

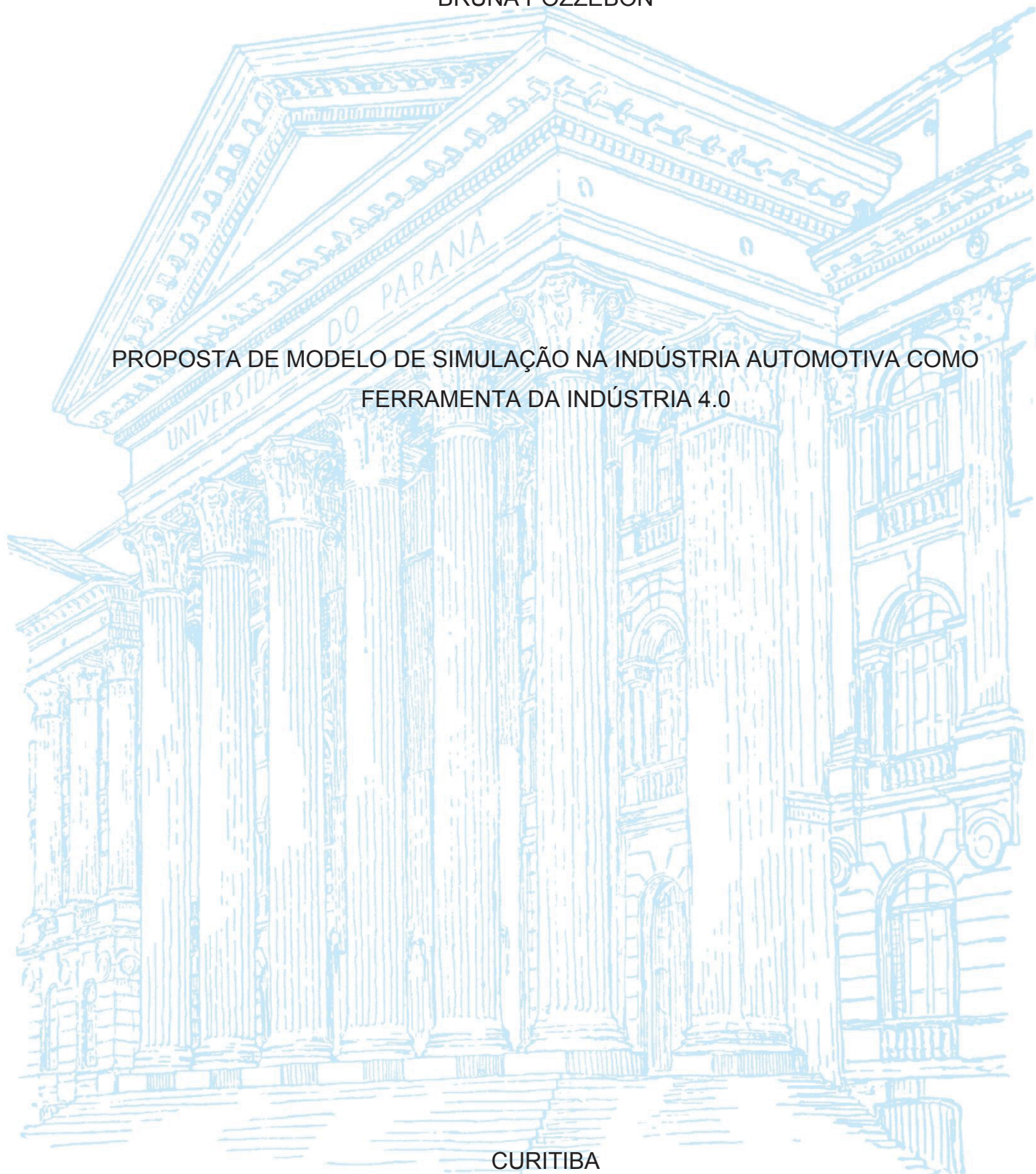
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA POZZEBON

PROPOSTA DE MODELO DE SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA COMO
FERRAMENTA DA INDÚSTRIA 4.0

CURITIBA

2020



BRUNA POZZEBON

PROPOSTA DE MODELO DE SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA COMO
FERRAMENTA DA INDÚSTRIA 4.0

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P893p Pozzebon, Bruna
Proposta de modelo de simulação na indústria automotiva como
ferramenta da indústria 4.0 [recurso eletrônico] / Bruna Pozzebon –
Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch

1. Métodos de simulação. 2. Inovação tecnológica (Indústria 4.0). 3.
Flow shop (Modelo linha de produção). I. Universidade Federal do
Paraná. II. Loch, Gustavo Valentim. III. Título.

CDD: 658.56

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BRUNA POZZEBON** intitulada: **PROPOSTA DE MODELO DE SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA COMO FERRAMENTA DA INDÚSTRIA 4.0**, sob orientação do Prof. Dr. GUSTAVO VALENTIM LOCH, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Agosto de 2020.

Assinatura Eletrônica
31/08/2020 20:53:15.0
GUSTAVO VALENTIM LOCH
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
31/08/2020 22:04:07.0
FERNANDO DESCHAMPS
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/08/2020 19:58:39.0
EDUARDO ALVES PORTELA SANTOS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/08/2020 20:32:17.0
CASSIUS TADEU SCARPIN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Sou grata pela confiança depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor Gustavo, orientador do meu trabalho. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo.

Aos professores e membros do Gtao pelo apoio e conselhos ao longo destes anos de convívio.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

A todos os amigos, especialmente Aline, Vinicius, Andressa, Suellen e Tayse, meu muito obrigado. Vocês foram fundamentais para minha formação, por isso merecem o meu eterno agradecimento

A UFPR e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

A Fundação Araucária pelo auxílio financeiro durante meu mestrado.

A Renault e meus colegas de trabalho pela confiança depositada.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Desde as primeiras simulações computacionais na década de 1950, muito se aperfeiçoou tanto pelo aspecto de capacidade computacional como pelas linguagens de programação. Mais recentemente, em 2011, ocorreu a introdução do conceito de Indústria 4.0, sendo a simulação descrita como uma importante ferramenta da manufatura. Por meio dela pode-se avaliar medidas de desempenho e otimizar a produção e a qualidade do produto, sem a necessidade de testes no processo produtivo. A presente dissertação apresenta uma metodologia de criação de um simulador através da linguagem de programação *c#* aplicado em uma indústria automotiva. Mais especificamente, foi utilizada como base uma linha de produção do centro de usinagem configurada como *Flow shop* flexível. Nesta linha grande parte dos processos são automatizados e cada etapa possui inspeções de qualidade, manutenções preventivas e um operador responsável. A otimização do processo se dá por meio de propostas de melhoria de processo para minimizar o tempo de máquinas paradas. Os experimentos foram realizados de forma offline com o intuito de identificar os potenciais ganhos com a ferramenta, onde foi simulado o impacto de cada modelo produzido assim como as paradas não programadas. Ao final do trabalho é identificado os benefícios da adoção da linguagem de programação, assim como é traçado uma estratégia para a implementação online para o auxílio da tomada de decisão quanto a alocação da mão de obra. Destaca-se que foi o primeiro grande projeto de simulação desenvolvido no processo estudado e os ganhos observados podem ser utilizados como justificativa para a utilização dessa ferramenta poderosa na implantação de conceitos da indústria 4.0 tanto na fábrica do estudo realizado como em outras.

Palavras-chave: Simulação de eventos discretos. Indústria 4.0. Otimização. *Flow shop* flexível. Gêmeo Digital

ABSTRACT

Since the first computational simulations in the 1950s, much has been improved both in terms of computational capacity and programming languages. More recently, in 2011, the concept of Industry 4.0 was introduced, with simulation being described as an important manufacturing tool. Through it, you can evaluate performance measures and optimize production and product quality, without the need for tests in the production process. The present dissertation presents a methodology for creating a simulator using the C # programming language applied in an automotive industry. More specifically, a machining center production line configured as a flexible Flow shop. In this line most of the processes are automated and each stage has quality inspections, preventive maintenance, and a responsible operator. The optimization of the process takes place through proposals for process improvement to minimize downtime. The experiments were carried out offline in order to identify the potential gains with the simulator, where the impact of each model produced was simulated as well as the unscheduled stops. At the end of the work, the benefits of adopting the programming language are identified, as well as a strategy for online implementation is outlined to assist decision making regarding the allocation of labor. It is noteworthy that it was the first major simulation project developed in the studied process and the observed gains can be used as a justification for the use of this powerful tool in the implementation of industry 4.0 concepts, both in the study factory and in others.

Keywords: Simulation. Industry 4.0. Optimization. Flexible Flow shop. Digital Twin

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXO DO CENTRO DE USINAGEM CU05	18
FIGURA 2 – CENTRO DE USINAGEM.....	19
FIGURA 3 – ETAPAS DE PROCESSAMENTO DA LINHA PRODUTIVA.....	21
FIGURA 4 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO DOS PORTAIS	23
FIGURA 5 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO DA LAVADORA	24
FIGURA 6 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO OPERAÇÃO 310	25
FIGURA 7 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO OPERAÇÃO 320 E 340	26
FIGURA 8 – ESQUEMA BUFFERS ESPECIAIS	29
FIGURA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	44
FIGURA 10 – AVANÇO DO TEMPO DO PRÓXIMO EVENTO.....	45
FIGURA 11 – PSEUDOCÓDIGO SIMULADOR.....	51
FIGURA 12 – PSEUDOCÓDIGO PARADA DE MÁQUINA.....	52
FIGURA 13 – PSEUDOCÓDIGO OPERADORES/CONDUTORES.....	53
FIGURA 14 – PSEUDOCÓDIGO ATUALIZAR PRIORIDADES.....	53
FIGURA 15 – METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO	54
FIGURA 16 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (LOTE PADRÃO)	64
FIGURA 17 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (LOTE PADRÃO ESPECIAL).....	65
FIGURA 18 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 1)	66
FIGURA 19 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 1 ESPECIAL).....	67
FIGURA 20 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 2)	68
FIGURA 21 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 2 ESPECIAL).....	69
FIGURA 22 – PRODUTIVIDADE SEMANAL SEM PANE E MANUTENÇÃO	70
FIGURA 23 – TEMPO DE ATRAVESSAMENTO SEM PANE E MANUTENÇÃO.....	72
FIGURA 24 – PRODUTIVIDADE COM PANES	74
FIGURA 25 – TEMPO DE ATRAVESSAMENTO COM PANES	75
FIGURA 26 – PSEUDOCÓDIGO MÁQUINAS NORMAIS	86
FIGURA 27 – PSEUDOCÓDIGO OPERAÇÕES MANUAIS	87
FIGURA 28 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 1	88
FIGURA 29 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 2	88
FIGURA 30 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 3	89
FIGURA 31 – PSEUDOCÓDIGO 3D.....	90
FIGURA 32 – PSEUDOCÓDIGO VER SE TEM ALGO MAIS IMPORTANTE.....	90

FIGURA 33 – PSEUDOCÓDIGO TENTAR ALOCAR	91
FIGURA 34 – PSEUDOCÓDIGO ALOCAR MÃO DE OBRA	91
FIGURA 35 – PANE S1.....	93
FIGURA 36 – PANE S2.....	94
FIGURA 37 – PANE S3.....	95
FIGURA 38 – PANE S1 COMPLETA.....	96
FIGURA 39 – PANE S2 COMPLETA.....	97
FIGURA 40 – PANE S3 COMPLETA.....	98

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – LÓGICA OP 320 E OP 340.....	27
QUADRO 2 – POSSÍVEIS ATIVIDADES DOS OPERADORES, CONDUTORES E TÉCNICOS.....	30
QUADRO 3 – INSTÂNCIAS SIMULADAS.....	61
QUADRO 4 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS PANES	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO	17
2.1	TIPOS DE FLUXO	17
2.1.1	Fluxos externos	18
2.1.2	Fluxos internos	18
2.2	OPERAÇÕES.....	20
2.2.1	Operação manual	22
2.2.2	Descrição do fluxo das Máquinas múltiplas.....	22
2.3	OPERAÇÕES ESPECIAIS	23
2.3.1	Descrição do fluxo de Lavadoras.....	24
2.3.2	Descrição do fluxo da Operação 100.....	24
2.3.3	Descrição do fluxo da Operação 310.....	25
2.3.4	Descrição do fluxo das Operações 320 e 340	26
2.3.5	Descrição do fluxo da Operação 515.....	27
2.3.6	Descrição do fluxo da Operação 570.....	28
2.3.7	Descrição do fluxo da Operação 600.....	28
2.3.8	Descrição do fluxo da Operação 720.....	28
2.3.9	Descrição do fluxo da Operação 800.....	29
2.3.10	Descrição do fluxo da Buffers especiais	29
2.3.11	Descrição do fluxo da Inspeção tridimensional.....	30
2.4	MÃO DE OBRA	30
2.5	DESCRIÇÃO DOS EVENTOS DE PARADA DE MÁQUINA	31
2.5.1	Manutenção preventiva	31
2.5.2	Panes	32
2.5.3	Troca de ferramenta	32
2.6	A IMPORTÂNCIA DO NÍVEL DE DETALHES NA SIMULAÇÃO	32

3	REVISÃO DE LITERATURA.....	33
3.1	INDÚSTRIA 4.0	33
3.2	AMBIENTES FABRIS E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	34
3.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	37
3.4	OTIMIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO	40
4	METODOLOGIA.....	43
4.1	MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO	43
4.1.1	Ferramenta e linguagem de simulação adotada.....	44
4.1.2	Avanço de tempo simulado	45
4.1.3	Coleta de dados.....	46
4.1.4	Eventos nas simulações	48
4.1.5	Adaptações do modelo	50
4.1.6	Funcionamento do simulador	50
4.2	MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	54
4.2.1	Formulação do problema e planejamento do estudo.....	55
4.2.2	Coleta de dados e definição do modelo.....	55
4.2.3	Construção do modelo de simulação.....	56
4.2.4	Verificação do modelo de simulação	57
4.2.5	Validação do modelo de simulação	57
4.2.6	Experimentos.....	58
4.2.7	Análise de resultados	59
4.2.8	Documentação e implementação	59
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60
5.1	SIMULAÇÕES SEM PANES E MANUTENÇÃO.....	62
5.1.1	Análise sobre o tempo de máquina parada	62
5.1.2	Comparação da produtividade das simulações	70
5.1.3	Tempo de atravessamento	71
5.2	PANES	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS.....	81
	GLOSSÁRIO	85
	APÊNDICE 1 – PSEUDOCÓDIGOS	86
	APÊNDICE 2 – PANES.....	92

1 INTRODUÇÃO

A simulação computacional de eventos discretos é uma técnica que possuiu diversas aplicações, onde é possível representar a realidade com investimentos financeiros geralmente bem menores do que a simulação física ou experimentação no sistema. Tal ferramenta possui relevância na manufatura, principalmente com o contexto da chamada Quarta Revolução Industrial – a Indústria 4.0 – possibilitando verificar impactos das alterações na linha de produção sem a necessidade de perturbações no processo produtivo. Desta forma, a utilização da simulação computacional tem o potencial de permitir melhores desempenhos assim como uma maior competitividade frente ao amplo mercado.

