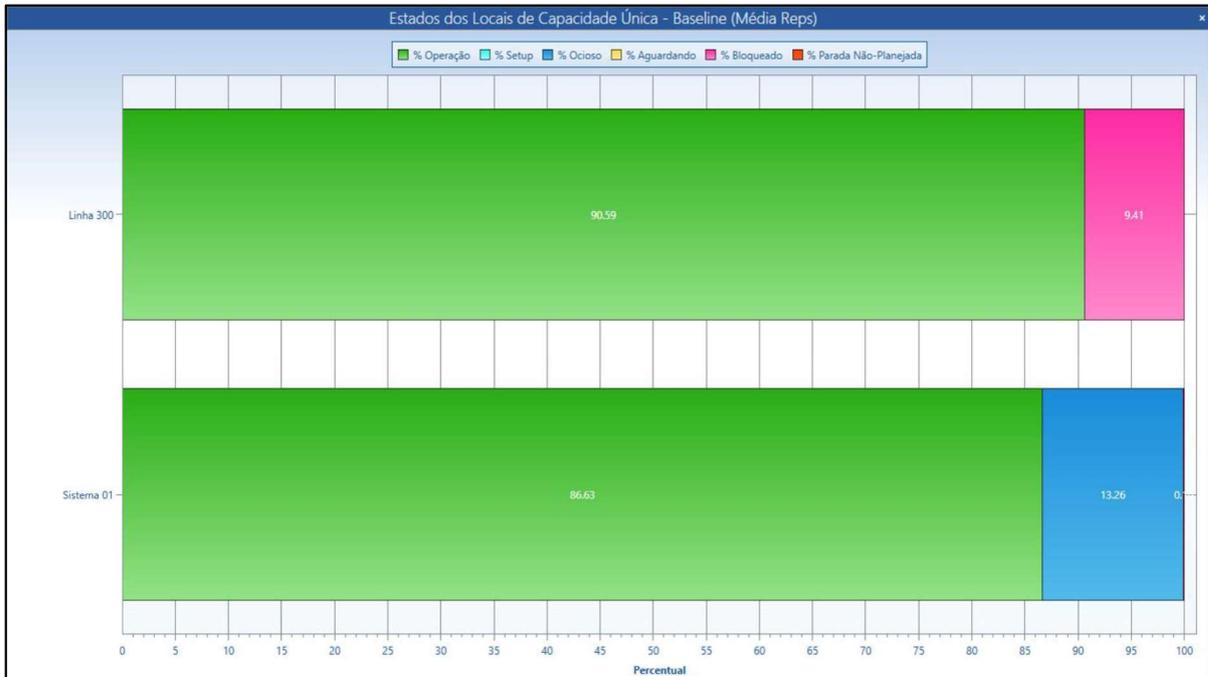
A partir da Figura 39, pode-se constatar que a linha de moldagem 300 ficou pouco mais de 9% do tempo de simulação bloqueada. Em contrapartida, o Sistema S1 de desmoldagem teve 13% de ociosidade, que representa o tempo “desperdiçado” em movimentações com a ponte rolante para desmoldagem

Analisando o processo anterior ao processo de desmoldagem, tem-se o pátio de resfriamento de moldes. A série temporal de área disponível no pátio de resfriamento, ilustrada na Figura 40, confirma que o Sistema S1 de desmoldagem está restringindo o fluxo produtivo da Linha 300, uma vez que a variável que representa o espaço livre permaneceu em patamares inferiores a 4 m² ao longo de, praticamente, toda a simulação.

Essa constatação pode ser confirmada por dois parâmetros de entrada do modelo: tempo de ciclo de entrada no sistema (tempo da Linha 300, apresentada no Quadro 8) e pelo tempo de ciclo de saída do sistema (tempo do Sistema S1, apresentado no Quadro 2).

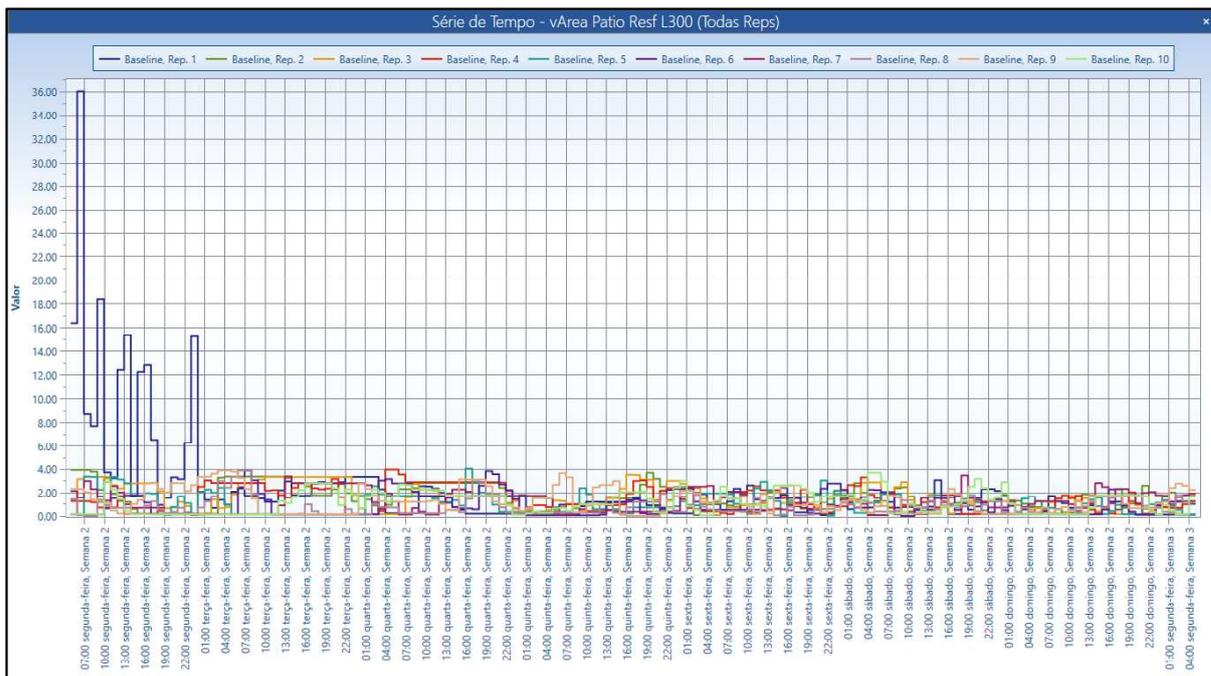
Portanto, o Sistema S1, neste cenário, representa um gargalo de produção que restringe o fluxo nos pátios de resfriamento e vazamento e, conseqüentemente, gera o bloqueio da linha de moldagem 300.

Figura 39 – Estados da Linha 300 e do Sistema S1 – Cenário 5



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 40 – Área disponível no pátio de resfriamento da Linha 300 – Cenário 5



Fonte: Produção do próprio autor

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Cenário 1, apesar de não terem ocorrido bloqueios expressivos nas linhas de moldagem e a demanda ter sido atendida, os dados de saída permitiriam tomadas de ações, caso o fluxo produtivo, na simulação, fosse interrompido.

A partir dos dados de saída dos Cenários 2 e 3, pôde-se inferir que independente da escala de trabalho, a demanda poderia ser atendida. Deste modo, a decisão cabe à supervisão e à gerência da área que se basearam em outros fatores para determinar a escala de trabalho mais apropriada.

Em todos os cenários simulados, a ponte rolante F6703 apresentou taxas de utilização próximas a 100%, esse resultado pôde ser utilizado como apoio à tomada de decisão para realizar o retrofit da ponte rolante R6720 e colocá-la em operação no início de janeiro de 2023.

Do mesmo modo, os cenários que simularam o sistema com aumento de demanda, suportaram a decisão de se investir na repotencialização do FEA 1001 aumentado, assim, a sua capacidade produtiva (capacidade de fusão do aço) e, conseqüentemente, reduzindo o *tap to tap*.

No mesmo sentido, passou-se a estudar, internamente, possíveis alterações em *layout* e ampliação nos pátios de vazamento / resfriamento da Linha 300, para atender à demanda esperada para os anos seguintes.

4 CONCLUSÕES

4.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA

Dada a complexidade e particularidades do sistema estudado, o grande número de variáveis de entrada e o sincronismo necessário para programar o sequenciamento de tarefas na área de geração de fundidos, a SED se mostrou uma ferramenta robusta para encontrar uma solução viável para diminuir o número de moldes aguardando nos pátios de vazamento (WIP) e impedir a ocorrência de bloqueios nas linhas de moldagem. Dessa forma, pode-se dizer que o objetivo geral deste trabalho foi atingido com êxito.

O modelo computacional revelou-se capaz de simular diferentes cenários e responder questões de planejamento de níveis: operacional, como no Cenário 1; tático, simulados nos Cenários 2 e 3, ao alterar as escalas de trabalho; e estratégico, nos quais considerou-se um aumento de demanda para executar e avaliar as simulações dos Cenários 4 e 5.

Passa-se, então, a comentar sobre os objetivos específicos desta dissertação:

- Mapear o processo e modelar o sistema real por meio da técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM:

O modelo foi construído por meio da técnica IDEF-SIM, que se mostrou simples e facilitou o desenvolvimento do modelo computacional. Além disso, o IDEF-SIM traz, consigo, aplicabilidade, pois trata-se de uma técnica simples de mapeamento de processos, podendo ser utilizada em discussões em nível tático e estratégico, antes mesmo de sua implementação;

- Construir o modelo computacional do fluxo produtivo utilizando o *software* ProModel®:

O modelo foi desenvolvido no *software* ProModel®, adotando a estratégia de “comer o boi aos bifos”, apontada por Chwif e Medina (2010). Isso quer dizer que o modelo foi desenvolvido e testado em partes, para só então ser executado o modelo completo;

- Validar o modelo computacional construído por meio de técnica apropriada para dados normais – Teste t pareado.

Antes de validar o modelo, todos os dados foram tratados e as distribuições estatísticas foram geradas com auxílio de *softwares* estatísticos. Para este objetivo específico, deve-se atentar à máxima GIGO, do contrário, o modelo não poderia ser validado estatisticamente.

Os *outliers* da amostra simulada foram excluídos para garantir a normalidade dos dados e o tamanho da amostra dos dados reais foi ajustado para permitir a execução do Teste t pareado.

Por fim, aplicando o Teste t pareado, com auxílio do Minitab®, validou-se o modelo estatisticamente e satisfez-se este objetivo específico.