Para a indústria chegar neste patamar foram necessárias algumas transformações ao longo da história. Antes do século XVIII a manufatura era artesanal e grande parte agrícola. Entretanto, com as Revoluções Industriais nos últimos três séculos, a tecnologia e a organização da produção foram revolucionadas, aumentando a produção de bens e a produção individual do trabalhador (STEARNS 2012).

A Primeira Revolução Industrial iniciou em 1776 com a criação da máquina a vapor na Inglaterra, o que impulsionou a mecanização das tarefas e por consequência as primeiras fábricas (CORRÊA e CORRÊA 2010). Outro aspecto importante foi a indústria de algodão na década de 1840, com resultados maciços de produção e de alcance mundial (STEARNS 2012).

Na década de 1870, começou a Segunda Revolução Industrial com inovações no setor metalúrgico e surgimento das primeiras usinas de aço. Na década de 1900 foi criada a administração científica por Frederick Taylor, o lançamento do “Modelo T” por Henry Ford e a criação da linha de montagem. Nos anos 20, a GE se favoreceu com a política de flexibilização da produção e do aumento do poder aquisitivo dos americanos. Em 1939, com o início da 2ª guerra mundial, a atenção foi maior para áreas de logística, qualidade e métodos de produção mais eficientes, iniciando-se aí a Pesquisa Operacional (CORRÊA e CORRÊA 2010).

A Terceira Revolução Industrial, segundo Stearns (2012), iniciou-se após a 2ª Guerra Mundial a partir da década de 1960 com o Japão como segunda maior economia mundial por conta do Toyotismo. Nesta revolução houve avanços consideráveis na robótica, computação, energias renováveis e novas maneiras de

produção como a impressora 3D. O autor fala sobre os efeitos da guerra mundialmente, em que predominaram crises econômicas e o Japão se sobressaiu ao se recuperar mais rapidamente. Além disso países que antes não eram industrializados como a China, o Brasil e a Índia começaram a se desenvolver. Depois disso a globalização ficou dominante tanto na indústria como na economia mundial.

Segundo Kagermann et al. (2013) e Gilchrist (2016), a Indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial foi criada em 2011 por uma iniciativa do governo alemão com universidades e empresas privadas com o objetivo de aumentar a produtividade e a eficiência da indústria nacional. Neste período surgiu a Internet das Coisas e a Internet dos serviços integrada ao ambiente de produção. A partir desta visão, as empresas Industriais construirão redes globais para conectar suas máquinas, fábricas e instalações de armazenamento como sistemas ciberfísicos, que se conectarão e se controlarão de maneira inteligente, compartilhando informações que acionam ações.

Gilchrist (2016) descreve que a Indústria 4.0 foi possível devido ao aumento exponencial no volume de dados e armazenamento em nuvem, assim como no avanço de recursos de análise, criação de interfaces homem-máquina e na melhoria da robótica. Estas tecnologias aliadas a metodologia 4.0 buscam uma maior competitividade, produtividade, receita, aumento de oportunidades de emprego, otimização de processos de fabricação, desenvolvimento de tecnologias exponenciais e entrega de melhor atendimento ao cliente.

Para que estes objetivos sejam atingidos, a indústria 4.0 traz como princípios a interoperabilidade, a virtualização, a descentralização, a capacidade de tempo real, a orientação de serviço e a modularidade. Os meios de obtenção da excelência na aplicação destes princípios são: Tratamentos Estatísticos e de Inteligência Artificial em *Big Data*, robôs autônomos, simulação, integração horizontal e vertical do sistema, a internet das coisas, *Cyber-security*, armazenamento de dados em nuvem, fabricação aditiva e realidade aumentada.

Dalenogare et al. (2018) discutiram a implementação da Indústria 4.0 no Brasil. Os autores verificaram que algumas tecnologias estão positivamente associadas aos benefícios esperados, enquanto outras ainda estão em estágio inicial de implementação, sem benefícios esperados claros. Além disso, a indústria brasileira ainda não se aproveitou de algumas tecnologias promissoras, como análise de *Big Data* e serviços em nuvem para manufatura.

Uma das ferramentas discutidas dentro da Indústria 4.0 é o *Digital twin* (Gêmeo Digital), que Fraga-Lamas; Fernandez-Carames (2019) definem como uma representação digital de um ativo físico, a fim de monitorar seu estado atual e recriar seu passado e futuro. A aplicabilidade de tal ferramenta pode ser para planejar a movimentação tridimensional de máquinas (WEYER et al. 2016), atualizar a programação da produção de maneira online (UHLEMANN et al. 2017), identificar ajustes necessários em ferramentas devido desgaste (ROY et al. 2020), garantia de matéria prima na produção (SANTOS et al. 2020), entre outras.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Indústria 4.0 é um assunto recente, visto que as primeiras publicações sobre o assunto datam de 2013 (MUHURI et al. 2019). Entretanto, vale ressaltar que diversas das técnicas descritas na indústria 4.0 já estão presentes há anos na literatura, sendo a simulação uma delas. Um aspecto importante da utilização de técnicas já “consagradas” em conceitos “modernos” é a existência de boa fundamentação e conhecimento sobre o assunto. O que difere basicamente a simulação realizada dentro dos conceitos de indústria 4.0 das realizadas em décadas passadas é a maior disponibilidade e confiabilidade dos dados, assim como o maior poder computacional que permite respostas em intervalos mais curtos de tempo.

A Utilização de ferramentas como a Simulação aliada a Indústria 4.0, ocorre por meio da duplicação do sistema para um modelo computacional, onde é possível avaliar diferentes cenários e otimizar a produção e a qualidade do produto. Sem a aplicação da simulação, as mudanças podem acarretar prejuízo como perda na produção (GILCHIST 2016).

Com isto em consideração, juntamente com a oportunidade de realizar um trabalho aplicado em uma grande indústria automotiva, decidiu-se aplicar a simulação para otimizar os níveis de estoques e fluxos de uma das linhas da fábrica visando utilizar os conceitos da Indústria 4.0.

Além disto, o estudo apresentado nesta dissertação pode ser replicado, utilizando tanto a parte metodológica de desenvolvimento do modelo de simulação, quando a adequação do modelo de simulação em outros ambientes fabris se ele possuir características semelhantes.

1.2 OBJETIVOS

Na presente seção é apresentado o objetivo geral desta dissertação, assim como os objetivos específicos para atingi-lo.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um simulador computacional a partir de linguagem de programação para viabilizar a utilização de simulação, no contexto da Indústria 4.0, em ambientes do tipo *Flow Shop* Flexível.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Definir um ambiente de exemplo para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional;
- b) Desenvolver o modelo de simulação computacional de forma que o mesmo possa ser adaptado para outros processos de *Flow Shop* Flexível;
- c) Identificar cenários de interesse a serem simulados no ambiente definido como exemplo;
- d) Identificar os parâmetros que melhor representam a real situação do objeto do estudo;
- e) Analisar os cenários de interesse simulados;
- f) Identificar o que é necessário para proporcionar que o modelo seja utilizado como gêmeo digital.
- g) Descrever o potencial da aplicação da simulação na linha de produção estudada como ferramenta da Indústria 4.0.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Para uma melhor avaliação da ferramenta desenvolvida para aplicação na Indústria 4.0 seriam necessários mais dados com relação às paradas de máquinas, o que acabou limitando a estimativa dos ganhos. Mas de qualquer forma é possível verificar o potencial da ferramenta, que pode ser ajustada para o formado online com

alguns ajustes uma vez que seja possível extrair mais dados com relação às paradas de máquina.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, Descrição do problema, é explicado o funcionamento da fábrica do estudo de caso, detalhes e problemáticas do centro de usinagem onde foi desenvolvido do modelo de simulação.

No capítulo 3, Revisão de literatura, é realizado uma breve revisão de literatura quanto ao tema da dissertação. É apresentado uma contextualização da Indústria 4.0 e onde a simulação está inserida. Também é apresentado uma contextualização de ambientes fabris para melhor compreensão das aplicações descritas neste capítulo. Depois é apresentado a evolução da simulação computacional. Finalizando com uma explicação sobre otimização relacionada com simulação.

No Capítulo 4, Metodologia, é descrito a metodologia de desenvolvimento e características do modelo de simulação proposto. Primeiramente é apresentado o enquadramento do modelo de simulação desenvolvido, seguido pela coleta de dados realizada, funcionamento do modelo de simulação e finalizando com o passo a passo da metodologia adotada.

No Capítulo 5, Análise dos resultados, são apresentados os principais resultados das simulações juntamente com algumas análises e sugestões.

Na Conclusão é realizado uma retomada dos assuntos tratados na dissertação junto com um fechamento sobre o tema. Também há uma análise geral com as considerações do simulador desenvolvido e uma sugestão quanto forma de implementar a ferramenta online para as tomadas de decisão.

No Glossário há a definição de alguns termos do modelo de simulação.

No Apêndice 1 há alguns pseudocódigos do modelo de simulação.

Por último, no Apêndice 2 há um detalhamento das panes utilizadas em algumas simulações da seção 5.2.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO

A presente dissertação utiliza, a fim de analisar e aplicar o modelo proposto, uma linha produtiva de uma fábrica localizada no estado do Paraná. Esta fábrica possui processos de usinagem de peças fundidas¹ ou injetadas² e montagem de itens de tecnologia. Por conta do modelo proposto escolheu-se uma das linhas de centros de usinagem.

Considerando a parte produtiva da fábrica, devido à complexibilidade da cadeia de processos e o alto volume de produção, restringiu-se o estudo a apenas um dos centros de usinagem. Esta linha de produção possui três turnos e usina três modelos de uma mesma classificação de produtos (nesta dissertação chamados de Modelo 1, 2A e 2B), que podem ter como destino as linhas de montagem da fábrica ou exportação.

Um grande desafio no desenvolvimento de projetos de simulação está no pleno entendimento de como o sistema funciona. Assim, o presente capítulo tem o objetivo de não apenas descrever o fluxo estudado, mas também ressaltar o nível de detalhe e conhecimentos do processo que são necessários de serem conhecidos para que o modelo de simulação tenha êxito em representar o sistema.

2.1 TIPOS DE FLUXO

No centro de usinagem utilizado como base tem-se os fluxos externos, internos e secundários. Consideram-se externos os fluxos de abastecimento e saída da linha. Já os fluxos internos representam a movimentação do produto entre as operações. O fluxo secundário está diretamente relacionado à qualidade dos produtos por meio das inspeções visuais e tridimensionais³.

¹ Fundição: Moynihan (2000) explica fundição como um despejamento de metal em um molde e permitindo a solidificação. Este molde precisa ser de um material que possa suportar o calor do fundido (em estado líquido) e manter sua forma por tempo suficiente para o material solidificar. Para materiais ferrosos, normalmente se utiliza a areia de sílica porque é barata.

² Injeção de metal: Segundo Nayak et al. (2018), a injeção traz baixo custo em grandes volumes, com boa tolerância dimensional e formas complexas com boas propriedades mecânicas. Para o processo primeiramente se mistura inicial do pó de metal fino com aglutinantes, aplicando pressão e calor à matéria-prima a partir da forma da cavidade do molde, depois é retirada as rebarbas, e finalmente a peça é sinterizada para atingir as propriedades mecânicas desejadas.

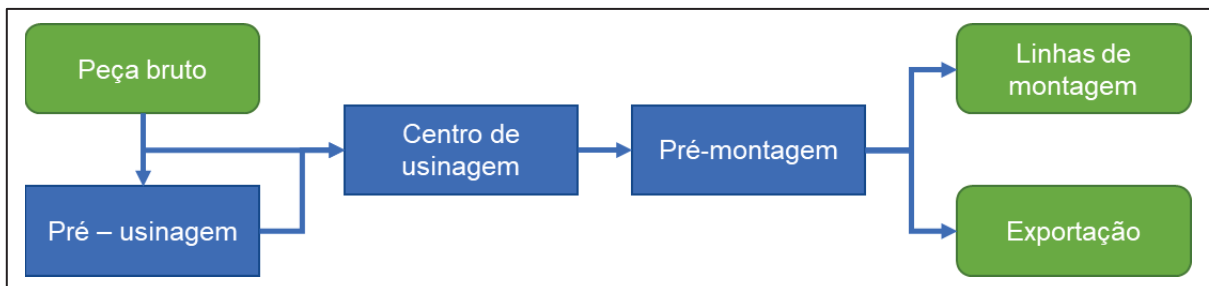
³ Inspeção tridimensional: descrição no capítulo 2.3.11.

2.1.1 Fluxos externos

Nos centros de usinagem a matéria prima fundida ou injetada entra na fábrica através de uma doca⁴, enquanto as demais peças utilizadas no processo são armazenadas por um almoxarifado central. Conforme é necessário, a matéria prima é deslocada para as entradas dos centros de usinagem.

No centro de usinagem sendo estudado há uma etapa adicional para um dos modelos, a pré-usinagem, que é realizada antes da respectiva entrada na linha produtiva por conta de adaptações que foram necessárias para a inserção deste novo modelo conforme a FIGURA 1.

FIGURA 1 – FLUXO DO CENTRO DE USINAGEM CU05



FONTE: A autora (2020).

Após o processamento dos itens no centro de usinagem, eles são movimentados para um estoque intermediário para futura pré-montagem, para finalmente armazenagem final antes do consumo deles nas linhas de montagem ou exportação. A diferenciação dos modelos de consumo local e exportados se dá na pré-montagem devido à diferente composição de peças inseridas no produto.

2.1.2 Fluxos internos

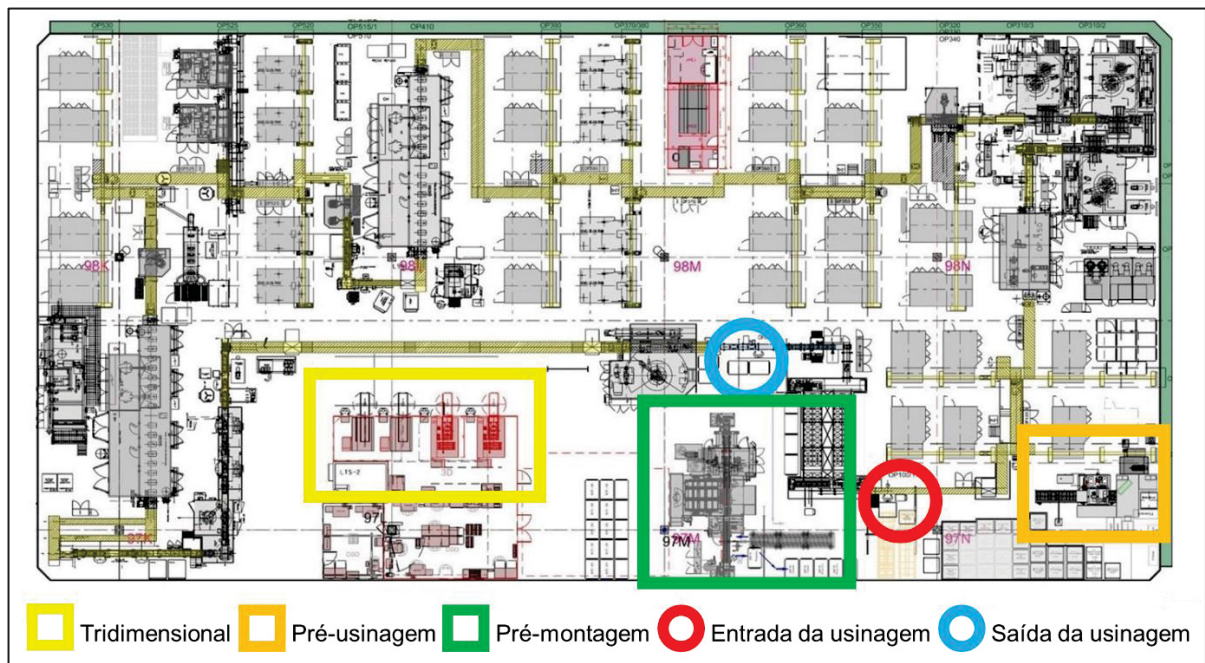
A FIGURA 2 exibe em mais detalhes o Layout do centro de usinagem. Onde se verifica a disposição das máquinas no processo de usinagem e a forma em que as operações e máquinas estão interligadas. Como todos os modelos são processados

⁴ Doca: local onde fica armazenado as matérias primas para a usinagem

em todas as operações e na mesma ordem o centro de usinagem é classificada como um processo produtivo *Flow Shop* Flexível.

As interligações estão presentes de duas formas, a primeira é realizada por meio de esteiras e a segunda são por portais lineares. As esteiras que movimentam as peças entre as operações do processo em velocidade constante, são mostradas na FIGURA 2 com a coloração marrom claro. Enquanto os portais movimentam os produtos entre as máquinas paralelas, realizando a movimentação as peças do buffer para as máquinas e das máquinas para o buffer da operação seguinte.

FIGURA 2 – CENTRO DE USINAGEM



FONTE: A autora (2020).

Para a movimentação dos itens na linha produtiva, cada item é fixado em um adaptador. Na linha produtiva estudada há dois tipos de adaptadores, sendo que dois modelos produzidos podem compartilhar o mesmo tipo (Modelo 2A e 2B).

Também há fluxo interno secundário quando há a necessidade de inspeções, onde as máquinas segregam itens para os condutores realizarem as inspeções. Esta inspeção pode ser visual ou tridimensional: a inspeção visual é realizada nas proximidades da operação, enquanto na tridimensional o condutor move a peça para a região das máquinas tridimensionais.

O layout do processo de usinagem não é favorável para a movimentação de pessoas na linha devido às diversas barreiras que impedem o deslocamento dos operadores e condutores. Isto ocorre porque na época em que a linha foi concebida a principal preocupação era ocupar a menor área possível, deixando em segundo plano os desperdícios de movimentação e deslocamento.

2.2 OPERAÇÕES

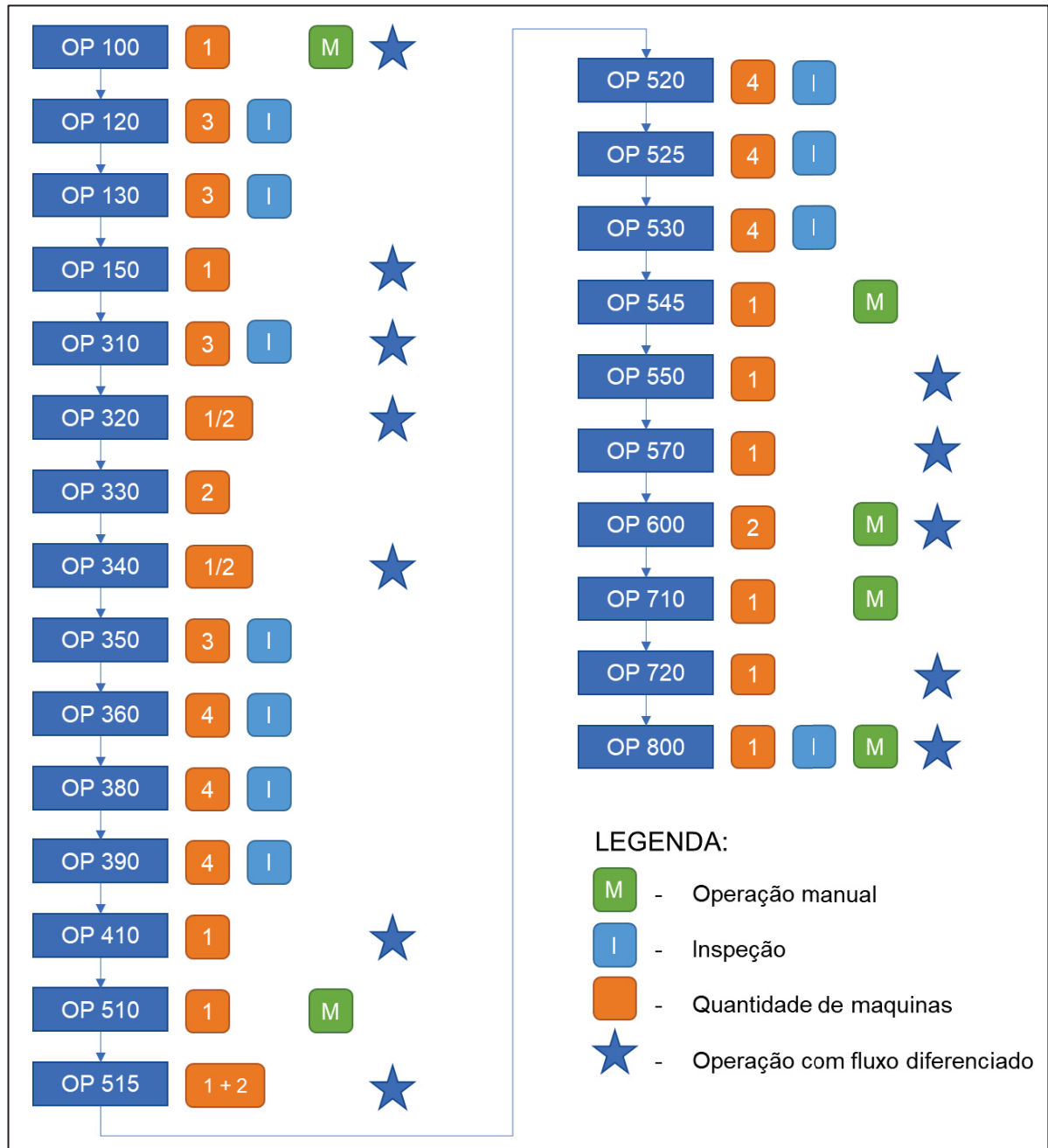
O centro de usinagem consiste em um aglomerado de operações que podem ser manuais ou através de máquina. As máquinas exercem funções como fresamento⁵, prensa, furação, parafusamento e lavação. Como o tempo de ciclo das operações são diferentes, durante a concepção da linha produtiva, algumas operações receberam máquinas múltiplas (conforme a FIGURA 3) a fim de balancear a linha produtiva e o tempo de ciclo de acordo com o volume de produção prevista pelo projeto. Além disto, as máquinas e/ou operações podem ficar sem operação em decorrência de panes⁶, troca de ferramenta, manutenções preventivas, falta de peça ou saturação.

Na FIGURA 3 é apresentada características relacionadas a cada operação: a quantidade de máquinas a operação possui; se é realizada alguma inspeção; se a operação é manual e/ou se possui um fluxo diferenciado (ver seção 2.3 - Operações especiais). Como por exemplo, a Operação 800 (OP 800) é composta por uma máquina, com a presença de um operador para realizar a operação, possui inspeção de qualidade e apresenta um fluxo diferenciado. As Operações 320 e 340 apresentam o número de 0,5 máquinas pois a mesma máquina é compartilhada por ambas as operações, enquanto a Operação 515 apresenta 3 máquinas, mas com funções diferentes.

⁵ Fresa: Para Kar et al. (2020), o processo de fresamento consiste no acabamento de superfície de trabalho a partir do desbaste com uma ferramenta de corte de movimento circular.

⁶ Panes: Paradas de máquina devido algum mal funcionamento, que impede a produção na mesma. Este mal funcionamento pode ser quebra de ferramenta, colisão dos mais variados tipos, problema no software da máquina...

FIGURA 3 – ETAPAS DE PROCESSAMENTO DA LINHA PRODUTIVA



FONTE: A autora (2020).

Além das operações há outros processos na linha, sendo estes: inspeção visual, inspeção tridimensional⁷ e troca frequencial de ferramentas. As inspeções têm como função garantir a qualidade dos itens usinados. Já a troca frequencial de

⁷ Inspeção tridimensional: Na inspeção tridimensional é realizada a medição dos itens para a aferição dos aspectos dimensionais referente ao tamanho, à forma e a posição. Esta medição é necessária para garantir a qualidade das peças.

ferramentas é com base no respectivo do tempo de vida a fim de garantir um bom processamento.

Para saber quando e qual cabeçote será inspecionado, cada máquina possui um contador para cada modelo produzido, que quando atinge o valor da amostragem da inspeção visual a peça é separada para a inspeção e o contador é zerado. Já a inspeção tridimensional é conforme agendamento semanal, onde conforme necessário é realizada uma requisição para a separação do modelo desejado na máquina desejada.

Independentemente se é ou não encontrado algum defeito durante a inspeção, a peça segue o fluxo da usinagem. Mas caso seja encontrado algum defeito, a peça é segregada na última operação e, dependendo do defeito apresentado, a peça pode ser retrabalhada ou já é separada para descarte.