- Permitir maior compreensão do funcionamento do sistema e identificar gargalos que, muitas vezes são mascarados pelo excesso de WIP no sistema como um todo: O modelo computacional permitiu, por meio da animação gráfica, compreender o funcionamento do sistema como um todo, possibilitou a identificação de recursos que estavam no limite de utilização.
- Analisar cenários, a partir da alteração de escalas de trabalho e variação de parâmetros de demanda de produção e recursos disponíveis: O modelo desenvolvido possibilitou a análise de diferentes cenários e auxiliou na tomada de decisão em relação a investimentos para eliminar gargalos, em uma conjuntura de aumento de demanda.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns desdobramento e sugestões para trabalhos adicionais podem ser apontados, no sentido de dar continuidade e ampliar a utilização desta linha de pesquisa para empresa estudada.

- Utilizar SBA para a resolução do problema proposto, incluindo agentes tomadores de decisão no sistema para aumentar a fidelidade da simulação, de modo a encontrar soluções viáveis.
- Direcionar esforços na criação de um gêmeo digital (*digital twin*) para representar virtualmente o sistema estudado e fornecer informações precisas com base em dados históricos, em tempo hábil para a tomada de decisão.
- Desenvolver um algoritmo capaz de propor uma solução, não apenas viável, mas ótima, para o problema apresentado, por meio de métodos de OvS e *Machine Learning*.
- Aplicar projetos de SED, seguindo a estruturação exposta, ao longo deste trabalho, em outras etapas do processo produtivo, até o produto acabado.

REFERÊNCIAS

- ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. Produção de fundidos tem novo incremento em 2019. **Fundição & Matérias-primas**, São Paulo, ed. 218, p. 14-15, jan. 2020a. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/revista21/>. Acesso em: 13 set. 2020a.
- ABIFA – Associação Brasileira de Fundição. Desempenho do setor de fundição – junho/2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2020/07/06-BOLETIM-JUNHO-20.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020b.
- ALTAF, M. S. *et al.* Integrated production planning and control system for a panelized home prefabrication facility using simulation and RFID. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 85, p. 369–383, 2018. Acesso em: 22 dez. 2020.
- AMARAL, J. V. S. **Otimização baseada em metamodelos**: uma abordagem para metamodelagem em simulação a eventos discretos. 2021. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021. Acesso em: 07 ago. 2021.
- AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. Census of World Casting Production. **Modern Casting**, Schaumburg, v. 109, n. 12, p. 22-25, dec. 2019. Disponível em: <https://cdn.coverstand.com/55001/637245/1708e4f94e9783cdefa70476a15b5e25eb811cb7.6.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2020.
- ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 35, n. 3, p. 916–932, 2008. Acesso em: 07 dez. 2019.
- BAKO, B.; BOŽEK, P. Trends in simulation and planning of manufacturing companies. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 149, p. 571–575, 2016. Acesso em: 05 set. 2021.
- BANKS, J. *et al.* **Discrete-event system simulation**. 5th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2010
- BENDUL, J.; KNOLLMANN, M. The lead time syndrome of manufacturing control: comparison of two independent research approaches. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 41, p. 81–86, 2016. Acesso em: 25 jul. 2021.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002. Acesso em: 06 mar. 2021.
- BEWOOR, L. A.; PRAKASH, V. C.; SAPKAL, S. U. Production scheduling optimization in foundry using hybrid Particle Swarm Optimization algorithm. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 22, p. 57–64, 2018. Acesso em: 02 ago. 2020.
- BIBBY, L.; DEHE, B. Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defence sector. **Production Planning & Control**, Abingdon, v. 29, n. 12, p. 1030–1043, 2018. Acesso em: 04 set. 2021.

- BRAILSFORD, S. C. *et al.* Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 278, n. 3, p. 721–737, 2019. Acesso em: 05 set. 2021.
- BUDGAGA, W. *et al.* Predictive analytics using statistical, learning, and ensemble methods to support real-time exploration of discrete event simulations. **Future Generation Computer Systems**, Amsterdam, v. 56, p. 360–374, 2016. Acesso em: 18 set. 2021.
- CAMARGO, V. C. B.; MATTIOLLI, L.; TOLEDO, F. M. B. A knapsack problem as a tool to solve the production planning problem in small foundries. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 39, n. 1, p. 86–92, 2012. Acesso em: 01 ago. 2020.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. 2nd ed. New York: Springer, 2010.
- CASTRO, R. L. **Planejamento e controle da produção e estoques**: um survey com fornecedores da cadeia automobilística brasileira. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Acesso em: 25 jul. 2021.
- CASTRO, P. M.; GROSSMANN, I. E.; ZHANG, Q. Expanding scope and computational challenges in process scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 114, p. 14–42, 2018. Acesso em: 07 ago. 2021.
- CHO, S. A distributed time-driven simulation method for enabling real-time manufacturing shop floor control. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 49, n. 4, p. 572–590, 2005. Acesso em: 10 out. 2021.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**: teoria e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora dos Autores, 2010.
- CIURANA, J. *et al.* A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 24, n. 4, p. 532–544, 2008. Acesso em: 07 ago. 2021.
- COSTA, B. *et al.* Simulation as a tool for planning a material delivery system to manufacturing lines. *In*: IEEE INTERNATIONAL ENGINEERING MANAGEMENT CONFERENCE, 8., 2008, Estoril. **Proceedings...** Estoril, 2008, p. 1–5, 2008. Acesso em: 10 out. 2021.
- CREIGHTON, D.; NAHAVANDI, S. Application of discrete event simulation for robust system design of a melt facility. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 469–477, 2003. Acesso em: 21 dez. 2020.
- DIAS, L. M. S. *et al.* Discrete simulation software ranking - a top list of the worldwide most popular and used tools. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 49., 2016, Arlington. **Proceedings...** Arlington: Crystal Gateway Marriot, 2016, p. 1060–1071. Acesso em: 17 jan. 2021.

- DOHN, A.; CLAUSEN, J. Optimising the slab yard planning and crane scheduling problem using a two-stage heuristic. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 48, n. 15, p. 4585–4608, 2010. Acesso em: 10 out. 2021.
- DOMBROWSKI, U.; ERNST, S. Scenario-based simulation approach for layout planning. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 12, p. 354–359, 2013. Acesso em: 10 out. 2021.
- DONG, Y. *et al.* Systems modeling and simulation applications for critical care medicine. **Annals of Intensive Care**, Heidelberg, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2012. Acesso em: 05 set. 2021.
- DUDA, J.; STAWOWY, A. Optimization methods for lot-sizing problem in an automated foundry. **Archives of Metallurgy and Materials**, Krakow, v. 58, n. 3, p. 863–866, 2013. Acesso em: 17 jun. 2020.
- EDIS, R. S.; ORNEK, A. Simulation analysis of lot streaming in job shops with transportation queue disciplines. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 442–453, 2009. Acesso em: 10 out. 2021.
- FRANKE, C. *et al.* Remanufacturing of mobile phones-capacity, program and facility adaptation planning. **Omega**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 562–570, 2006. Acesso em: 10 out. 2021.
- FRANTZÉN, M.; NG, A. H. C.; MOORE, P. A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 696–705, 2011. Acesso em: 10 out. 2021.
- GAMBARDELLA, L. M.; RIZZOLI, A. E.; ZAFFALON, M. Simulation and planning of an intermodal container terminal. **Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International**, London, v. 71, n. 2, p. 107–116, 1998. Acesso em: 06 mar. 2021.
- GANSTERER, M.; ALMEDER, C.; HARTL, R. F. Simulation-based optimization methods for setting production planning parameters. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 151, p. 206–213, 2014. Acesso em: 22 dez. 2020.
- GARG, A. K. **Production and Operations Management**. New Delhi: McGraw Hill Education, 2012.
- GEN, M.; LIN, L. Multiobjective evolutionary algorithm for manufacturing scheduling problems: state-of-the-art survey. **Journal of Intelligent Manufacturing**, New York, v. 25, n. 5, p. 849–866, 2014. Acesso em: 07 ago. 2021.
- GHANI, U.; MONFARED, R.; HARRISON, R. Integration approach to virtual-driven discrete event simulation for manufacturing systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Abingdon, v. 28, n. 8, p. 844–860, 2015. Acesso em: 18 set. 2021.
- GOODALL, P.; SHARPE, R.; WEST, A. A data-driven simulation to support remanufacturing operations. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 105, p. 48–60, 2019. Acesso em: 01 ago. 2020.

GREGG, M. L.; VAN ANDEL, S. M.; SAYLOR, S. E. Lean+ manufacturing process analysis simulation (LPAS+). *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 44.*, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: Arizona Grand Resort Hotel, 2011, p. 2166–2175. Acesso em: 10 out. 2021.

GYULAI, D.; PFEIFFER, A.; MONOSTORI, L. Robust production planning and control for multi-stage systems with flexible final assembly lines. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 55, n. 13, p. 3657–3673, 2017. Acesso em: 01 ago. 2020.

HALEVI, G. **Handbook of production management methods**. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 313 p.

HAMROCK, E. *et al.* Discrete event simulation for healthcare organizations: a tool for decision making. **Journal of Healthcare Management**, Chicago, v. 58, n. 2, p. 110–124, 2013. Acesso em: 04 abr. 2021.

HANS, E.; VAN DE VELDE, S. The lot sizing and scheduling of sand casting operations. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 49, n. 9, p. 2481–2499, 2011. Acesso em: 17 jun. 2020.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics**. 3rd ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.

HUANG, H. C. *et al.* SimMan - a simulation model for workforce capacity planning. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 36, n. 8, p. 2490–2497, 2009. Acesso em: 10 out. 2021.

HÜBL, A. *et al.* Flexible model for analyzing production systems with discrete event simulation. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 44.*, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: Arizona Grand Resort Hotel, 2011, p. 1554–1565. Acesso em: 10 out. 2021.

JEON, S. M.; KIM, G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). **Production Planning & Control**, Abingdon, v. 27, n. 5, p. 360–377, 2016. Acesso em: 28 jul. 2020.

JONSSON, P.; MATTSSON, S. A. A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 26, n. 9, p. 971–995, 2006. Acesso em: 28 ago. 2021.

KAMPA, A.; GOLDA, G.; PAPROCKA, I. Discrete event simulation method as a tool for improvement of manufacturing systems. **Computers**, Basel, v. 6, n. 1, 2017. Acesso em: 18 set. 2021.

KELTON, W. D.; LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2000.

KIKOLSKI, M. Study of production scenarios with the use of simulation models. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 182, p. 321–328, 2017. Acesso em: 05 set. 2021.

KORYTKOWSKI, P.; WIŚNIEWSKI, T.; RYMASZEWSKI, S. An evolutionary simulation-based optimization approach for dispatching scheduling. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Amsterdam, v. 35, p. 69–85, 2013. Acesso em: 10 out. 2021.

KREKE, J. E.; SCHAEFER, A. J.; ROBERTS, M. S. Simulation and critical modeling. **Current Opinion in Critical Care**, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 395–398, 2004. Acesso em: 05 set. 2021.

KUMAR, S. A.; SURESH, N. **Production and operations management**. 2nd ed. New Delhi: New Age International Publisher, 2008.