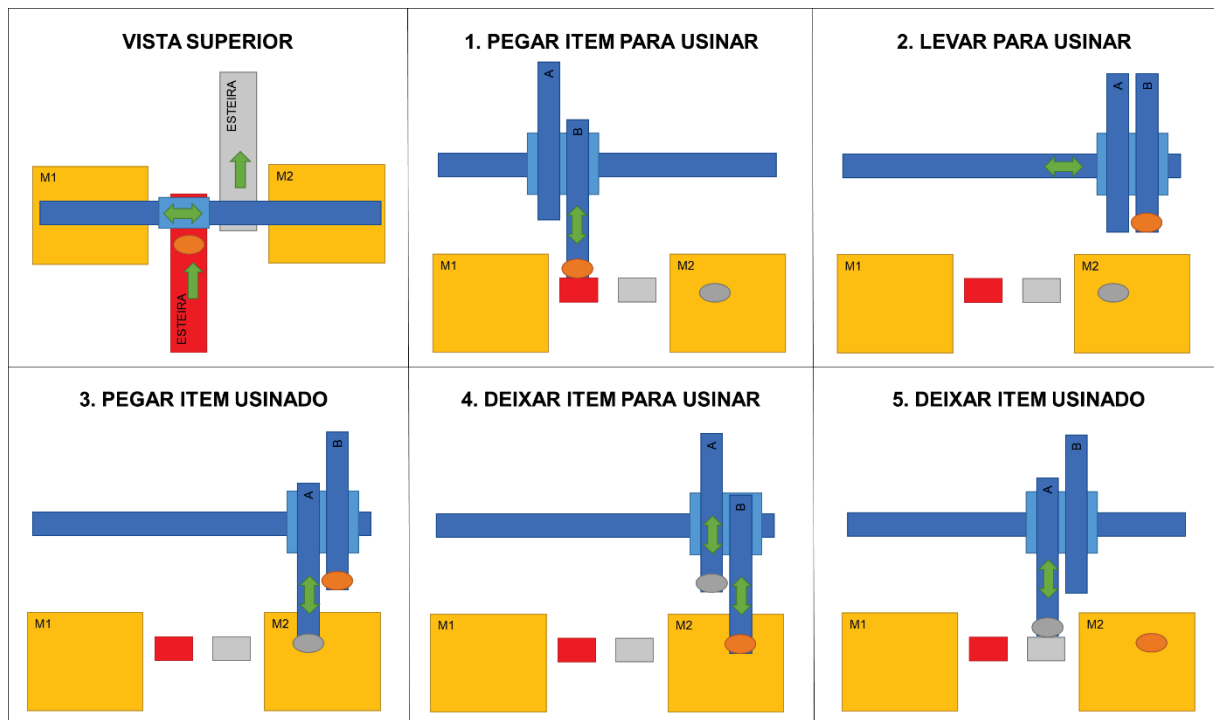
2.2.1 Operação manual

Considera-se operação manual normal aquela que não possui uma máquina envolvida no processo e não possui abastecimento ou desabastecimento. Com isso a operação consiste exclusivamente no ato de processar a peça por parte do operador e realizar a liberação da peça para a próxima operação.

2.2.2 Descrição do fluxo das Máquinas múltiplas

É considerada na linha de produção estudada durante esta dissertação uma operação de máquinas múltiplas aquela com duas ou mais máquinas e com a presença de portal para a realização das movimentações na operação. Um quesito a ser considerado quando há esta configuração é a possibilidade de alteração da habilitação das máquinas, em uma ou mais das máquinas múltiplas fica(m) impedida(s) de processar um ou mais modelos.

FIGURA 4 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO DOS PORTAIS



FONTE: A autora (2020).

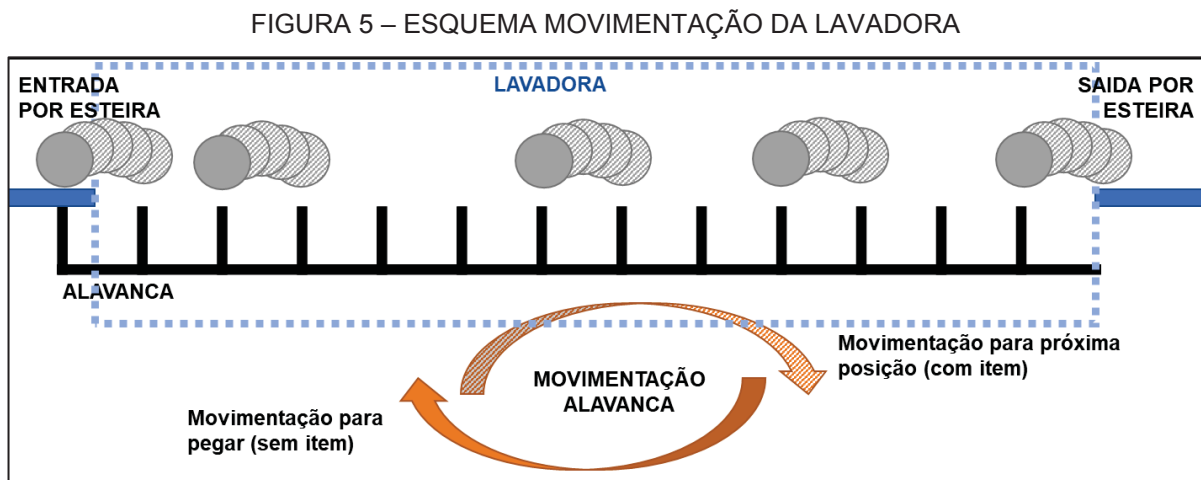
A lógica de movimentação dos portais é representada na FIGURA 4 em que pega-se a peça disponível no final do buffer antes da operação na etapa 1, movimentar-se até a máquina que finalizou a operação na etapa 2 e pega-se a peça dentro da máquina na etapa 3, insere-se na máquina para a realização do processo na etapa 4 e depois coloca-se a peça já processada no início do buffer da operação seguinte ou no local de inspeção caso necessário, na etapa 5. A movimentação descrita pode ser parcial caso a máquina esteja vazia ou seja realizada somente a operação de retirada da máquina.

2.3 OPERAÇÕES ESPECIAIS

São operações especiais aquelas que tem características próprias e particularidades. No processo estudado tem-se 13 operações especiais: cinco operações manuais e oito operações por meio de máquinas. As operações manuais são as operações 100, 570, 600, 720 e 800. Já as outras são as lavadoras (operação 150, 410 e 550) e as operações 310, 320, 340, 515 e 720. Além destas operações, a inspeção tridimensional pode ser classificada como operação especial.

2.3.1 Descrição do fluxo de Lavadoras

As lavadoras (presentes nas operações 150, 410 e 550) possuem uma quantidade de posições internas específica, ilustrada pelas linhas pretas verticais na FIGURA 5. A cada intervalo de tempo há a movimentação da alavanca, onde em cada ciclo os itens são movimentados para uma posição à frente por meio de uma alavanca conforme representação.



FONTE: A autora (2020).

A movimentação da alavanca é interrompida caso o buffer da operação seguinte esteja saturado. Outro aspecto a ser considerado é a possibilidade de que no momento da movimentação da alavanca não exista um item na entrada da lavadora. Este fato não é fator impeditivo do fluxo, pois o único impacto é em posições sem itens. Desta forma, assim que o próximo item chegar ao início da operação ele será inserido na lavadora no instante da próxima movimentação da alavanca.

2.3.2 Descrição do fluxo da Operação 100

A operação 100 é a primeira operação da linha produtiva, onde o operador faz a sequência de programação de acordo com o planejamento e os adaptadores que já estão disponíveis. A disponibilidade dos adaptadores se dá de acordo com o retorno dos adaptadores após operação 800, onde há uma máquina que guarda os adaptadores separando por modelo para disponibilização sequenciada para a OP 100.

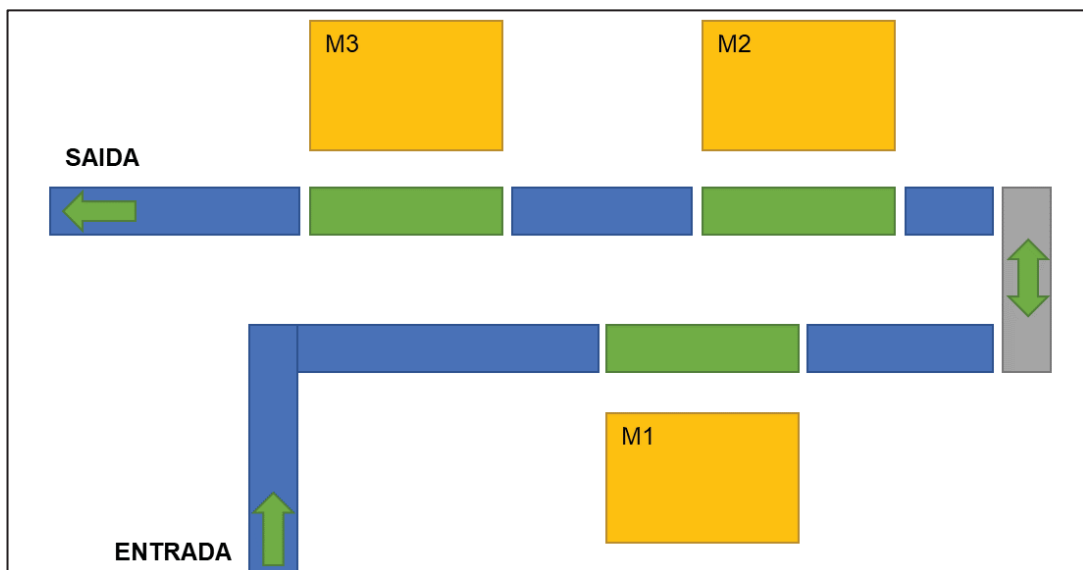
Depois que o operador recebe o adaptador seguinte, ele precisa pegar o próximo item de um pallet que fica localizado ao lado da operação, colocá-lo no adaptador, parafusar o item no adaptador e em seguida liberá-lo para o buffer da próxima operação.

Outra tarefa deste mesmo operador é a movimentação do pallet de cada modelo, quando vazio, por um pallet cheio que fica nas proximidades da operação com uma empilhadeira que é exclusiva desta operação.

2.3.3 Descrição do fluxo da Operação 310

A operação 310 conta com três prensas idênticas (M1, M2 e M3), conforme a FIGURA 6. Cada máquina possui três posições para os itens: Esperando processamento, em processamento e esperando novo item a ser processado. Por conta de as máquinas desta operação estarem em serie, o abastecimento para a realização da operação é realizado por meio de chamadas. Estas chamadas ocorrem quando não há item na posição esperando processamento. Quando o item novo chega ele é deslocado para posição esperando processamento e libera o item que está na posição esperando novo item a ser processado (se houver).

FIGURA 6 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO OPERAÇÃO 310



FONTE: A autora (2020).

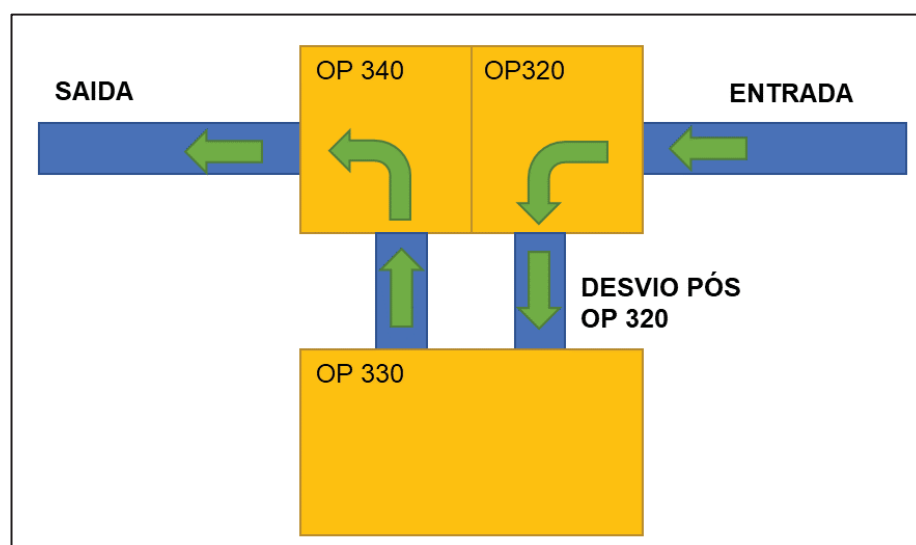
Para que o chamado se concretize é preciso que um item esteja disponível no buffer antes da M1. A partir do momento que o chamado é concretizado, o item chamado se desloca através dos buffers até a máquina desejada. O retângulo cinza da figura é um movimentador que carrega um item por vez até o buffer seguinte. Caso mais de uma máquina esteja vazia na fila de espera para chamar um novo item, o primeiro chamado a ser atendido é o da máquina mais longe da entrada da operação.

2.3.4 Descrição do fluxo das Operações 320 e 340

As operações 320 e 340 são realizadas pela mesma máquina – desparafusar e parafusar (FIGURA 7). Cada item possui quatro parafusos, sendo que a máquina coloca e retira dois deles por operação. Além disso, há parafuso de dois tipos, sendo um para o modelo 1 e outro para o modelo 2. Com isto a máquina possui uma lógica de prioridades que está relacionada ao modelo e à quantidade de parafusos a serem colocados ou retirados. Para auxiliar a operação, a parafusadeira conta com um buffer de parafusos para depositar e retirar parafusos caso necessário.

Estas operações têm como função soltar o cabeçote do adaptador para que a face inferior do cabeçote seja usinada na OP 330 e em seguida parafusá-lo novamente no adaptador conforme descrito na FIGURA 7.

FIGURA 7 – ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO OPERAÇÃO 320 E 340



FONTE: A autora (2019).

A lógica presente na parafusadeira com relação as operações e movimentações está no QUADRO 1, onde é considerado que a parafusadeira não esteja com parafuso. Caso isto ocorra, é verificado se este parafuso pode ser utilizado na OP 340. Outro quesito não considerado na tabela é se alguma das máquinas estiver vazia, onde a máquina realizará somente esta operação até a chegada de um item na outra operação.

QUADRO 1 – LÓGICA OP 320 E OP 340

Quantidade de operações		Tipo parafuso	Sequência de operações
OP320	OP340		
2	2	Igual	OP 320 -> OP 340 -> OP 320 -> OP 340
2	2	Diferente	OP 320 -> troca de parafuso -> OP 340 -> pega outro parafuso no buffer -> OP 340 -> OP 320 (finaliza com o parafuso)
1	2	Igual	OP 320 -> OP 340 -> finaliza faltando uma operação da OP340
1	2	Diferente	OP 320 -> troca de parafuso -> OP 340 -> finaliza faltando uma operação da OP340
2	1	Igual	OP 320 -> OP 340 -> OP 320 (finaliza com o parafuso)
2	1	Diferente	OP 320 -> troca de parafuso -> OP 340 -> OP 320 (finaliza com o parafuso)
1	1	Igual	OP 320 -> OP340
1	1	Diferente	OP 320 -> troca de parafuso -> OP 340

FONTE: A autora (2019).

Caso somente uma das operações possua item para processar, a operação com item será realizada. Caso chegue algum item durante o processamento as regras do QUADRO 1 devem ser atendidas. Como por exemplo: Se tem na OP320 um item do Modelo 1 recém chegado e na OP 340 um item do Modelo 1 parcialmente processado, o tipo do parafuso é o mesmo e, conseqüentemente, a seqüência do fluxo é a OP 320, seguida por OP 340 que utiliza o parafuso retirado da OP 320, finalizando com a OP 320 e com o parafuso na parafusadeira.

2.3.5 Descrição do fluxo da Operação 515

Na operação 515 há três parafusadeiras em série, sendo a primeira exclusiva para um dos modelos e as duas últimas para outros modelos. A movimentação

realizada por meio de esteira e sem a retirada do item da esteira para a realização da operação, bloqueando as peças seguintes caso esteja sendo realizada operação.

2.3.6 Descrição do fluxo da Operação 570

Na operação 570 há a inserção de uma caixa, que fica antes do adaptador, para a separação de uma peça do item para as operações seguintes. Esta caixa segue junto ao adaptador até a operação 800 onde o operador a coloca em um carrinho. Quando não há mais caixas do carrinho que fica na operação 570, o operador leva o carrinho para a operação 800 e faz a troca por um carrinho cheio.

2.3.7 Descrição do fluxo da Operação 600

A operação 600 possui duas prensas em série onde o operador posiciona componentes a serem prensados pelas máquinas. A operação consiste no posicionamento, depois ele aperta o botão para a liberação da prensagem. Caso haja alteração do modelo a prensar o operador precisa fazer um setup na prensa, alterando a posição da prensa. Para ambas as prensas e a operação 710 há somente um operador.

2.3.8 Descrição do fluxo da Operação 720

A operação 720 possui uma parte realizada por meio de máquinas e uma parte manual. As máquinas fazem o teste de estanqueidade⁸ e a impressão do código de rastreio dos itens. Já na parte manual é realizada uma limpeza dos itens que falharam no teste para um re-teste na máquina que pode ser refeito até três vezes. Caso o número de reprovações supere este limite a peça é descartada.

A movimentação nas máquinas é cíclica por meio de um braço robótico onde primeiramente é pego do buffer o primeiro item e movimenta-se para o teste de estanqueidade, depois é realizada a impressão e finalmente o item é devolvido para

⁸ Estanqueidade: mesmo que sem vazamento.

o buffer onde o item é deslocado para o buffer da próxima operação ou segregado para limpeza do operador.

2.3.9 Descrição do fluxo da Operação 800

A última operação é a 800, onde o operador faz uma inspeção em todos os itens e depois os colocam nos respectivos *pallets*. Depois o operador libera a caixa para o carrinho da operação 570 e o adaptador para o buffer. Nesta operação é separado um item de cada modelo aleatoriamente para inspeção na tridimensional.

2.3.10 Descrição do fluxo da Buffers especiais

Há dois buffers que funcionam com fluxo diferenciado: entre a operação 390 e 410 e entre a operação 550 e 570. Ambos possuem bifurcações onde há um segundo buffer em paralelo como representado na FIGURA 8. No presente momento o primeiro buffer especial funciona com somente um dos buffers duplicados habilitado, já o segundo há a diferenciação por tipo de adaptados, onde cada um dos buffers tem como prioridade um modelo.

FIGURA 8 – ESQUEMA BUFFERS ESPECIAIS



FONTE: A autora (2020).

Esta separação dos modelos de adaptadores ocorre até o momento em que um dos buffers fique saturado. A partir deste momento todos os adaptadores são inseridos no outro buffer até o momento que não haja mais saturação.

2.3.11 Descrição do fluxo da Inspeção tridimensional

A inspeção tridimensional possui duas etapas: a limpeza e a medição na máquina. Primeiramente o condutor coloca a peça em uma lavadora por 2 minutos e depois limpa a região a ser medida (varia de acordo com a máquina que se retirou a peça). Depois da limpeza o item espera uma das três máquinas tridimensionais estar disponível para realizar a medição.

Caso o item reprove o condutor repete o procedimento de limpeza e medição. Se mesmo após este processo o item for reprovado há uma parada na máquina para reverter a diferença da medição e realiza-se um bloqueio das peças processadas na máquina.

2.4 MÃO DE OBRA

A linha produtiva conta com três categorias de mão de obra: os operadores, os condutores e os técnicos e as atividades que cada um deles podem realizar estão resumidas no QUADRO 2. Os operadores são responsáveis pelas operações manuais, os condutores pelo bom funcionamento de um conjunto de máquinas e pelas respectivas inspeções visuais e os técnicos pelas panes e manutenções mais demoradas e complexas. Caso alguma máquina demande um operador/condutor e o responsável pela máquina esteja ocupado é possível que outra pessoa habilitada para trabalhar nesta máquina atenda a necessidade momentaneamente.

QUADRO 2 – POSSÍVEIS ATIVIDADES DOS OPERADORES, CONDUTORES E TÉCNICOS

	Operadores	Condutores	Técnicos
Operação manual	X	X	
Inspeção visual	X	X	
Inspeção tridimensional		X	
Pane		X	X
Manutenção preventiva		X	X
Troca de ferramenta		X	

FONTE: A autora (2020).

Cada um dos três turnos conta com um intervalo de 10 minutos para descanso e lanche, onde todos os operadores e condutores param suas atividades ao mesmo tempo. Entretanto, no horário do almoço e jantar (1º e 2º turno) existe uma parada de 40 minutos onde os operadores e condutores são divididos em três grupos para a pausa. No primeiro grupo estão os operadores, que são substituídos momentaneamente na linha produtiva pelos operadores da pré-usinagem e pré-montagem para que não haja parada na linha. No segundo e terceiro grupo está uma parte dos condutores e um condutor da tridimensional. Desta forma as operações essenciais não ficam sem uma pessoa que tenha conhecimento de alguma operação.

2.5 DESCRIÇÃO DOS EVENTOS DE PARADA DE MÁQUINA

Além das paradas por falta de peça ou saturação há as paradas para manutenção, pane ou troca de ferramenta. Sendo que destas somente as panes não são controladas por se tratar de uma falha mecânica e não de tarefas que podem ser realizadas em um momento oportuno.

2.5.1 Manutenção preventiva

Existem três tipos de manutenção preventiva: a diária e as semanais com ou sem parada de máquina. As diárias são realizadas pelos condutores no início dos turnos (12 minutos por máquina) onde verificam componentes das máquinas como o nível de óleo, onde não é necessário parar as máquinas. Já as manutenções semanais são distribuídas entre os condutores e técnicos que ocorrem um momento adequado durante a semana buscando minimizar as perdas de produção.

A linha produtiva conta com a parada da linha para manutenção preventiva durante um período de quatro horas por semana. Neste período são priorizadas as manutenções com parada de máquina nas máquinas únicas e as máquinas consideradas como gargalo.

2.5.2 Panes

Consideram-se panes as paradas de máquinas decorrentes de falhas nas máquinas ou paradas induzidas pelos condutores ou técnicos que não são para manutenção ou troca de ferramenta.

Quando ocorre uma pane, se ela for de baixa complexibilidade o condutor é o responsável pelo conserto, caso contrário o conserto é responsabilidade do técnico.

2.5.3 Troca de ferramenta

A troca de ferramenta ocorre com base na quantidade de ciclos que as ferramentas já realizaram. Como há diferença entre os modelos, há ferramentas diferentes para cada modelo. Quando o contador das máquinas verifica que há a necessidade da troca os condutores já podem realizar a troca verificando no painel existente em cada uma das máquinas de forma manual.

2.6 A IMPORTÂNCIA DO NÍVEL DE DETALHES NA SIMULAÇÃO

O presente capítulo teve o objetivo, além da própria descrição do processo produtivo, exemplificar a quantidade de detalhes que são necessários de serem considerados no modelo de simulação computacional. Uma vez que o objetivo do modelo é simular o sistema em si, qualquer detalhe relevante que não seja modelado levará a resultados diferentes do que aconteceriam no sistema.

Ao mesmo tempo, é necessário também definir quais níveis de detalhes podem ser eliminados no processo de modelagem, a fim de não trazer complexidades desnecessárias para o modelo e acabar aumentando tanto o tempo de desenvolvimento como de execução de cada replicação de cada cenário no modelo de simulação desenvolvido.

A descrição do processo apresentada neste capítulo representa um desenvolvimento realizado ao longo de 18 meses em que diversas adaptações foram realizadas a fim de que o modelo desenvolvido represente de fato o sistema utilizado como base.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é realizado uma breve revisão de literatura quanto ao tema da dissertação. É apresentado uma contextualização da Indústria 4.0 e onde a simulação está inserida. Também é apresentado uma contextualização de ambientes fabris para melhor compreensão das aplicações descritas neste capítulo. Depois é apresentado a evolução da simulação computacional. Finalizando com uma explicação sobre otimização relacionada com simulação.

3.1 INDÚSTRIA 4.0

O conceito da Indústria 4.0 apareceu pela primeira vez por meio de uma publicação do governo alemão em 2011, como uma estratégia de alta tecnologia para 2020, promovendo o desenvolvimento de novas tecnologias e criação de soluções de referência. Mas o termo “Indústria 4.0” no modelo que conhecemos apareceu somente em 2013 em uma feira na Alemanha. Desde este momento o tema está sendo amplamente discutido e influenciando a indústria mundialmente.

Seguindo o exemplo da Alemanha, outros países iniciaram a realizar investimentos neste sentido. Makarova et al. (2018) trazem o exemplo da China com o programa *Made in China 2025* que busca desenvolver tecnologias robóticas e IoT a fim de modernizar as indústrias tradicionalmente de intensiva mão de obra. A partir desde exemplo reforçam a importância das iniciativas governamentais para que a concorrência não seja perdida.

Nos últimos anos a tecnologia computacional evoluiu de maneira juntamente com o aumento exponencial de geração de dados, armazenamento em nuvem e tecnologias industriais avançadas que permitem a implantação dos conceitos da Indústria 4.0. Esta implantação pode ser com a utilização de análise de dados em *Big data*, robôs autônomos, simulação, integração horizontal e vertical do sistema, a internet das coisas, *Cyber-security*, armazenamento de dados em nuvem, fabricação aditiva e realidade aumentada (GILCHRIST 2016).

Makarova et al. (2018) apoiam mudanças sobre as tecnologias de processamento de dados, onde antes dos dados serem armazenados na nuvem, um programa seja responsável pela análise destas informações de maneira inteligente. Os autores desenvolveram um simulador virtual, que monitora as operações de uma

fábrica e propõe formas de organizar os fluxos logísticos considerando toda a cadeia de produção.

Alrabghi (2018) defende que a simulação aliada a melhorias como contribuidor principal para facilitar a transformação para a Indústria 4.0. As melhorias se dão através resultados de uma ou mais funções objetivo e atualizações nas variáveis de decisão. As atualizações das variáveis ocorrem à medida que a fábrica física transmite dados para que o modelo digital avalie e otimize.

A solução de Alrabghi pode ser aplicada para gerenciamento de mão de obra, estoque, planejamento de produção, saúde e manutenção. O autor traz algumas ferramentas para auxílio da solução: configuração e escopo do sistema, métodos de simulação e modelagem, definição do objetivo, variáveis de decisão e restrições, algoritmos de otimização, tomada de decisão e análise dos dados.

Na configuração e escopo do sistema define-se com base nos conhecimentos e tecnologias disponíveis o que será simulado (deixar o mais simples possível) e o escopo em que a simulação é inserida. Em métodos de simulação e modelagem define-se o tipo de simulação (por exemplo simulação de eventos discretos) e os parâmetros de simulação. A função objetivo é estabelecida de acordo com o motivador para a criação da simulação. As restrições têm como objetivo delimitar os valores das variáveis de decisão e podem ser utilizadas ferramentas de Inteligência artificial para delimitar a quantidade de simulações e rapidez da otimização. O algoritmo de otimização varia de acordo com o tipo de simulação. A tomada de decisão pode ser contínua, periódica ou quando há alteração em alguma condição. Para a análise de dados o autor destaca a importância das técnicas de Big Data e tratamento dos dados.

3.2 AMBIENTES FABRIS E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Pinedo (2016) diferencia os ambientes fabris em três grandes grupos: máquina única, máquinas paralelas e classificações *shop*. É considerado máquina única quando uma única máquina é utilizada na produção. Quando são máquinas paralelas, existe tres subdivisões: idênticas - quando há máquinas idênticas em paralelo, e em que o item pode ser processado em qualquer uma delas, sem a necessidade de utilizar mais de uma máquina –; uniformes – a diferença em relação às idênticas é que estas máquinas possuem tempos de processamento diferentes – ;

e não relacionadas – pelo menos um dos itens não pode ser processado em qualquer máquina.

Quanto às classificações *shop*, tem-se o *flow shop*, o *flow shop flexível*, o *job shop*, o *job shop flexível* e o *open shop*. No *flow shop* há máquinas em série, onde todos os produtos são processados em todas as máquinas na mesma ordem, criando filas de espera entre as etapas quando a máquina a realizar o processamento ainda não está disponível. Para o *flow shop flexível* acrescenta-se máquinas paralelas nas etapas do *flow shop*. Já nos casos de *job shop* não há uma ordem pré-determinada comum a todas as tarefas a serem realizadas, ou seja, cada produto possui uma sequência de produção que difere das outras. O *job shop flexível* é uma extensão do *job shop*, com a existência de etapas de processamento que possuem máquinas em paralelo. O *open shop* é similar ao *job shop*, mas existem etapas dos produtos que possuem tempo de processamento zero em alguma/s etapa, dispensando o processamento na máquina.