LANDMANN, R. **Um modelo heurístico para a programação da produção em fundições com utilização da lógica**. 2005. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Acesso em: 22 dez. 2022.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008. Acesso em: 19 out. 2019.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A. DE; 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. **Anais...** João Pessoa, 2008, p. 2503–2514. Acesso em: 24 out. 2021.

LEE, Y. H.; JEONG, C. S.; MOON, C. Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 43, n. 1-2, p. 351–374, 2002. Acesso em: 04 set. 2021.

LI, X. *et al.* A production planning model for make-to-order foundry flow shop with capacity constraint. **Mathematical Problems in Engineering**, London, v. 2017, p. 1-15, 2017. Acesso em: 02 ago. 2020.

LONGO, F.; MIRABELLI, G. An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 54, n. 3, p. 570–588, 2008. Acesso em: 04 abr. 2021.

MACAL, C.; NORTH, M. Introductory tutorial: agent-based modeling and simulation. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 47., 2014, Savannah. **Proceedings...** Savannah: Westin Savannah Harbor Golf Resort & Spa, 2014, p. 6–20. Acesso em: 06 set. 2021.

MACIEL, L. F. **Aplicação da simulação a eventos discretos no balanceamento de linha de montagem**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Acesso em: 07 ago. 2021.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 127, p. 925–953, 2019. Acesso em: 04 set. 2021.

MARAVELIAS, C. T.; SUNG, C. Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 33, n. 12, p. 1919–1930, 2009. Acesso em: 07 ago. 2021.

MEYR, H.; WAGNER, M.; ROHDE, J. Structure of advanced planning systems. *In*: STADTLER, H.; KILGER, C.; MEYR, H. (Eds.). **Supply Chain Management and Advanced Planning**. 5th ed. Berlin: Springer, 2015. cap. 5, p. 99-106.

MICLO, R. *et al.* An empirical comparison of MRPII and demand-driven MRP. **IFAC-PapersOnLine**, Laxenburg, v. 49, n. 12, p. 1725–1730, 2016. Acesso em: 22 ago. 2021.

MICLO, R. *et al.* Demand driven MRP: assessment of a new approach to materials management. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 57, n. 1, p. 166–181, 2019. Acesso em: 29 ago. 2021.

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

MILLER, A.; SIMON, M. Model planning production and logistics activities in business networks. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 69, p. 370–376, 2014. Acesso em: 10 out. 2021.

MILNE, R. J.; MAHAPATRA, S.; WANG, C. T. Optimizing planned lead times for enhancing performance of MRP systems. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 167, p. 220–231, 2015. Acesso em: 22 ago. 2021.

MIRANDA, R. C. **Redução do espaço de busca em problemas de otimização via simulação utilizando análise envoltória de dados e arranjos ortogonais de Taguchi**. 2015. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Acesso em: 08 ago. 2021.

MOEUF, A. *et al.* The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 56, n. 3, p. 1–19, 2018. Acesso em: 04 set. 2021.

MONTEVECHI, J. A. B. *et al.* Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 43., 2010, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: Marriot Waterfront Hotel, 2010, p. 1624–1635. Acesso em: 18 set. 2021.

MONTEVECHI, J. A. B. *et al.* Identification of the main methods used in simulation projects. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 48., 2015, Huntington Beach. **Proceedings...** Huntington Beach: Hyatt Regency Huntington Beach Resort and Spa, 2015, p. 3469–3480. Acesso em: 19 set. 2021.

NAEDELE, M. *et al.* Manufacturing execution systems: a vision for managing software development. **Journal of Systems and Software**, New York, v. 101, p. 59–68, 2015. Acesso em: 04 set. 2021.

- NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, Dearborn, v. 33, n. 2, p. 241–261, 2014. Acesso em: 01 ago. 2020.
- NELLES, J. *et al.* Human-centered design of assistance systems for production planning and control: the role of the human in Industry 4.0. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY*, 17., 2016, Taipei. **Proceedings...** Taipei: Howard Plaza Hotel Taipei, 2016, p. 2099–2104. Acesso em: 07 ago. 2021.
- OMOGBAI, O.; SALONITIS, K. Manufacturing system lean improvement design using discrete event simulation. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 57, p. 195–200, 2016. Acesso em: 17 jun. 2020.
- OSORIO, A. F. *et al.* Simulation-optimization model for production planning in the blood supply chain. **Health Care Management Science**, New York, v. 20, n. 4, p. 548–564, 2017. Acesso em: 22 dez. 2020.
- PARK, Y. K.; YANG, J. M. A scheme of supplementary production in linear programming scheduling of die casting processes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture**, London, v. 227, n. 6, p. 855–865, 2013. Acesso em: 02 ago. 2020.
- PEREIRA, A. P. **Simulação a eventos discretos como uma ferramenta de auxílio ao planejamento da produção em uma empresa multinacional de tecnologia**. 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Acesso em: 07 ago. 2021.
- PEREIRA, J. S. G. A. **Aplicação de simulação a eventos discretos na área de intra-logística de uma linha de montagem de chassis**. 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018. Acesso em: 22 dez. 2022.
- PINEDO, M. L. **Planning and scheduling in manufacturing and services**. 1st ed. New York: Springer, 2005. 506 p.
- PONSIGNON, T.; MÖNCH, L. Simulation-based performance assessment of master planning approaches in semiconductor manufacturing. **Omega**, Oxford, v. 46, p. 21–35, 2014. Acesso em: 06 mar. 2021.
- PRAJAPAT, N.; TIWARI, A. A review of assembly optimisation applications using discrete event simulation. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Abingdon, v. 30, n. 2–3, p. 215–228, 2017. Acesso em: 18 set. 2021.
- QIN, H. *et al.* An effective hybrid discrete grey wolf optimizer for the casting production scheduling problem with multi-objective and multi-constraint. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 128, p. 458–476, 2019. Acesso em: 02 ago. 2020.

- RANAIEFAR, F. *et al.* Material flow planning in cellular manufacturing systems by computer simulation. *In: UKSIM EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER MODELING AND SIMULATION*, 3., 2009, Athens. **Proceedings...** Athens, 2009, p. 430–434. Acesso em: 10 out. 2021.
- RIEZEBOS, J.; ZHU, S. X. MRP planned orders in a multiple-supplier environment with differing lead times. **Production and Operations Management**, Hoboken, v. 24, n. 6, p. 883–895, 2015. Acesso em: 22 ago. 2021.
- ROJKO, A. Industry 4.0 concept: background and overview. **International Journal of Interactive Mobile Technologies**, Wien, v. 11, n. 5, p. 77–90, 2017. Acesso em: 29 ago. 2021.
- RONDEAU, P. J.; LITTERAL, L. A. The evolution of manufacturing planning and control systems: from reorder point to enterprise resource planning. **Production and Inventory Management Journal**, Chicago, v. 34, n. 2, p. 1-7, 2001. Acesso em: 25 jul. 2021.
- ROSSI, T. *et al.* Improving production planning through finite-capacity MRP. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 55, n. 2, p. 377–391, 2017. Acesso em: 22 ago. 2021.
- SAHINOGLU, M. Modeling and simulation in engineering. **Wiley Interdisciplinary Review Series: Computational Statistics**, Hoboken, v. 5, n. 3, p. 239–266, 2013. Acesso em: 05 set. 2021.
- SANTANA, W. A. L. **Utilização da simulação a eventos discretos para o gerenciamento do almoxarifado de materiais utilizados numa indústria automotiva.** 2018. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018. Acesso em: 08 ago. 2021.
- SANTOS-MEZA, E. DOS; SANTOS, M. O. DOS; ARENALES, M. N. A lot-sizing problem in an automated foundry. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 139, n. 3, p. 490–500, 2002. Acesso em: 17 jun. 2020.
- SANTOS, C. H. *et al.* Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 60, n. 8, p. 2662–2681, 2021. Acesso em: 05 set. 2021.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models: an advanced tutorial. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 53., 2020, Virtual. **Proceedings...** Virtual, 2020, p. 16–29. Acesso em: 09 out. 2021.
- SCHEIDEGGER, A. P. G. *et al.* An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 124, p. 474–492, 2018. Acesso em: 23 out. 2021.

SCHRIBER, T. J.; BRUNNER, D. T. Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 50., 2017, Las Vegas. **Proceedings...** Las Vegas: Red Rock Casino Resort & Spa, 2017, p. 735–749. Acesso em: 04 set. 2021.

SEITZ, K. F.; NYHUIS, P. Cyber-physical production systems combined with logistic models-a learning factory concept for an improved production planning and control. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 32, p. 92–97, 2015. Acesso em: 01 ago. 2020.

SHANG, C.; YOU, F. Distributionally robust optimization for planning and scheduling under uncertainty. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 110, p. 53–68, 2018. Acesso em: 07 ago. 2021.

SHOFA, M. J.; WIDYARTO, W. O. Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP. *In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*, 1855., 2017, Surakarta. **Proceedings...** Surakarta: American Institute of Physics, 2017. Acesso em: 22 ago. 2021.

SILVA, R. DE J.; MORABITO, R. Otimização da programação de cargas de forno em uma fábrica de fundição em aço-inox. **Gestão & Produção**, São Paulo v. 11, p. 135–151, 2004. Acesso em: 01 ago. 2020.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 8 ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SON, Y. J. *et al.* Simulation-based shop floor control. **Journal of Manufacturing Systems**, Dearborn, v. 21, n. 5, p. 380–394, 2002. Acesso em: 10 out. 2021.

SOUSA JUNIOR, W. T. *et al.* Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: a systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 128, p. 526–540, 2019. Acesso em: 05 set. 2021.

STAWOWY, A.; DUDA, J. Production scheduling for the furnace - casting line system. **Archives of Foundry Engineering**, Katowice, v. 13, n. 3, p. 84–87, 2013. Acesso em: 02 ago. 2020.

STAWOWY, A.; DUDA, J. Iterated Local Search for Foundry Lotsizing and Scheduling Problem with Setup Costs. **Archives of Foundry Engineering**, Katowice, v. 17, n. 4, p. 161–164, 2017. Acesso em: 02 ago. 2020.

STAWOWY, A.; DUDA, J. Production scheduling for the two furnaces - one casting line system. **Archives of Foundry Engineering**, Katowice, v. 20, n. 1, p. 43–48, 2020. Acesso em: 02 ago. 2020.

STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G. A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 43, n. 5, p. 869–898, 2005. Acesso em: 09 ago. 2020.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, Amsterdam, v. 52, n. 4, p. 802–815, 2012. Acesso em: 04 abr. 2021.

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; DANESHMAND-MEHR, M. A computer simulation model for job shop scheduling problems minimizing makespan. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 48, n. 4, p. 811–823, 2005. Acesso em: 10 out. 2021.