Para problemas com relação a agendamento de produção, pode-se utilizar diferentes metodologias para otimização, como algoritmos exatos, heurísticas e simulação. Ribas et al. (2010) realizaram uma revisão da literatura em que apresentam diferentes abordagens de solução e restrições adotadas para problemas de máquinas paralelas. Nos artigos selecionados identificaram possíveis restrições, como: manutenção corretiva ou preventiva (períodos de indisponibilidade), buffers limitados, produção sem espera entre processos (*no wait*), elegibilidade das máquinas, setup, tempo de transporte, precedência de trabalho, dimensionamento de lotes.

Pinedo (2016) e Leung (2004) definem programação da produção ou *Scheduling* como a alocação de recursos para tarefas em um determinado período de tempo para otimizar uma ou mais medidas de desempenho. Como recursos pode-se considerar máquinas, CPU, locais, equipes, entre outros. As tarefas podem ser operações, estágios de um projeto, serviços e unidades de processamento. Entre as medidas de desempenho as principais são a de *makespan* e o número de trabalhos atrasados.

Quando os estudos de problemas de programação da produção começaram na década de 1950 os modelos propostos e considerados eram relativamente simples (LEUNG 2004). Com as Revoluções Industriais, a programação da produção ficou

mais complexa devido ao aumento da flexibilidade e volume da produção assim como a complexibilidade dos produtos (STEARNS 2012).

Com relação aos problemas de *Scheduling* na manufatura, Pinedo (2016) destaca que, quanto mais detalhado o cronograma de tarefas, mais fácil é manter a eficiência e o controle das operações. Lopez e Roubellat (2008) apresenta algumas restrições dos modelos como as restrições de tempo (ou seja, prazos, restrições de precedência etc.) e limitações de capacidade e capacidade dos recursos necessários para essas tarefas.

Jungwattanakit et al. (2009) trabalharam com o problema de programação de produção para máquinas paralelas não relacionadas, onde a configuração era dependente da sequência e da máquina. Além disso, os autores consideram tempo de *setup*, *makespan* e data máxima de finalização do trabalho. Para este problema os autores contaram com instancias de até 50 trabalhos para agendar com 20 estagios de produção. Para solucionar o problema fizeram a utilização de programação inteira mista pela solução obtida por método exato e de heurísticas de *simulated annealing*, busca tabu e algoritmo genético.

Kianfar et al. (2012) buscaram determinar um cronograma para minimizar o atraso médio dos trabalhos em um *flow shop* flexível. Para tal foi considerada a existência de buffers ilimitados (capacidade infinita) entre estágios, a não existência de panes nas máquinas e os tempos de processamento. Para a resolução foi criado um algoritmo genético híbrido que inovou na criação de soluções iniciais, modificação dinâmica de parâmetros e a maneira como a função é apresentada.

Almeder e Hartl (2013) também trabalharam com *flow shop* flexível, mas de forma aplicada à uma indústria metalúrgica. Os autores criaram um modelo estocástico com abordagem metaheurística por meio de um algoritmo de *Variable Neighborhood Search* (VNS), em primeiramente é verificada a vizinhança com o modelo de forma determinística e a partir deste resultado com forma estocástica.

Mouelhi-chibani e Pierreval (2010) trabalharam com um *flow shop*, e utilizaram como estratégia de solução uma abordagem baseada em redes neurais *online*. No modelo foi abordado a maneira de gerenciamento das filas entre etapas do processo (*Dispatching rules*), onde buscaram encontrar o mais adequado para o sistema apresentado.

Yu e Seif (2016) trabalharam com um *flow shop* flexível, onde foi considerado no modelo matemático o tempo de *setup* e o tempo de manutenção além do tempo

de processamento em cada máquina por modelo produzido. O problema buscava minimizar o custo total do atraso na conclusão de cada trabalho e custo dos recursos de manutenção. Para solucionar as instâncias propostas os autores criaram um algoritmo genético baseado no limite inferior (LBGA).

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Considerando que grande parte do presente trabalho se constitui no desenvolvimento de um modelo de simulação, este capítulo tem como objetivo apresentar uma contextualização sobre o assunto, destacando a importância da simulação e as classificações mais importantes para enquadrar o modelo elaborado.

Kelton (2002) e Chwif e Medina (2015) relatam que a simulação computacional se iniciou no início da década de 1950 utilizando como linguagem de programação o Fortran, e aplicações ocorreram em empresas de grande porte no ramo metalúrgico e aeroespacial. Em 1961 foi criada a primeira linguagem de simulação (GPSS – *General Purpose Simulation System*). Na década de 1970, a simulação começou a ser mais rápida e barata, começando a ser utilizada por outras empresas, mas ainda nas grandes, principalmente na automobilística e indústria pesada. Seguinte foram criados e disponibilizados os primeiros simuladores juntamente com a introdução do computador pessoal. Na década de 1990 pequenas empresas começaram a utilizar a simulação. Melhores animações nas simulações, computadores mais rápidos e mais fácil integração com a simulação.

Banks (1998) define simulação como uma imitação de operações de um processo no mundo real ao longo do tempo. Chwif e Medina (2015) e Kelton (2002), subdividem a simulação em dois grupos: a não computacional e a computacional. A não computacional está relacionada a experimento em que se busca representar a realidade fisicamente, em escala reduzida, enquanto a computacional é a representação da realidade por meio de programação em ambiente computacional.

Para Banks (1998), o objetivo da simulação é resolver problemas do mundo real, replicando este sistema computacionalmente e verificando os eventos ocorridos na simulação por meio do histórico dos eventos e das principais interferências do sistema.

Banks (1998) diferencia as aplicações de simulações em grandes áreas, sendo estas: indústria, saúde, militar, recursos naturais, serviços públicos, transporte, performance de sistemas, aeroportos, serviços de comunicação. Onde é simulado movimentações, rotas, transporte de materiais, custos, diagnósticos, utilização de equipamentos, manutenção, trânsito, dimensionamento, entre outros.

Polenghi et al. (2018) retrata um aumento de publicações a partir da metade dos anos 80, quando iniciou a simulação aliada a IE (*Industrial Engineering*) e constata que, na era da digitalização, a simulação cobre um papel principal em todos os campos (finanças, gerenciamento e manufatura) e em todos os níveis (estratégico, tático e operacional).

Law (2013), Banks (1998) e Freitas Filho (2008) trazem como vantagens da simulação: como um modelo matemático com os elementos do mundo real torna o problema com difícil solução, a simulação é uma boa alternativa; projetos de sistemas alternativos propostos podem ser comparados via simulação para ver qual atende melhor a um requisito específico; maior controle sobre as condições experimentais do que seria geralmente possível ao experimentar com o próprio sistema, o que auxilia a tomada de decisão, diminuindo os custos de implementação de projetos; identificação dos gargalos pode ser obtida de forma facilitada; auxílio no entendimento dos motivos de certos fenômenos.

Polenghi et al. (2018) apresenta três classificações de aplicação de simulação na indústria: Beginning-Of-Life (BOL), Middle-Of-Life (MOL) e End-Of-Life (EOL). Classifica-se como BOL as simulações antes de novas instalações, sendo estas design de sistema, layout, projeto do sistema de manuseio de materiais, *Supply Chain* design, desenho de processo e ergonomia. Já MOL, que foi impulsionada pelo aumento do poder computacional, tem como objetivo simular planejamento de operações, programação, controle em tempo real, políticas de operações, gerenciamento da *Supply Chain*, gestão de inventário, gestão da manutenção e compras. O EOL não é muito utilizado devido ao custo/economias, sendo utilizado para fatores de segurança como o descomissionamento de usinas nucleares.

Weng e Fujimura (2012) realizaram o Scheduling em um *Flow-shop* flexível com base na data máxima de processamento, com buffers ilimitados. O algoritmo utilizado para a simulação é *greedy*, onde a ordem de processamento vai sendo feita na primeira operação conforme as máquinas vão sendo liberadas. Foram criadas 408 instâncias, onde para cada uma delas foi realizada simulações para as seis regras de

dispatching rules: FIFO (*First-In-First-Out*), EDD (*Earliest-Due-Date*), MST (*Minimum-Slack-Time*), e foram criadas duas outras regras, sendo elas a SBC (controle baseado em etapas) e a MBC (controle baseado em máquina). Estas regras criadas selecionam os trabalhos com base no tempo restante previsto de cada trabalho inacabado.

Aufenanger et al. (2008) destacaram que soluções matemáticas apresentadas na literatura não resolvem os problemas do mundo real de maneira apropriada. Os autores fizeram um modelo para simulação de um *flow-shop* e com meta de minimização do *makespan*. A otimização na simulação se dá em duas partes, a primeira testa os atributos e regras e a segunda faz o controle do fluxo de material que em conjunto decidem a melhor regra a ser adotada em cada momento da simulação através de uma heurística.

Silva et al. (2017) trabalharam com um sistema *flow-shop* flexível *make-to-order*, onde há parâmetros estocásticos para falhas de máquinas e tempo de reparo assim como o intervalo de chegada de produto. Foram adotados três sistemas de controle de produção: ATKS, GKS e POLCA com diferentes formas de alocação de trabalho: mínimo de quantidade de trabalho nas filas (MNJ) e a alocação de trabalho na máquina que está menos carregada (LLM). Cada instancia – seis combinações entre os sistemas de controle de produção e formas de alocação de trabalho – foi replicada a simulação de 120 a 150 vezes para conseguir analisar os resultados por conta da existência de parâmetros estocásticos. Para o modelo adotado a combinação GKS e LLM obteve os melhores resultados.

Amiri et al. (2019) propõem uma simulação no Arena baseada na eficiência multiobjectivo em um *Job shop* automatizado, onde buscou minimizar o atraso das tarefas e maximizar a eficiência média das máquinas. Para isto, os autores criaram cenários e cada um deles foram executados 35 vezes para eliminar o ruído. Para otimizar os autores utilizaram a ferramenta de Redes Neurais para aprender e prever os resultados dos cenários.

Esteban et al. (2018) criaram uma simulação em uma linha de produção sujeita a falhas, onde durante a simulação destas perturbações foram testados a qualidade das soluções de resposta a tais eventos criadas a partir de um algoritmo genético. Como resultado os autores obtiveram uma redução de esforço computacional utilizando tal metodologia aliado a soluções promissoras.

Almeder e Hartl (2013) utilizaram a simulação para validar os resultados de uma metaheurística com fluxo estocástico com buffer limitado. A metaheurística

utilizada foi a VNS (*Variable Neighborhood Search*) com um modelo simplificado do real, onde foi diminuída a quantidade de etapas do processo, a não existência de momentos de chegada de pedido, parâmetros determinísticos e a não perturbação nos buffers. Quando a solução do VNS é encontrada e transmitida para a simulação, todas as restrições do sistema são incorporadas para verificar os impactos reais na solução.

3.4 OTIMIZAÇÃO NA SIMULAÇÃO

Carson e Maria (1997) trouxeram metodologias de otimização para a simulação. Neste caso é realizada a simulação e, posteriormente, com base nos resultados são alterados os valores de alguns parâmetros e realizada a simulação novamente quantas vezes o processo for necessário. As autoras trazem uma diversidade de possibilidades para a otimização: métodos de pesquisa baseados em gradientes, otimização estocástica, metodologia da Superfície de Resposta (RSM), métodos heurísticos, *A-Teams* e *métodos estatísticos*.

Muitas vezes a otimização é relacionada a modelos matemáticos, mas a única utilização deles é vinculada a aproximações grosseiras da realidade e, se considerar a complexibilidade dos sistemas de manufatura pode-se obter resultados distantes da realidade. Por sua vez, a modelagem de simulação encontra resultados satisfatórios quando a variabilidade e complexidade aumentam em sistemas dificultando o uso de métodos algébricos puros Salama e Eltawil (2018).

Aplicações de simulação

Sakr et al. (2019) fazem uma aplicação de simulação de eventos discretos em uma fábrica de semicondutores utilizando o software Arena®. Nesta simulação a otimização se dá a partir da programação de um *open shop*, onde é possível agrupar os lotes de mesmo processamento e atende as restrições de tempo de espera entre operações assim como a prioridade atual dos lotes. A lógica da otimização se dá através da leitura dos dados de entrada atualizados, e atualização das variáveis de decisão até que elas atinjam um valor aceitável.

Salama e Eltawil (2018) propõem um Sistema de Apoio a Decisão (DDS⁹) baseado em uma abordagem de otimização de metamodelagem de simulação aplicado em uma fábrica de eletrodomésticos. Para diminuir o tempo computacional e auxiliar na formulação do metamodelo os autores utilizaram o método DOE¹⁰ (*Design of Experiments*). O DSS proposto coleta as informações em atualizadas da fábrica, que por sua vez fornece aos tomadores de decisão o status da produção que com base na experiência alterar as configurações das variáveis de decisão. Com base nestas variáveis e atualizações da fábrica o DDS proposto avalia diferentes cenários para expansões ou metas de melhoria enquanto o DOE avalia os resultados das simulações estatisticamente. Depois disto o DDS apresenta os resultados aos tomadores de decisão que por sua vez atualizam o planejamento da produção.

Um DSS também é apresentado por Tsourma et al. (2018), porém aliado a gerenciamento e alocação de recursos (TDE¹¹). Onde o principal objetivo é automatizar e otimizar o processo de agendamento das tarefas e atribuição dos recursos em ambiente Industrial. Para estes agendamentos e atribuições o modelo considera habilidades, capacidades e preferências dos trabalhadores. O modelo possibilita a interface com os gestores que podem alterar parâmetros como disponibilidade, novas tarefas e alterações na fábrica para avaliar o impacto. Não foi apresentado no artigo que o modelo obteve aplicação de forma online, mas foi realizados alguns testes que resultaram em boas sugestões para a tomada de decisão quanto ao gerenciamento e alocação de recursos.

Kumar et al. (2018) desenvolveram uma abordagem integrada para determinar o planejamento de produção, dimensionamento de lotes, níveis de estoque e programação da manutenção para uma indústria automotiva. Para isso foi desenvolvido em um simulador que verifica os impactos de diferentes configurações do planejamento a fim de encontrar a melhor solução. Porém a solução fica limitada em decorrência ao tempo computacional para poucas variações de parâmetros e intervalo de tempo simulado reduzido. De qualquer forma os autores conseguiram demonstrar as vantagens da abordagem que obtiveram melhorias econômicas de 4,2–21,6% nos cenários simulados.

⁹ Do inglês *Decision Support System*

¹⁰ DOE: Método de empregar técnicas estatísticas com designs sistemáticos para avaliar o efeito dos fatores de entrada e suas interações no desempenho do sistema.

¹¹ Do inglês: *Task Distribution Engine*

Turker et al. (2019) criam um modelo de simulação teórico com o software Arena® para uma manufatura *Job Shop*, onde a otimização se dá através do emprego de regras de despacho. Estas regras buscam minimizar o tempo de máquina parada evitando que as máquinas fiquem sem fila através da reordenação da sequência de produção das máquinas anteriores. Os autores observaram que o DSS melhorou o desempenho do sistema com o aumento de utilização das máquinas e diminuindo o número de trabalhos atrasados.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrito mais detalhes do simulador criado com relação a classificação, lógica programada e relatórios gerados pelas simulações. Além disto, tem-se a apresentação das adaptações do modelo e as respectivas causas. Por fim é descrita a metodologia adotada para a criação do modelo de simulação desde a formulação do problema até a referente documentação.

4.1 MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO

Nesta seção é apresentado o formato do modelo de simulação proposto na presente dissertação, por meio da classificação da simulação assim como a forma da programação do simulador.

Para Kelton (2002) e Law (2013) há três grandes diferenciações de um sistema de simulação. A simulação proposta é classificada como um sistema dinâmico por evoluir ao longo do tempo como consequência de se tratar de uma linha produtiva.

Considerando a aplicação da simulação, é implementado um modelo de simulação de eventos discretos (DES¹²). A simulação discreta, segundo Law (2013), é a modelagem de um sistema à medida que ele evolui ao longo do tempo por uma representação na qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos separados no tempo. Este tipo de simulação é relacionado principalmente com processos produtivos, de acordo com o objeto de estudo.

Por conta de a simulação possuir mais de um parâmetro aleatório no início da simulação se classifica como estocástica. Este modelo produz uma saída aleatória e, portanto, deve ser tratado apenas como uma estimativa das características reais do modelo.

O modelo de simulação possui orientação ao processo de acordo com a escolha da autora. Pegden (2010) e Kelton (2002) descrevem esta orientação com o movimento de entidades passivas através do sistema como um fluxo de processo. O fluxo do processo é uma série de etapas do processo (como apreensão, atraso, liberação) que modelam as mudanças de estado que ocorrem no sistema em uma

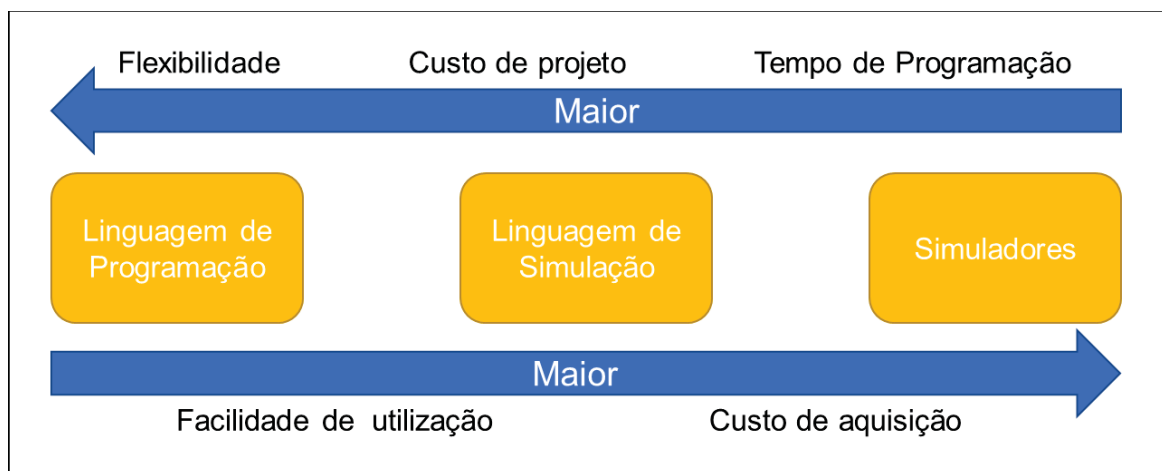
¹² Do inglês *Discrete Event Simulation*

sequência de eventos ao longo do tempo. O modelo normalmente é definido como um fluxograma com uma entrada e saída. Nesta abordagem as entidades realizam as movimentações e processos. Onde as entidades se criam, conhecem o tempo próprio de chegada assim como o tempo em fila, se colocam na fila, entre outras ações.

4.1.1 Ferramenta e linguagem de simulação adotada

Existem diversas formas de criar uma simulação, Chwif e Medina (2015) cita três formas de implementação: linguagem de programação, a linguagem de simulação e o simulador. Law (2013) compara a linguagem de programação com os simuladores conforme a FIGURA 9, enquanto a linguagem de programação oferece maior controle do programa, menor custo de aquisição e pode resultar em menor tempo de execução do modelo, o simulador reduz o tempo de programação em um custo de projeto menor.

FIGURA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Como a proposta deste modelo de simulação é uma futura aplicação online na fábrica, busca-se velocidade computacional e facilidade de implementação considerando o equipamento disponível da fábrica e menor custo de implementação. Com isto em consideração, a utilização de linguagem de programação é indicada e neste caso se opta pela linguagem C Sharp (c#) através do desenvolvedor Microsoft Visual Studio.

Considerando esta abordagem para criar o modelo de simulação, não é adotado ferramentas visuais na simulação, o que dificulta a verificação e validação,

mas a não existência desta interface beneficia o tempo computacional uma vez que este tipo de processamento não é necessário.

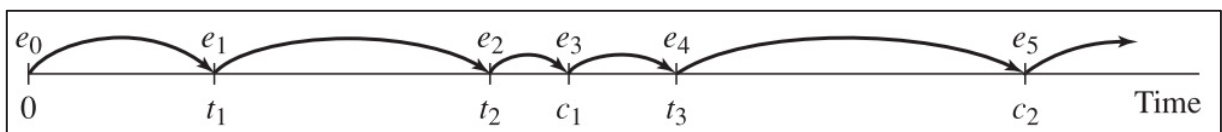
Outro benefício deste enfoque é a facilidade de inserção de dados de entrada para as simulações pois uma vez programada a inserção (neste caso arquivos txt.) não é necessário alterar a simulação. Assim evitando erros de possível inserção incorreta de dados, invalidando os resultados.

Assim como os dados de entrada pode ser automatizado, os resultados de saída já podem ser tratados no mesmo código da simulação. Eliminando assim etapas desnecessárias de envio de dados entre programas ou até mesmo computadores.

4.1.2 Avanço de tempo simulado

Pela natureza da simulação de eventos discretos, a simulação prossegue de acordo com o tempo simulado do relógio de simulação (LAW 2013). O modelo de simulação desenvolvido possui o avanço do tempo do próximo evento conforme a FIGURA 10, onde o avanço do relógio se dá até o próximo evento (e_i) e conforme os eventos são realizados na simulação o relógio vai sempre “pulando” para o próximo evento. Como as mudanças de estado ocorrem nos momentos de eventos, os saltos sucessivos do relógio possuem tamanhos diferentes, o que pode acarretar ganhos computacionais.

FIGURA 10 – AVANÇO DO TEMPO DO PRÓXIMO EVENTO



FONTE: Law (2013, p. 9) adaptado.

No modelo de simulação desenvolvido o avanço de tempo se dá através de um relógio no formato de uma lista de vetor, onde a primeira posição da lista é o próximo evento. Além disto, cada posição da lista possui um vetor que carrega informações sobre o evento que está sendo iniciado ou finalizado, com informações do instante, número da operação, número da máquina e o tipo de evento. Assim evitando a necessidade de que em cada avanço de tempo seja necessário observar todo o processo produtivo para verificar o evento desejado.

4.1.3 Coleta de dados

Os dados necessários para as simulações que dizem respeito ao dimensional e tempos da linha produtiva estudada foram obtidos de diferentes formas: dados de sistemas da fábrica, informações dos setores e filmagem e cronometragem na linha.

A lógica de movimentações e operações da linha produtiva é desenhada a partir de conversas com as equipes da fábrica juntamente com uma validação a campo. Esta validação é necessária pois para alguns casos há informações contraditórias entre as equipes, o que resultaria em um modelo não válido.

Para garantir uma boa coleta de dados, os parâmetros relacionados aos tempos das operações são obtidos em diferentes setores (fabricação, processo e manutenção). A partir deste momento é realizado um filtro para os que melhor descrevem o real tempo. Mas alguns tempos foi necessário ir a campo e realizar filmagens como por exemplo os tempos das garras e das operações 515, 570, 720 por ser desejado uma programação mais detalhada das operações. Para garantia também é coletado *in loco* os tempos das operações manuais (100, 510, 545, 600, 710 e 800).

As manutenções preventivas ocorrem a partir de um plano semanal organizado pela equipe de manutenção. Estes planos oferecem dados da máquina, duração da intervenção, trabalho a ser realizado, tipo de mão de obra (condutor ou técnico de uma determinada especialidade). Estes dados são retirados de um sistema semanalmente para os supervisores da linha produtiva. Para as simulações é escolhido aleatoriamente semanas deste planejamento.

Quanto a mão de obra operante na linha, as informações foram disponibilizadas pelos supervisores da linha. Informações através de uma planilha de Excel onde verifica-se o nome dos operadores e condutores assim como as respectivas habilidades técnicas através da marcação das operações que cada pessoa pode trabalhar. Já as máquinas que cada um dos condutores e operadores são responsáveis foi repassado verbalmente pelos supervisores.

Outras informações compartilhadas pelos supervisores é a quantidade de adaptadores do Modelo 1 e do Modelo 2, assim como o horário e configuração dos intervalos dos condutores e operadores. Intervalos estes de 10 minutos onde todos paralisam ou de 40 minutos para almoço ou jantar onde há uma escala para que a linha não fique sem operadores ou condutores.

A troca de ferramenta é realizada após X horas de processamento para cada uma das ferramentas em cada máquina para cada modelo (1, 2A e 2B). A equipe de processo transformou estas horas em ciclos de processamento em uma tabela. Esta tabela é considerada como dados de entrada das simulações. Para aumentar a confiança que simulações englobem uma boa variação neste aspecto é gerado um número aleatório no início de cada simulação para quantificar a quantidade de ciclos restantes para as trocas.

Os tempos para a realização das inspeções visuais e as trocas de ferramentas não era de conhecimento de todas as equipes. Com isso, a fim de garantir um tempo realista foi realizado uma consulta com os condutores da linha para a definição dos tempos para cada uma das máquinas e modelos.

A programação das inspeções das máquinas tridimensionais não tinha um comum conhecimento entre as equipes. Os dados reais foram obtidos com a equipe de engenharia com a pessoa que faz a programação das máquinas tridimensionais, onde há dois tipos de inspeção e cada operação possui uma demanda específica de inspeção.

Nenhuma das equipes da fábrica possuía um estudo relacionado a capacidade dos buffers entre operações. Com isso é medido o comprimento útil dos buffers (entre a barreira física da próxima operação e o fim do buffer). Através desta medida é possível calcular a capacidade com a divisão pelo tamanho dos adaptadores.

A fábrica possui um sistema que coleta dados de diagnóstico simultaneamente a produção. Este sistema coleta os instantes de início e duração de paradas de máquina e produção. Além disto é coletado a quantidade de itens produzidos no intervalo de produção sem paradas e as paradas são subdivididas em: saturação, falta de peça, pane, manutenção, troca de ferramenta e parada induzida.

Entende-se como saturação o momento que a máquina em questão não tem espaço para inserir o item já processado, enquanto a falta de peça ocorre quando a máquina está sem item e não há item disponível no buffer de abastecimento da operação. Na manutenção, troca de ferramenta e parada induzida o condutor insere na máquina a informação desejada, parando a máquina para o trabalho até o instante de liberação para a produção. Já as panes é um pouco diferente dependendo da máquina pois o sistema é capaz de identificar os problemas para algumas operações e outras não.

Deste sistema de coleta de dados é utilizado para as simulações somente os dados das panes pois o restante dos dados é coletado de forma mais precisa conforme os parágrafos anteriores. Primeiramente foi realizado um teste de aderência estatística com base em seis meses de histórico. Mas infelizmente não foi encontrado nenhuma distribuição que se encaixasse ao histórico coletado. Com isso é criado um txt com os dados deste histórico como dados de entrada para as simulações.

4.1.4 Eventos nas simulações

No modelo de simulação proposto ocorrem diversos eventos, que podem ser classificados em: eventos de operação, eventos relacionados à mão de obra, eventos relacionados à inspeção tridimensional e eventos de liberação ou bloqueio.

Eventos de operação:

- Movimentação para local da inspeção: movimentação da peça que está na operação para o local de inspeção da operação quando há a necessidade de uma inspeção (tanto inspeção visual quanto tridimensional) e o local onde há a inspeção estiver vazio.
- Movimentação nos buffers: quando uma máquina ou operador finaliza a respectiva operação o item processado se desloca para o buffer anterior à operação seguinte.
- Inserção e/ou retirada dos itens das máquinas: evento relacionado ao início ou ao término de uma operação/processamento.
- Troca de ferramenta: quando uma ferramenta chega ao fim de vida é necessário fazer a substituição. Substituição realizada pelos condutores.