TEIXEIRA JUNIOR, R. F.; FERNANDES, F. C. F.; PEREIRA, N. A. Binary integer programming formulations for scheduling in market-driven foundries. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 59, n. 3, p. 425–435, 2010. Acesso em: 20 dez. 2020.

TELSANG, M. T. **Industrial engineering and production management**. 3rd ed. New Delhi: S. Chand & Company, 2018.

TONAKI, V. S.; TOLEDO, F. M. B. An approach for solving the lot-sizing problem of a market-driven foundry. **Journal of the Operational Research Society**, London, v. 61, n. 1, p. 108–114, 2010. Acesso em: 01 ago. 2020.

UGARTE, B. S. *et al.* Development and integration of a reactive real-time decision support system in the aluminum industry. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 22, n. 6, p. 897–905, 2009. Acesso em: 21 dez. 2020.

UPADHYAY, S. P.; ASKARI-NASAB, H. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. **International Journal of Mining Science and Technology**, Wien, v. 28, n. 2, p. 153–166, 2018. Acesso em: 01 ago. 2020.

VASUDEVAN, K. *et al.* Application of simulation to design and operation of steel mill devoted to manufacture of line pipes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SYSTEM SIMULATION*, 2., 2010, Nice. **Proceedings...** Nice, 2010, p. 1–6. Acesso em: 10 out. 2021.

VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: an experimental study. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 24, n. 3, p. 435–449, 2008. Acesso em: 06 mar. 2021.

VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 129, n. 1, p. 127–146, 2011. Acesso em: 10 out. 2021.

WILLIAMS, D. L. *et al.* Discrete simulation development for a proposed shipyard steel processing facility. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 34., 2001, Arlington. **Proceedings...** Arlington: Crystal Gateway Marriot, 2001, p. 882–887. Acesso em: 10 out. 2021.

WONG, D. VOSviewer. **Technical Services Quarterly**, Philadelphia, v. 35, n. 2, p. 219–220, 2018. Acesso em: 18 jun. 2020.

YANG, T. *et al.* Lean production system design for fishing net manufacturing using lean principles and simulation optimization. **Journal of Manufacturing Systems**, Dearborn, v. 34, n. 1, p. 66–73, 2015. Acesso em: 07 mar. 2022.

ZHANG, W.; GEN, M.; JO, J. Hybrid sampling strategy-based multiobjective evolutionary algorithm for process planning and scheduling problem. **Journal of Intelligent Manufacturing**, New York, v. 25, n. 5, p. 881–897, 2014. Acesso em: 07 ago. 2021.

ANEXO A – VISÃO DA EMPRESA PATROCINADORA

“Para a Amsted Maxion, ter a oportunidade de ter um aluno graduado no Mestrado Profissional em Engenharia de Produção na UNESP, é um grande diferencial, pois essa integração entre a formação acadêmica adaptada as necessidades de mercado e a possibilidade de aplicação profissional, nos permite atuar na solução de problemas complexos, na aplicação de novos conceitos e no desenvolvimento de profissionais de alto desempenho.

Dentro desse contexto, o trabalho apresentado se mostrou extremamente relevante, além de inovador para a organização, pois sabe-se o quanto o Planejamento e Controle de Produção são importantes para o sucesso de uma empresa, sobretudo em uma empresa do ramo de Fundição e a possibilidade de Simulação a Eventos Discretos como uma ferramenta gerencial contribui não só com a diminuição do *Work in Progress*, mas também auxilia na tomada de decisão da liderança.

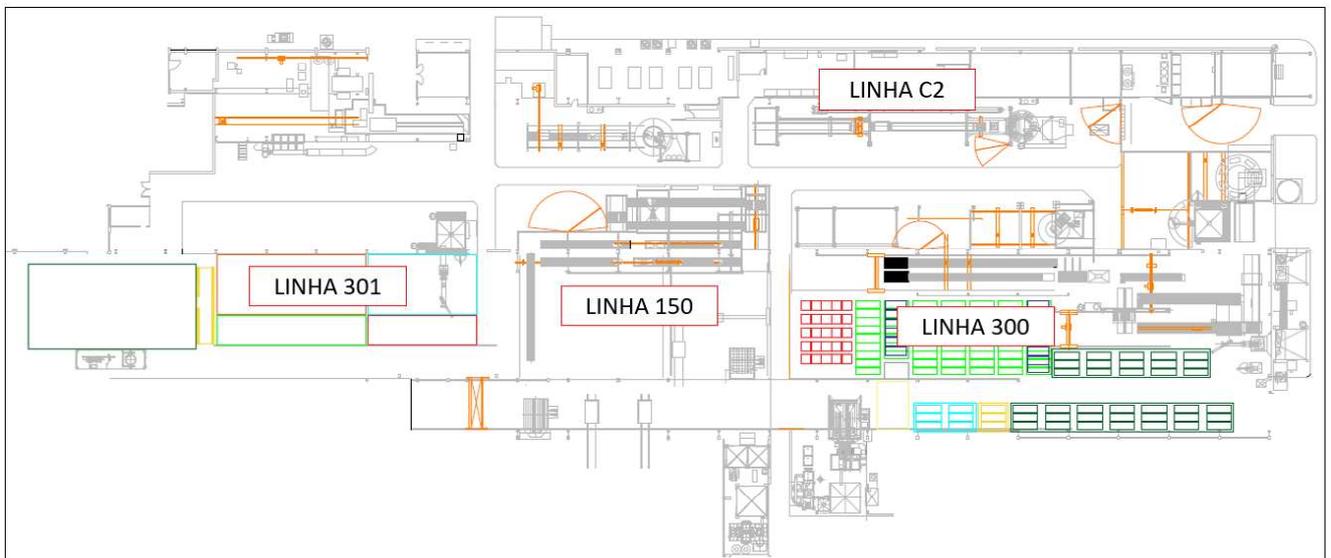
A partir desse estudo, outras oportunidades de pesquisa podem ser exploradas futuramente, ampliando os resultados deste trabalho.

Assim, o Mestrado Profissional em Engenharia de Produção atingiu os resultados esperados, além de ter contribuído com a formação de um profissional altamente capacitado para resolver problemas complexos.”¹

¹ Mariana Teixeira Nogueira da Silva, gerente de Recursos Humanos da empresa estudada.

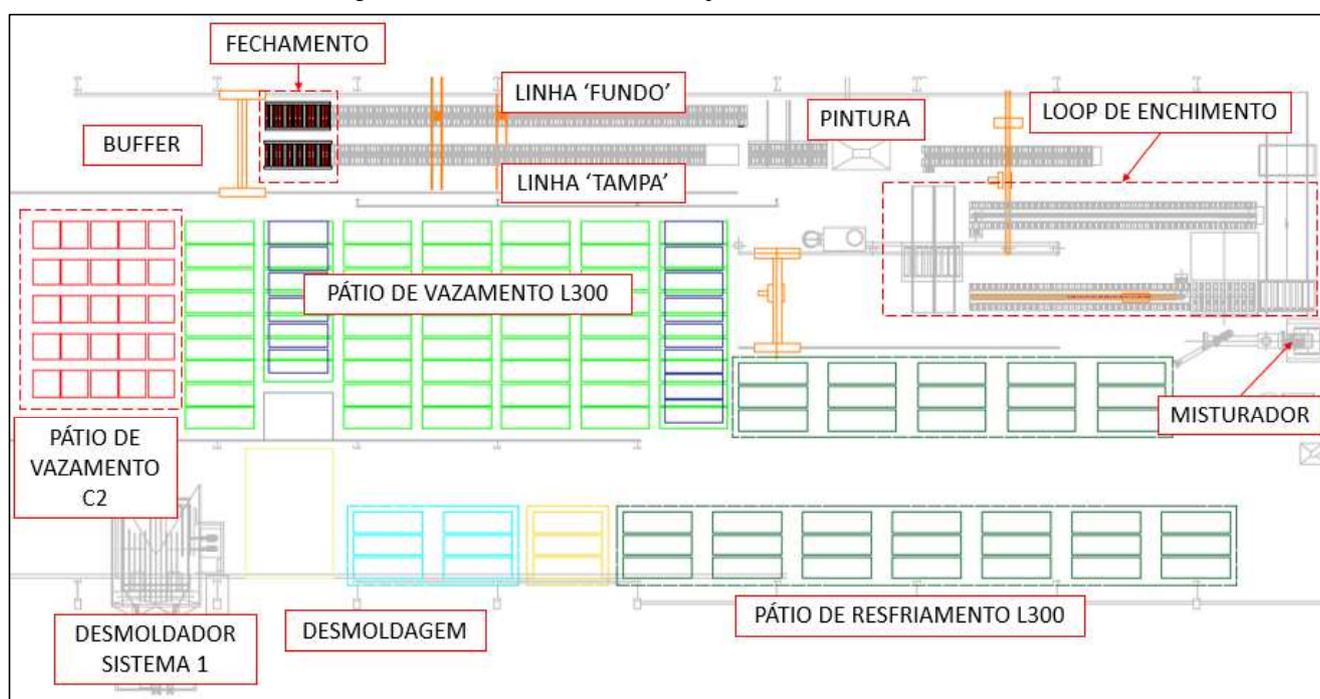
ANEXO B – APRESENTAÇÃO DAS PLANTAS BAIXAS E IDENTIFICAÇÃO DOS OBJETOS RELEVANTES

Figura 41 – Planta baixa da área geradora de fundidos e identificação das linhas de moldagem



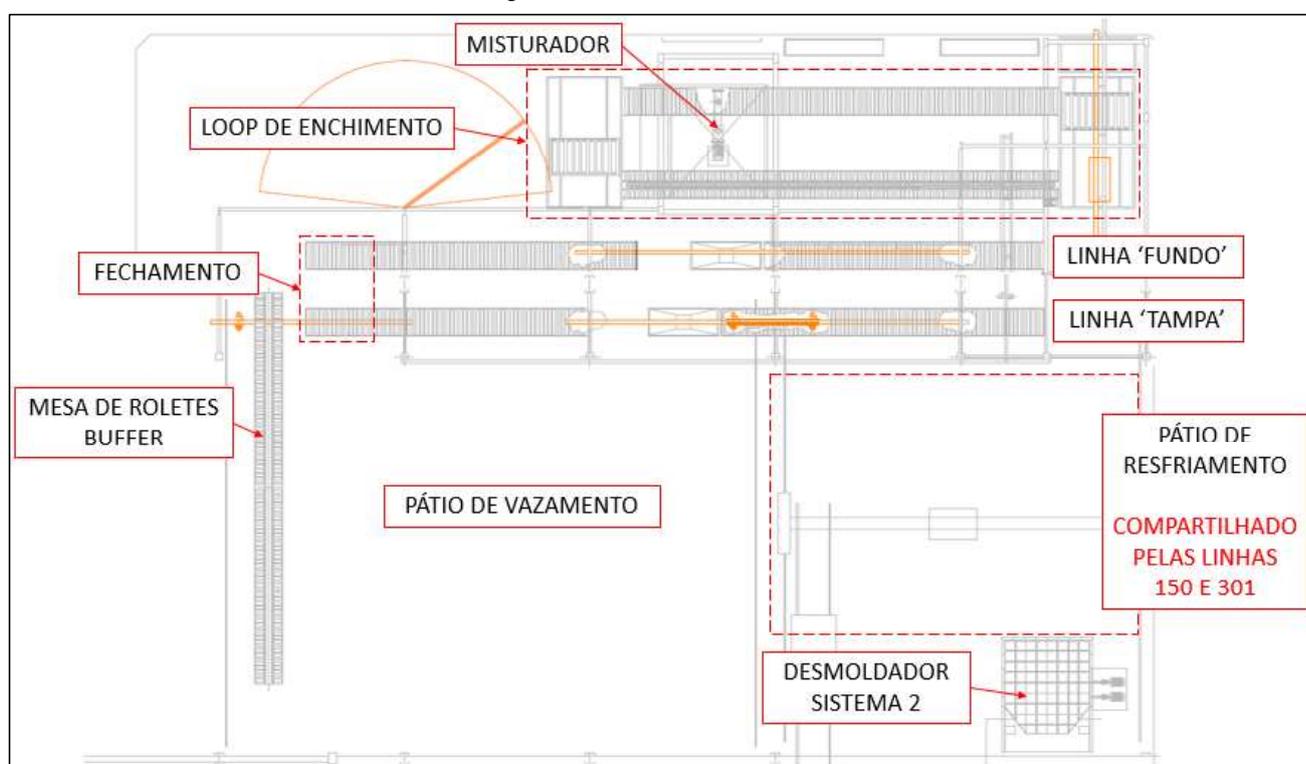
Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 42 – Planta baixa da Linha 300 e pátio de vazamento da Linha C2



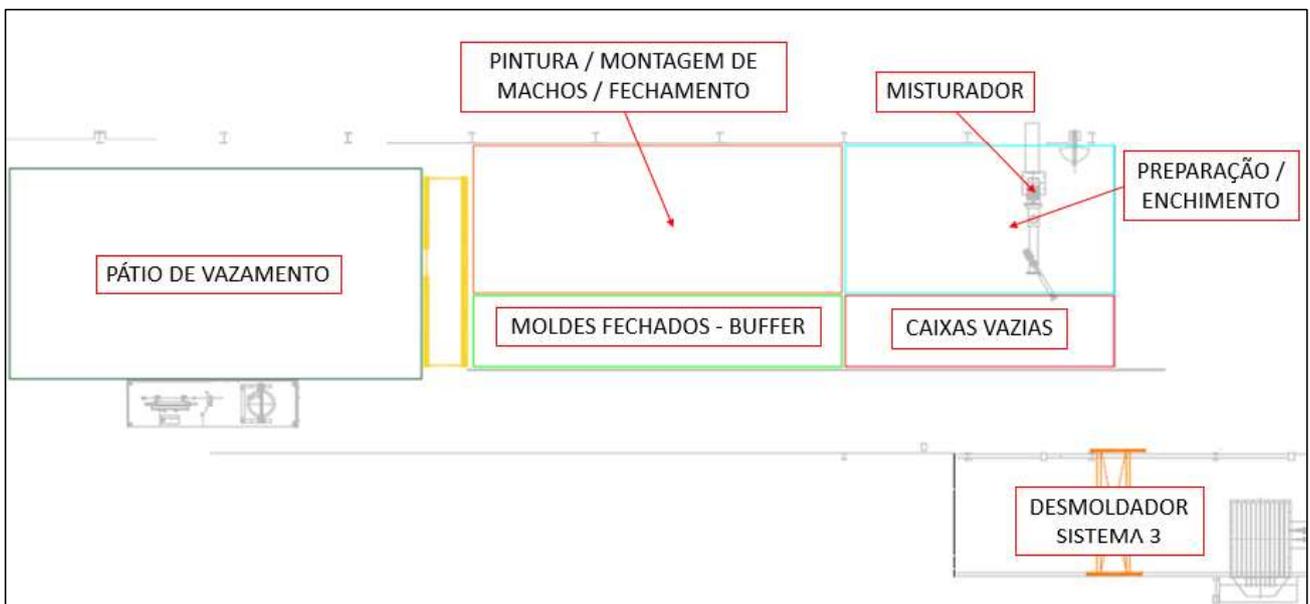
Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 43 – Planta baixa da Linha 150



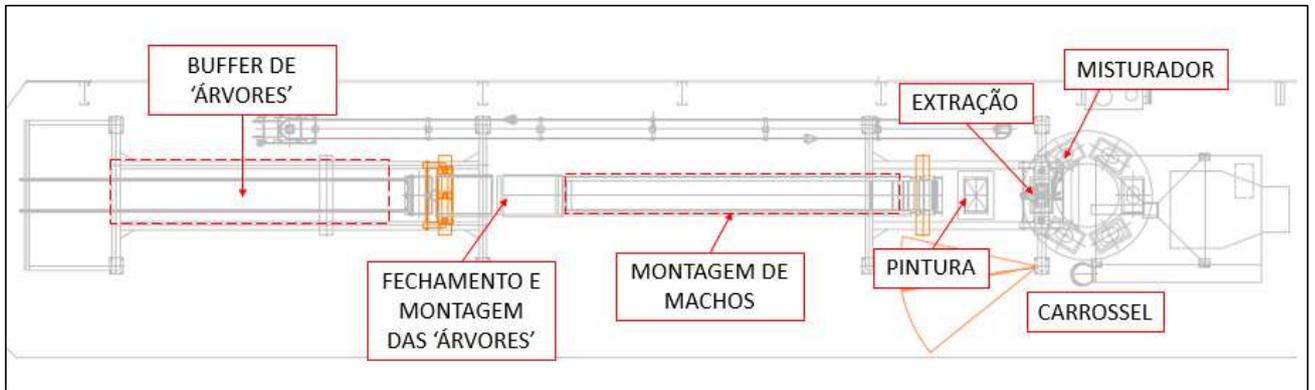
Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 44 – Planta baixa da Linha 301



Fonte: Empresa estudada (2022)

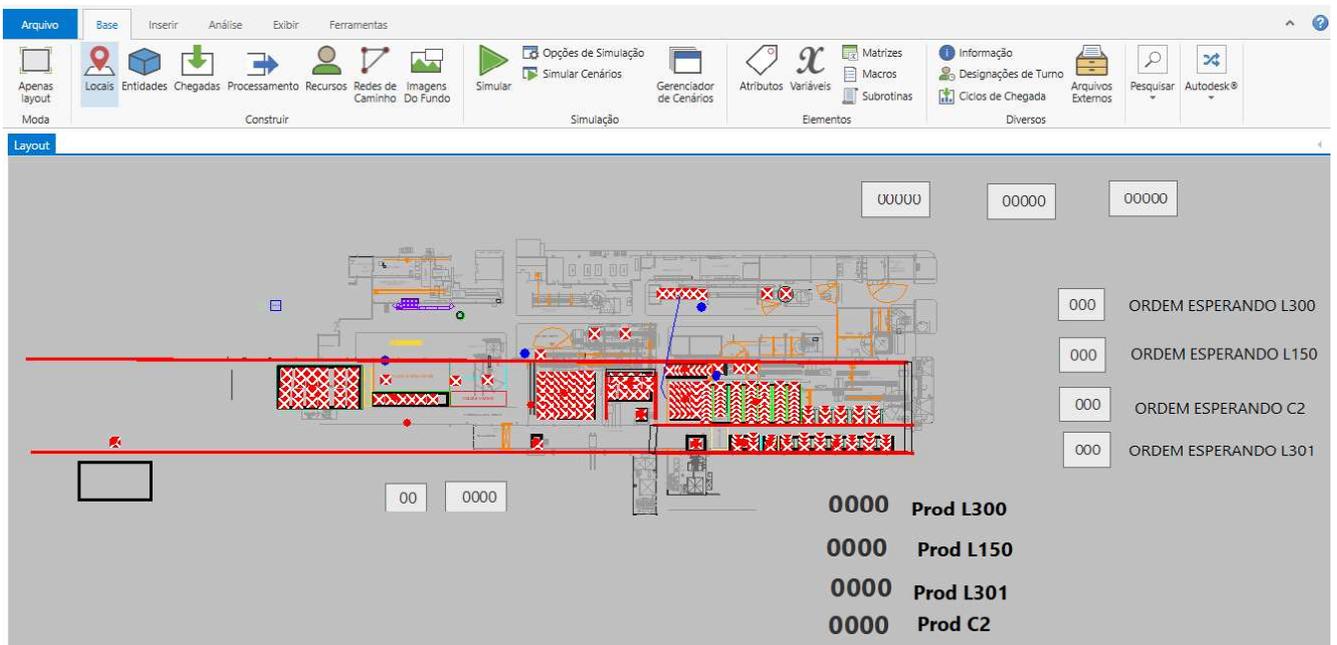
Figura 45 – Planta baixa da Linha C2



Fonte: Empresa estudada (2022)

ANEXO C – APRESENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

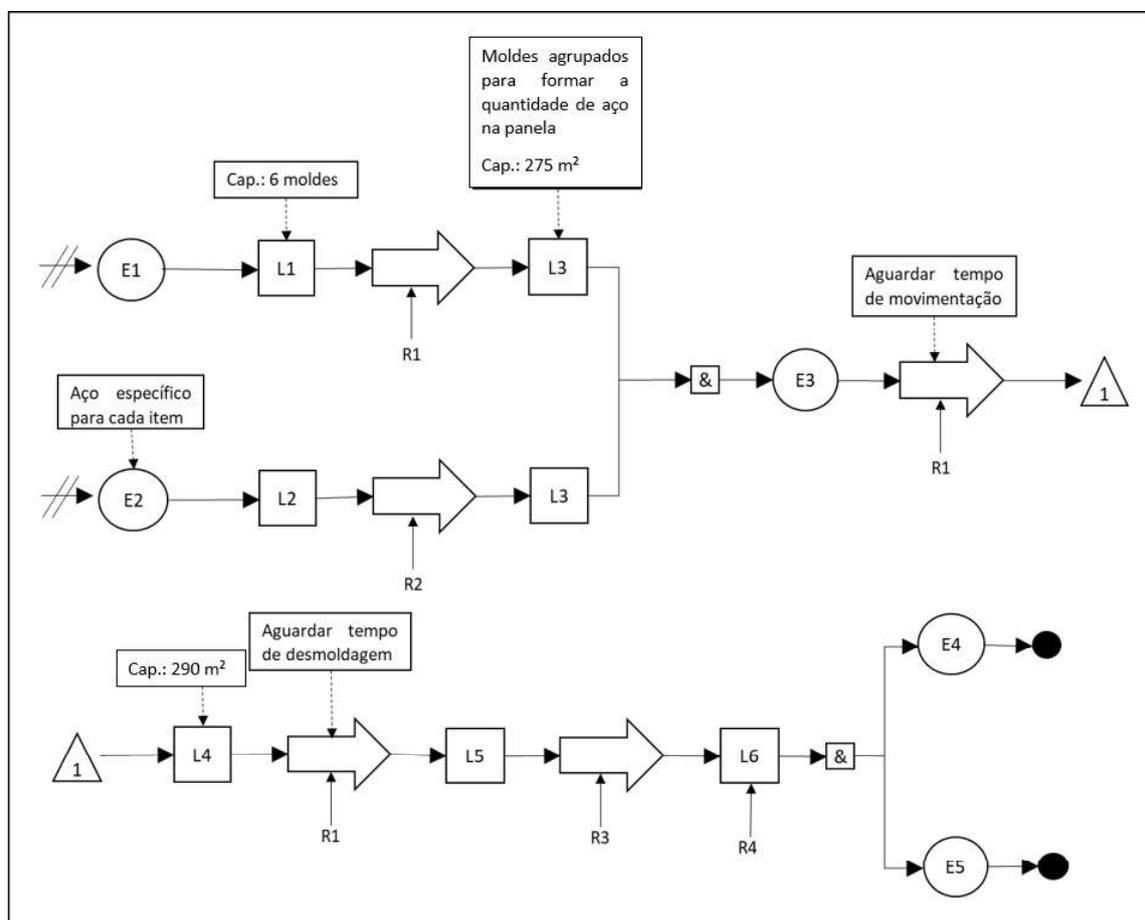
Figura 46 – Modelo computacional desenvolvido no *software* ProModel®



Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO D – APRESENTAÇÃO DOS MODELOS CONCEITUAIS CONSTRUÍDOS POR MEIO DA TÉCNICA IDEF-SIM

Figura 47 – IDEF-SIM Linha 300



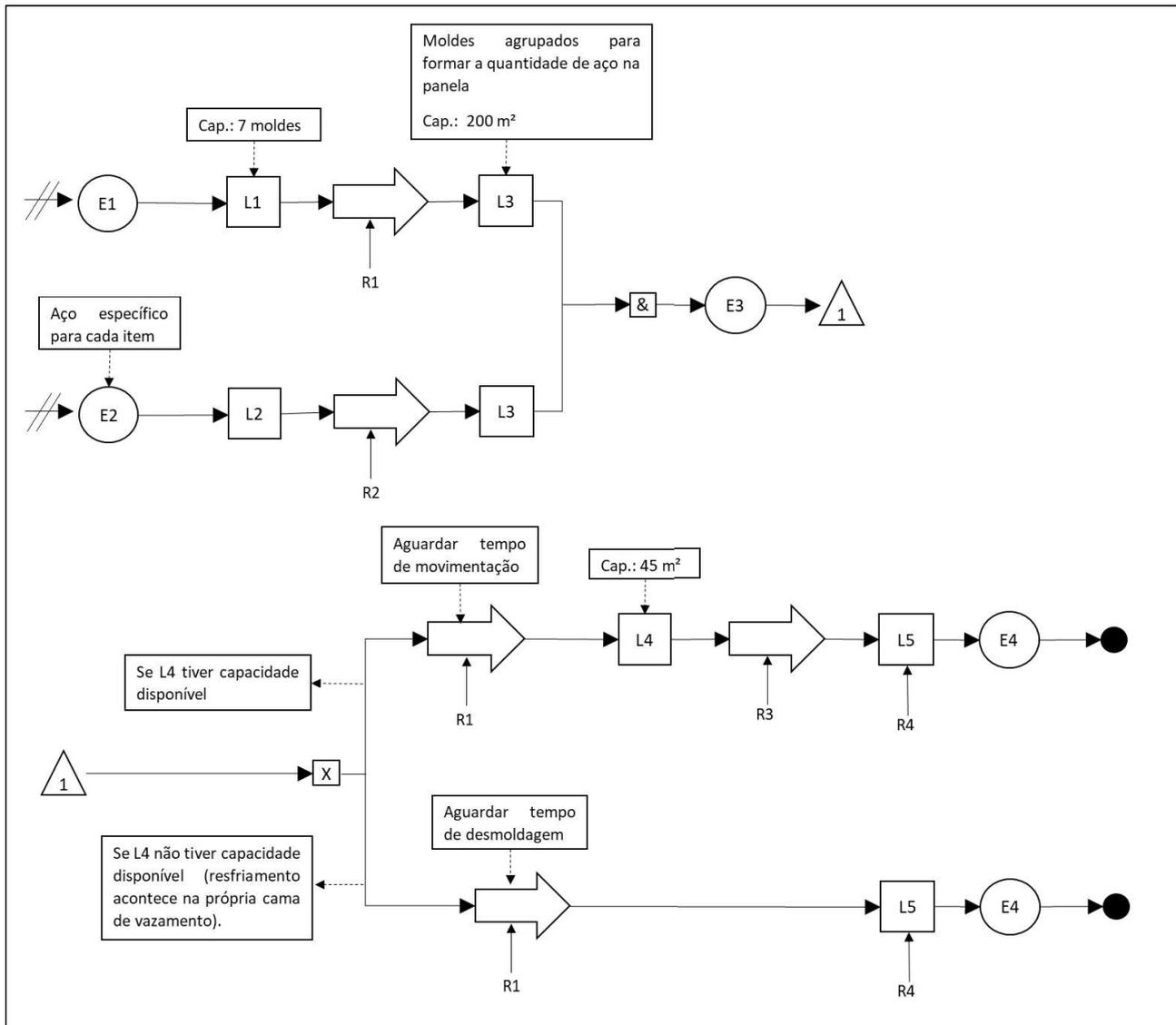
Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 9 – Elementos presentes na Figura 47

Componente	Elemento	Descrição
E1	Entidade	Molde
E2	Entidade	Aço
E3	Entidade	Molde vazado
E4	Entidade	Peça
E5	Entidade	Caixa de moldagem
L1	Função	Buffer - moldes fechados
L2	Função	Aciaria
L3	Função	Pátio de vazamento
L4	Função	Pátio de resfriamento
L5	Função	Área de desmoldagem
L6	Função	Desmoldagem
R1	Recurso	Ponte rolante (F6703 - 10 ton)
R2	Recurso	Ponte rolante (F6729 - 30 ton)
R3	Recurso	Ponte rolante (F6730 - 7,5 ton)
R4	Recurso	Desmoldador Sist. 01 (F1052)

Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 48 – IDEF-SIM Linha 150



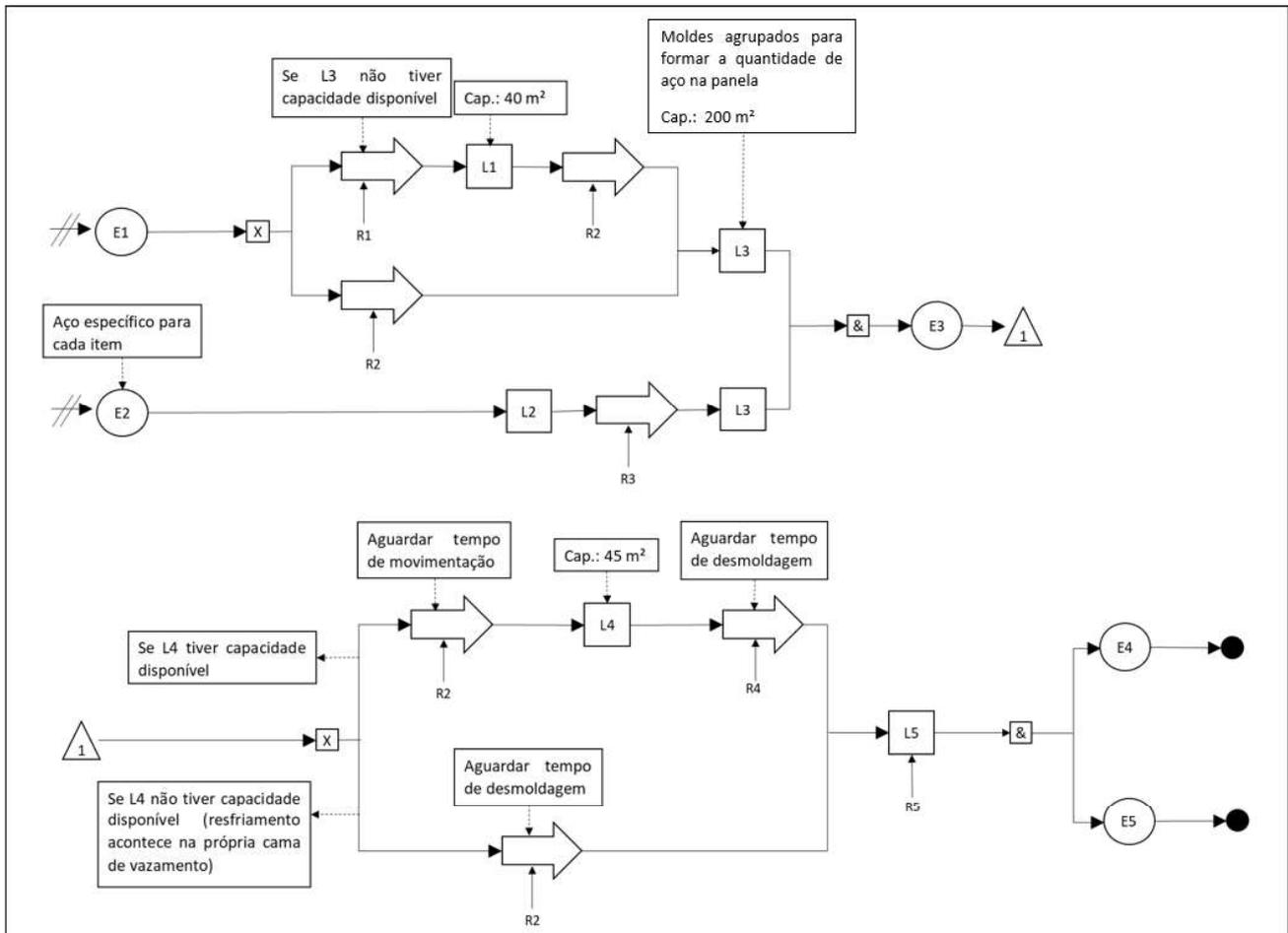
Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 10 – Elementos presentes na Figura 48

Componente	Elemento	Descrição
E1	Entidade	Molde
E2	Entidade	Aço
E3	Entidade	Molde vazado
E4	Entidade	Peça
L1	Função	Buffer - moldes fechados
L2	Função	Aciação
L3	Função	Pátio de vazamento
L4	Função	Área de desmoldagem
L5	Função	Desmoldagem
R1	Recurso	Ponte rolante (F6781 - 20 ton)
R2	Recurso	Ponte rolante (F6729 - 30 ton)
R3	Recurso	Pórtico (F6662 - 6 ton)
R4	Recurso	Desmoldador Sist. 02 (F1051)

Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 49 – IDEF-SIM Linha 301



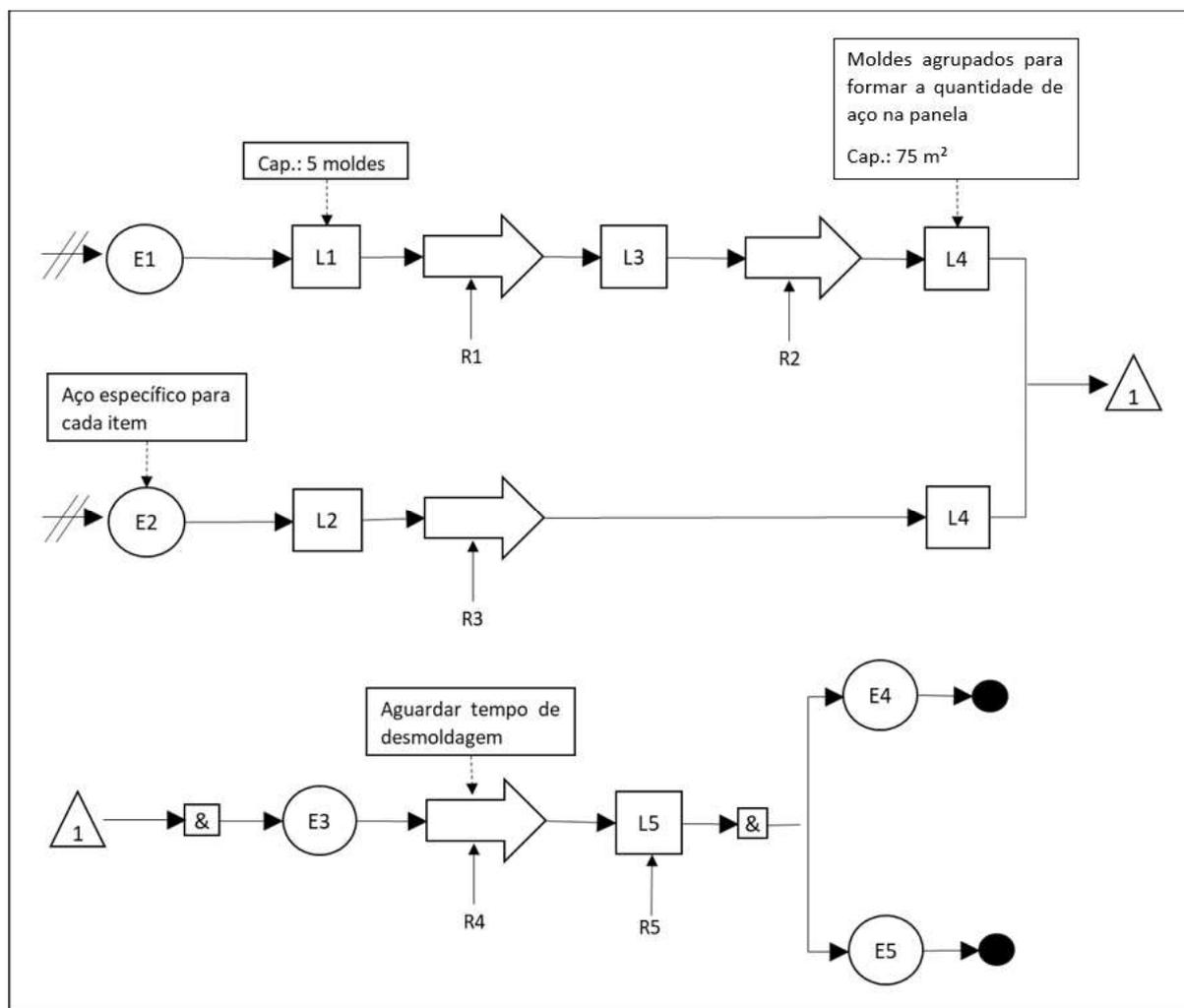
Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 11 – Elementos presentes na Figura 49

Componente	Elemento	Descrição
E1	Entidade	Molde
E2	Entidade	Aço
E3	Entidade	Molde vazado
E4	Entidade	Peça
E5	Entidade	Caixa vazia
L1	Função	Buffer - moldes fechados
L2	Função	Aciaria
L3	Função	Pátio de vazamento
L4	Função	Área de desmoldagem
L5	Função	Desmoldagem
R1	Recurso	Semi Pórtico (F6741 - 10 ton)
R2	Recurso	Ponte rolante (F6781 - 20 ton)
R3	Recurso	Ponte rolante (F6729 - 30 ton)
R4	Recurso	Pórtico (F6662 - 6 ton)
R5	Recurso	Desmoldador Sist. 02 (F1051)
R6	Recurso	Desmoldador Sist. 03 (F1050)

Fonte: Empresa estudada (2022)

Figura 50 – IDEF-SIM Linha C2



Fonte: Empresa estudada (2022)

Quadro 12 – Elementos presentes na Figura 50

Componente	Elemento	Descrição
E1	Entidade	Molde
E2	Entidade	Aço
E3	Entidade	Molde vazado
E4	Entidade	Peça
E5	Entidade	Base
L1	Função	Buffer - moldes fechados
L2	Função	Aciaria
L3	Função	Entrada pátio de vazamento
L4	Função	Pátio de vazamento
L5	Função	Desmoldagem
R1	Recurso	Empilhadeira
R2	Recurso	Ponte rolante (F6703 - 10 ton)
R3	Recurso	Ponte rolante (F6729 - 30 ton)
R4	Recurso	Ponte rolante (F6781 - 20 ton)
R5	Recurso	Desmoldador Sist. 02 (F1051)

Fonte: Empresa estudada (2022)

ANEXO E – PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO DOS FUNDIDOS

Tabela 11 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos

(continua)

Item	Tipo de aço	Peso (kg)	Linha de moldagem	Tempo para movimentação (horas)	Tempo para desmoldagem (horas)	Área ocupada (m ²)
1	4	3730	LINHA 301	20	70	11,32
2	4	4200	LINHA 301	20	70	11,32
3	2	473	LINHA 150	3	24	3,53
4	5	3080	LINHA 301	12	48	5,48
5	11	730	LINHA 300	2	10	3,16
6	2	141	LINHA 150	2	5	1,96
7	2	141	LINHA 150	2	5	1,96
8	5	2704	LINHA 301	12	48	5,48
9	9	830	LINHA 300	3	24	4,08
10	9	1520	LINHA 300	3	24	4,08
11	9	830	LINHA 300	3	24	4,08
12	2	1250	LINHA 301	8	48	5,48
13	2	1250	LINHA 301	8	48	5,48
14	1	478	LINHA 301	3	12	5,34
15	2	725	LINHA 150	2	24	3,53
16	2	262	LINHA 150	2	15	3,53
17	2	262	LINHA 150	2	15	3,53
18	2	3830	LINHA 301	80	80	11,32
19	2	3830	LINHA 301	80	80	11,32
20	4	4260	LINHA 301	20	48	11,32
21	4	4260	LINHA 301	20	48	11,32
22	5	3400	LINHA 301	30	60	7,08
23	5	3400	LINHA 301	30	60	7,08
24	5	4800	LINHA 301	30	60	7,08
25	5	4800	LINHA 301	30	60	7,08
26	10	5200	LINHA 301	30	60	8,05
27	10	5200	LINHA 301	30	60	8,05
28	2	2700	LINHA 301	12	48	8,05
29	5	1150	LINHA 301	6	12	3,16
30	5	1100	LINHA 301	6	12	3,16
31	5	1100	LINHA 150	2	12	6,17
32	5	3042	LINHA 301	12	48	5,48
33	2	845	LINHA 300	3	30	2,13
34	2	845	LINHA 300	3	30	2,13
35	2	811	LINHA 300	3	30	2,13

Tabela 12 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos

(continuação)

Item	Tipo de aço	Peso (kg)	Linha de moldagem	Tempo para movimentação (horas)	Tempo para desmoldagem (horas)	Área ocupada (m ²)
36	2	811	LINHA 300	3	30	2,13
37	11	730	LINHA 300	2	10	3,16
38	2	448	LINHA 150	2	24	4,39
39	2	450	LINHA 150	3	18	4,45
40	2	450	LINHA 150	3	18	3,93
41	2	850	LINHA 150	4	48	3,53
42	5	6500	LINHA 301	60	80	8,38
43	2	700	LINHA 150	3	18	5,97
44	2	650	LINHA 150	3	18	5,19
45	4	4500	LINHA 301	20	48	11,32
46	4	4500	LINHA 301	20	48	11,32
47	5	3042	LINHA 301	12	48	5,48
48	4	1100	LINHA 301	12	53	5,48
49	7	530	LINHA 150	3	20	3,53
50	7	530	LINHA 150	3	20	3,53
51	7	766	LINHA 150	3	20	3,53
52	7	766	LINHA 150	3	20	3,53
53	2	650	LINHA 300	3	16	4,08
54	8	972	LINHA 150	2	20	4,45
55	8	972	LINHA 150	2	20	4,45
56	8	1088	LINHA 150	2	20	5,05
57	8	1088	LINHA 150	2	20	5,05
58	2	416	LINHA 300	2	10	2,13
59	2	1030	LINHA 301	5	24	3,52
60	2	576	LINHA 300	2	6	3,16
61	4	185	LINHA 150	2	8	5,46
62	4	185	LINHA 150	2	8	5,46
63	4	1930	LINHA 301	5	36	3,67
64	4	5000	LINHA 301	30	72	13,36
65	4	5000	LINHA 301	30	72	13,36
66	3	222	LINHA 150	1	5	3,53
67	3	725	LINHA 300	4	8	4,80
68	3	670	LINHA 300	4	8	4,80
69	6	612	LINHA C2	5	5	2,37
70	3	482	LINHA 300	1	6	3,73
71	3	950	LINHA 300	2	8	4,26
72	3	1002	LINHA 300	2	8	4,26
73	3	520	LINHA 300	1	6	3,73

Tabela 13 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos

(continuação)

Item	Tipo de aço	Peso (kg)	Linha de moldagem	Tempo para movimentação (horas)	Tempo para desmoldagem (horas)	Área ocupada (m ²)
74	3	1050	LINHA 300	2	8	4,26
75	3	570	LINHA 300	1	6	3,73
76	3	630	LINHA 300	2	8	4,06
77	3	940	LINHA 300	2	8	4,26
78	3	570	LINHA 300	1	6	3,73
79	3	986	LINHA 300	2	8	4,26
80	1	242	LINHA 150	1	6	3,53
81	1	529	LINHA 300	1	6	3,11
82	1	558	LINHA 300	1	8	2,47
83	1	392	LINHA 300	1	6	3,69
84	1	311	LINHA 150	1	5	3,53
85	1	305	LINHA 150	1	5	3,53
86	1	310	LINHA 150	1	5	3,53
87	1	305	LINHA 150	1	5	3,53
88	3	230	LINHA 150	1	6	3,53
89	1	160	LINHA 150	1	6	3,53
90	3	155	LINHA 150	1	5	3,53
91	1	306	LINHA 150	1	5	3,53
92	6	720	LINHA C2	5	5	2,37
93	6	705	LINHA C2	5	5	2,37
94	6	710	LINHA C2	5	5	2,04
95	3	893	LINHA 300	2	8	4,26
96	3	480	LINHA 300	2	8	3,73
97	1	490	LINHA 300	1	6	3,34
98	1	297	LINHA 150	1	6	3,53
99	1	928	LINHA C2	8	8	4,01
100	1	370	LINHA 150	1	6	2,69
101	1	1378	LINHA C2	8	8	3,58
102	1	242	LINHA 150	1	6	3,53
103	1	270	LINHA 150	1	6	3,53
104	1	315	LINHA 150	1	6	3,53
105	1	254	LINHA 150	1	6	2,42
106	1	215	LINHA 300	1	6	2,13
107	3	850	LINHA 300	2	8	4,26
108	1	510	LINHA 300	1	6	3,69
109	1	230	LINHA 300	1	6	2,13
110	1	295	LINHA 150	1	5	2,69
111	1	280	LINHA 300	1	6	2,68

Tabela 14 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos

(continuação)

Item	Tipo de aço	Peso (kg)	Linha de moldagem	Tempo para movimentação (horas)	Tempo para desmoldagem (horas)	Área ocupada (m ²)
112	3	624	LINHA 300	1	6	3,73
113	1	261	LINHA 150	1	5	1,96
114	1	490	LINHA 150	1	6	3,53
115	6	560	LINHA C2	5	5	2,37
116	1	255	LINHA 301	1	6	1,32
117	1	108	LINHA 150	1	5	1,96
118	3	460	LINHA 300	2	8	4,26
119	3	430	LINHA 300	2	8	3,73
120	6	292	LINHA C2	5	5	2,37
121	6	360	LINHA C2	5	5	2,37
122	3	490	LINHA 300	1	6	3,73
123	3	394	LINHA 300	1	6	2,51
124	1	528	LINHA 300	1	8	2,47
125	3	613	LINHA 300	2	8	4,06
126	3	820	LINHA 300	2	8	4,26
127	4	1850	LINHA 301	12	48	11,32
128	4	1900	LINHA 301	12	48	11,32
129	1	157	LINHA 150	1	6	2,69
130	3	509	LINHA 300	1	6	3,73
131	12	308	LINHA C2	6	6	3,87
132	12	720	LINHA C2	6	6	3,43
133	3	1038	LINHA 300	2	8	4,26
134	6	960	LINHA C2	5	5	2,33
135	1	287,5	LINHA 150	1	5	2,42
136	3	865	LINHA 300	2	8	4,13
137	3	410	LINHA 300	2	8	4,06
138	6	672,76	LINHA C2	5	5	2,37
139	1	264	LINHA 150	1	6	3,53
140	6	290	LINHA 150	1	5	2,96
141	6	290	LINHA 150	1	5	2,96
142	3	550	LINHA 300	1	6	4,06
143	3	775	LINHA 300	2	8	3,73
144	12	376,8	LINHA C2	6	6	3,87
145	2	540	LINHA 150	2	24	3,53
146	1	229	LINHA 300	1	6	3,69
147	1	256	LINHA 150	1	5	3,53
148	1	323	LINHA 300	1	6	3,11

Tabela 15 – Tabela com parâmetros de fabricação dos fundidos

(conclusão)

Item	Tipo de aço	Peso (kg)	Linha de moldagem	Tempo para movimentação (horas)	Tempo para desmoldagem (horas)	Área ocupada (m²)
149	3	520	LINHA 300	1	6	3,73
150	3	485	LINHA 300	1	6	4,06
151	3	950	LINHA 300	2	8	4,12
152	5	4100	LINHA 301	12	48	5,48
153	4	3520	LINHA 301	20	70	11,32
154	4	3520	LINHA 301	20	70	11,32

Fonte: Empresa estudada (2022)

ANEXO F – TEMPO DE CICLO DE PROCESSOS

Tabela 16 – *Tap to tap* Aciaria

Data	Corridas	Média <i>tap to tap</i> (horas)
01/out	11	2,11
02/out	9	2,74
03/out	9	2,69
04/out	12	2
05/out	10	2,4
06/out	12	1,97
07/out	10	2,37
08/out	9	2,6
09/out	8	3,11
10/out	10	2,36
11/out	10	2,32
12/out	13	2,01
13/out	11	2,06
14/out	9	2,54
15/out	10	2,47
16/out	4	5,85
17/out	9	2,76
18/out	11	2,32
19/out	11	2,16
20/out	11	2,16
21/out	11	2,05
22/out	10	2,35
23/out	10	2,61
24/out	8	2,83
25/out	12	2,06
26/out	10	2,39
27/out	10	2,48
28/out	9	2,46
29/out	11	2,29
30/out	7	3,35
31/out	10	2,53

Fonte: Empresa estudada (2022)

Tabela 17 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 300

Data	Moldes produzidos	Horas trabalhadas	Moldes / hora	Tempo de ciclo (min)
26/set	77	21	3,7	16,4
27/set	83	21	4	15,2
28/set	82	21	3,9	15,4
29/set	92	21	4,4	13,7
30/set	82	21	3,9	15,4
01/out	74	21	3,5	17
02/out	78	21	3,7	16,2
03/out	78	21	3,7	16,2
04/out	80	21	3,8	15,8
05/out	89	21	4,2	14,2
06/out	67	21	3,2	18,8
07/out	83	21	4	15,2
08/out	85	21	4	14,8
09/out	86	21	4,1	14,7
10/out	85	21	4	14,8
11/out	95	21	4,5	13,3
12/out	90	21	4,3	14
13/out	95	21	4,5	13,3
14/out	91	21	4,3	13,8
15/out	85	21	4	14,8
16/out	44	21	2,1	28,6
17/out	71	21	3,4	17,7
18/out	86	21	4,1	14,7
19/out	86	21	4,1	14,7
20/out	73	21	3,5	17,3
21/out	81	21	3,9	15,6
22/out	79	21	3,8	15,9
23/out	74	21	3,5	17
24/out	88	21	4,2	14,3
25/out	75	21	3,6	16,8
26/out	83	21	4	15,2
27/out	66	21	3,1	19,1
28/out	83	21	4	15,2
29/out	76	21	3,6	16,6
30/out	76	21	3,6	16,6

Fonte: Empresa estudada (2022)

Tabela 18 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 150

Data	Moldes produzidos	Horas trabalhadas	Moldes / hora	Tempo de ciclo (min)
26/set	48	15	3,2	18,8
27/set	46	15	3,1	19,6
28/set	40	15	2,7	22,5
29/set	46	15	3,1	19,6
30/set	37	15	2,5	24,3
01/out	32	12	2,7	22,5
03/out	47	15	3,1	19,1
04/out	41	15	2,7	22
05/out	43	15	2,9	20,9
06/out	37	15	2,5	24,3
07/out	38	15	2,5	23,7
08/out	27	12	2,3	26,7
10/out	47	15	3,1	19,1
11/out	39	15	2,6	23,1
12/out	41	15	2,7	22
13/out	36	15	2,4	25
14/out	28	15	1,9	32,1
17/out	27	15	1,8	33,3
18/out	27	15	1,8	33,3
19/out	22	15	1,5	40,9
20/out	18	15	1,2	50
21/out	34	15	2,3	26,5
22/out	29	12	2,4	24,8
24/out	47	15	3,1	19,1
25/out	35	15	2,3	25,7
26/out	31	15	2,1	29
27/out	28	15	1,9	32,1
28/out	38	15	2,5	23,7
29/out	27	12	2,3	26,7

Fonte: Empresa estudada (2022)

Tabela 19 – Tempo de ciclo para a produção de moldes na Linha 301

Data	Moldes produzidos	Horas trabalhadas	Moldes / hora	Tempo de ciclo (min)
26/set	6	15	0,4	150
27/set	7	15	0,5	128,6
28/set	3	15	0,2	300
29/set	9	15	0,6	100
30/set	3	12	0,3	240
01/out	2	15	0,1	450
03/out	6	15	0,4	150
04/out	6	15	0,4	150
05/out	6	15	0,4	150
06/out	8	15	0,5	112,5
07/out	11	12	0,9	65,5
08/out	4	15	0,3	225
10/out	6	15	0,4	150
11/out	6	15	0,4	150
12/out	7	15	0,5	128,6
13/out	5	15	0,3	180
14/out	4	12	0,3	180
17/out	4	15	0,3	225
18/out	6	15	0,4	150
19/out	2	15	0,1	450
20/out	5	15	0,3	180
21/out	5	12	0,4	144
22/out	5	15	0,3	180
24/out	6	15	0,4	150
25/out	8	15	0,5	112,5
26/out	7	15	0,5	128,6
27/out	8	15	0,5	112,5
28/out	7	12	0,6	102,9
29/out	4	15	0,3	225

Fonte: Empresa estudada (2022)

Tabela 20 – Tempo de ciclo de desmoldagem no Sistema S1

Data	Moldes desmoldados	Horas trabalhadas	Moldes / hora	Tempo de ciclo (min)
01/out	97	21,25	4,6	13,1
02/out	70	21,25	3,3	18,2
03/out	82	21,25	3,9	15,5
04/out	59	21,25	2,8	21,6
05/out	81	21,25	3,8	15,7
06/out	70	21,25	3,3	18,2
07/out	89	21,25	4,2	14,3
08/out	31	21,25	1,5	41,1
09/out	107	21,25	5	11,9
10/out	109	21,25	5,1	11,7
11/out	80	21,25	3,8	15,9
12/out	70	21,25	3,3	18,2
13/out	78	21,25	3,7	16,3
14/out	42	21,25	2	30,4
15/out	114	21,25	5,4	11,2
16/out	66	21,25	3,1	19,3
17/out	54	21,25	2,5	23,6
18/out	65	21,25	3,1	19,6
19/out	82	21,25	3,9	15,5
20/out	67	21,25	3,2	19
21/out	25	21,25	1,2	51
22/out	106	21,25	5	12
23/out	51	21,25	2,4	25
24/out	94	21,25	4,4	13,6
25/out	43,5	21,25	2	29,3
26/out	43	21,25	2	29,7
27/out	76	21,25	3,6	16,8
28/out	86	21,25	4	14,8
29/out	70	21,25	3,3	18,2
30/out	77	21,25	3,6	16,6
31/out	86	21,25	4	14,8

Fonte: Empresa estudada (2022)