Eventos relacionados à mão de obra:

- Inspeção visual: indica o período entre o início e o término da inspeção visual em uma operação por um condutor e finaliza com o retorno do item para o buffer da próxima operação no final do ciclo.
- Manutenção frequencial: indica o período que um condutor ou um técnico realizam uma manutenção em determinada máquina.

- Manutenção diária (PMA): consiste na verificação do funcionamento da máquina através de sensores presentes em cada máquina. por não haver a parada de máquina o condutor altera o status para em manutenção.
- Chegada de operadores e condutores: quando um operador ou condutor é movimentado de operação este evento existe para indicar o momento de chegada para o início da operação ou tarefa.

Eventos relacionados à inspeção tridimensional:

- Movimentação do local da inspeção para as máquinas tridimensionais: um condutor leva a peça selecionada para inspeção tridimensional do local de inspeção até o local da inspeção para as máquinas tridimensionais.
- Limpeza dos itens para verificação na tridimensional: Antes da verificação nas máquinas tridimensionais é realizada uma limpeza minuciosa nas peças para que não haja falsas medições.

Eventos de liberação ou bloqueio:

- Liberação do operador ou condutor: isso ocorre quando o operador ou condutor foi bloqueado por algum motivo, por exemplo intervalo ou manutenção, quando há o desbloqueio do operador ou condutor.
- Liberação da máquina/operação: Liberação da operação/máquina que estava bloqueada por motivos como pane, manutenção, saturação ou falta de peça.
- Pane: No instante que inicia uma pane a máquina é boqueada pelo período determinado e caso seja de responsabilidade de um condutor o condutor responsável é bloqueado.
- Parada dos condutores e operadores: Quando chega o instante de intervalo dos operadores e/ou condutores há o bloqueio deles pelo período determinado.

4.1.5 Adaptações do modelo

Para as simulações não são consideradas: absenteísmo¹³, ausências momentâneas dos operadores ou condutores. Além disto é realizada uma adaptação do modelo com relação as panes.

Considerando os dados fornecidos pela empresa a respeito do histórico das panes, o modelo de simulação necessitou sofrer alterações. Isto porque estes dados contemplam o momento e períodos que as máquinas ficaram paradas, mas sem dados sobre o período dedicado dos condutores e/ou técnicos para a solução do problema. Além disto, não há regra relacionando o período de parada e o período dedicado das pessoas. Para a representação das panes na simulação foi acordado com os especialistas que panes com menos de 15 minutos de duração são consideradas para os condutores, com um bloqueio para outras tarefas. As panes com mais de 15 minutos são alocadas para os técnicos, visto que as mais complexas, que seriam responsabilidade dos técnicos, são as mais demoradas.

4.1.6 Funcionamento do simulador

O modelo de simulação criado funciona de maneira offline, onde primeiramente ocorre a leitura das instancias de um txt conforme o pseudocódigo da FIGURA 11. Depois disto há um *for* para que seja realizada simulações para cada uma destas instâncias. Seguindo com a inserção dos dados da simulação pretendida e finalmente dando o *start* para a realização da simulação.

O modelo de simulação proposto funciona a partir de três relógios: o primeiro relacionado as operações em si, o segundo às paradas de máquina e o terceiro aos operadores e condutores. Onde o primeiro passo é verificar qual das listas possui o próximo instante simulado para depois ser direcionado à função desejada.

Quando o período de simulação desejado se encerra o relógio de simulação é esvaziado, finalizando a simulação. No final da simulação é acrescentado o resultado da simulação no relatório de simulação. Este relatório possui informações: a instancia, produtividade, tempos totais de máquina parada por turno e total.

¹³ Absenteísmo: Hábito de estar ausente da pátria ou do emprego.

FIGURA 11 – PSEUDOCÓDIGO SIMULADOR

Algorithm 1: Simulador

```

Leitura das instâncias();
for Todas as instâncias do
  Inserção dos dados();
  Inserção dos dados da instância atual();
  Inserção do primeiro instante no Relógio();
  while Relógio.Count > 0 do
    Verificar próxima ação();
    if Proxima ação = Produção then
      Simulação produção();
      Atualizar prioridades();
    else
      if Proxima ação = Parada de máquina then
        Simulação parada de máquina();
      else
        if Proxima ação = MOD then
          Simulação MOD();
        end
      end
    end
  end
end
Imprimir relatório simulação();
end

```

FONTE: A autora (2020).

A função “Simulação produção” do pseudocódigo da FIGURA 11 representa os eventos nas operações que dizem respeito ao processamento. Cada posição no relógio possui informações da máquina desejada assim como um direcionamento para o evento. Isto auxilia para um processamento mais rápido onde não é necessário verificar todas as máquinas simuladas, trazendo velocidade para as simulações. No Apêndice 1 encontra-se alguns pseudocódigos de algumas operações.

Para os próximos instantes para às máquinas paradas utiliza-se o pseudocódigo da FIGURA 12. Neste relógio é possível ter eventos de pane tanto para condutores quanto para técnicos, paradas das máquinas para o período para manutenção preventivas programada, liberação de máquina que estava parada (por pane, manutenção ou troca de ferramenta), e troca de ferramenta. Cada um destes eventos possui um número correspondente no vetor da lista de vetor (relógio).

FIGURA 12 – PSEUDOCÓDIGO PARADA DE MÁQUINA

Algorithm 2: Simulação parada de maquina

```

if E pane = true then
  Atualizar instante finalização de operação();
  Inserir instante fim da pane no relógio();
  Bloquear condutor();
else
  if E horario de manutenção = true then
    Limpar relógio simulação();
    Inserir instante finalização do horario de manutenção no relógio();
  else
    if E pane sem condutor = true then
      Atualizar instante finalização de operação();
      Inserir instante fim da pane no relógio();
    else
      if E para liberar maquina = true then
        Liberar maquina();
      else
        if E troca de ferramenta = true then
          Trocar de ferramenta();
        end
      end
    end
  end
end

```

FONTE: A autora (2020).

Já o relógio para eventos relacionados aos operadores e condutores está ilustrado na FIGURA 13. Parte destes eventos já são criados antes do início da simulação, com a inserção dos horários dos intervalos da mão de obra e os instantes das trocas de turno.

Nesta função há eventos de início e fim de intervalo da mão de obra com o bloqueio e liberação dos condutores e operadores, a troca de turno com a atualização dos contadores dos turnos e a impressão dos contadores do turno anterior no relatório das simulações e a liberação da mão de obra por outros eventos como manutenção, troca de ferramenta e panes.

FIGURA 13 – PSEUDOCÓDIGO OPERADORES/CONDUTORES

Algorithm 3: Simulação MOD

```

if E retorno de intervalo = true then
  | Liberar MOD();
else
  | if E inicio de intervalo = true then
  | | Bloquear MOD pelo periodo do intervalo();
  | else
  | | if E troca de turno = true then
  | | | Atualizar contadores();
  | | | Alterar turno();
  | | else
  | | | if E liberação de MOD = true then
  | | | | Liberar MOD();
  | | | end
  | | end
  | end
end

```

FONTE: A autora (2020).

Sempre que há alguma ação por parte dos condutores ou operadores é realizada a atualização das prioridades (função “Atualizar prioridades” da FIGURA 14). Esta função tem como finalidade a tomada de decisão da alocação dos operadores e condutores, onde verifica-se as tarefas ainda não iniciadas e aloca-se conforme possível considerando as prioridades pré estabelecidas nos dados de entrada.

FIGURA 14 – PSEUDOCÓDIGO ATUALIZAR PRIORIDADES

Algorithm 4: Atualizar prioridades

```

Verificar manual();
Verificar tridimensional();
Verificar inspecao();
Verificar manutencoes nao finalizadas maquinas();
Verificar manutencao preventiva maquinas();
Verificar troca ferramenta();
Alocar conforme possivel MOD();

```

FONTE: A autora (2020).

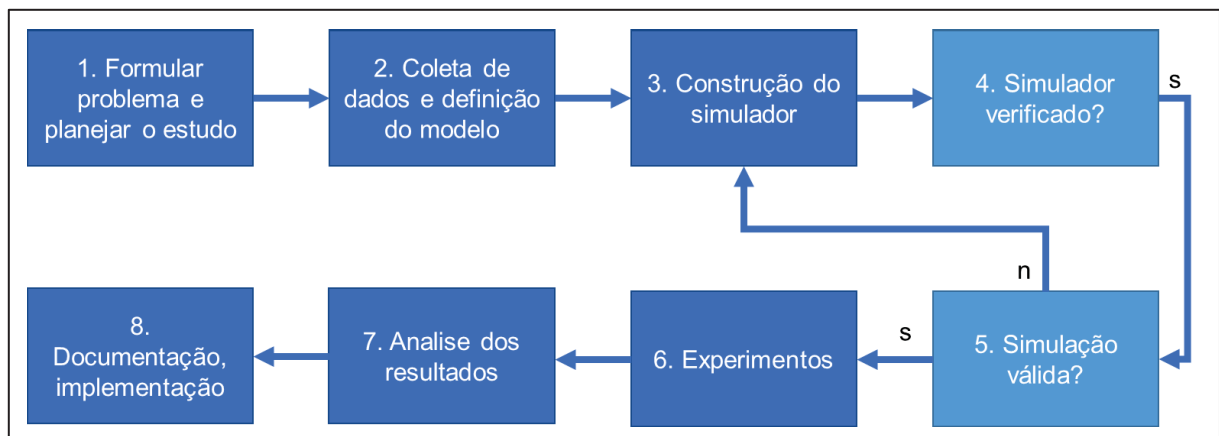
A função de verificação manual identifica as operações manuais que possuem tarefas e estão sem operador, enquanto a tridimensional verifica se há alguma ação a ser realizada nas tridimensionais tanto para a limpeza das peças quanto para retirada ou inserção nas máquinas. A verificação de inspeção identifica se há alguma operação

que necessita o deslocamento de algum condutor para inspeção visual. A verificação de manutenção preventiva identifica oportunidades de realização das manutenções enquanto a função das manutenções não finalizadas identifica as máquinas paradas esperando o retorno de algum condutor (pode ser tarefas de troca de ferramentas e é adaptável para futura inserção de panes). A verificação de troca de ferramenta identifica as ferramentas que já completaram a quantidade de ciclos prevista.

4.2 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para a criação do modelo de simulação, é utilizado como base a metodologia da simulação de eventos discretos de Law (2013), Banks (1998), Kelton (2002) e Chwif e Medina (2015). A partir destes autores extraiu-se 8 grandes etapas de desenvolvimento que são visualizadas na FIGURA 15.

FIGURA 15 – METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Esta organização das etapas conforme a FIGURA 15 tem como principal objetivo simplificar a metodologia de desenvolvimento, sem que se perca em qualidade na simulação. Outro aspecto para utilizar as 8 etapas é que no decorrer do desenvolvimento é possível estar em mais de uma etapa considerando os diferentes processos/eventos presentes no modelo de simulação desenvolvido e desta forma acabou ficando melhor para ajustar o cronograma de desenvolvimento.

4.2.1 Formulação do problema e planejamento do estudo

Nesta etapa são definidos os objetivos gerais do estudo, as perguntas a serem respondidas com a simulação, o escopo do modelo, as configurações do sistema a serem modeladas e o prazo do estudo e os recursos necessários. Com estas questões respondidas é selecionado o software para o modelo.

Juntamente com as equipes técnicas e gestores da fábrica foi traçado os principais objetivos com as simulações com base de questionamentos e desejos. Entre estes objetivos tem-se: o entendimento da real capacidade da linha produtiva e o impacto das panes na produtividade.

4.2.2 Coleta de dados e definição do modelo

A coleta de dados e definição do modelo é definida em seis etapas:

1. Coletar informações da estrutura e procedimentos que está englobado na simulação, cuidando para que estas informações sejam verdadeiras e suficientes;
2. Coletar dados para especificar parâmetros de modelo e distribuições de probabilidade de entrada;
3. Analisar dados coletados na etapa anterior criando suposições a respeito do sistema;
4. Coletar dados sobre o desempenho do sistema existente;
5. Escolher o nível de detalhe do modelo considerando os objetivos do projeto, as medidas de desempenho, a disponibilidade de dados, a preocupação de credibilidade, as restrições computacionais, pareceres dos especialistas e a limitação de tempo e dinheiro;
6. Começar a formular o modelo e inserir detalhes conforme necessário. Procurar não mais que o necessário pois pode resultar em maior tempo de processamento e tempo investido para o desenvolvimento.

Nesta etapa foi realizada consultas técnicas com as equipes de processo, manutenção, programação de produção, logística e produção a fim de coletar os melhores dados para a definição do modelo conforme a seção 4.1.3. Estas consultas ocorreram até a finalização do programa de simulação para esclarecimentos diversos.

Mas no decorrer do processo encontrou-se informações contraditórias entre as áreas que foram postas a prova por diversas visitas realizadas pela autora na linha simulada para o esclarecimento das informações.

Após a definição do modelo é realizada uma análise juntamente com as pessoas mais envolvidas no processo sendo simulação para garantir que as suposições estão corretas e completas.

Neste momento é definido que o modelo de simulação seja criado no Visual Studio com linguagem de programação c#. Onde é simulado todos os fluxos produtivos, inspeções, troca de ferramentas, panes, manutenções e os operadores e condutores da linha produtiva.

4.2.3 Construção do modelo de simulação

A construção do modelo se dá em etapas, primeiramente pelo planejamento do relógio de simulação, depois as operações, seguido pelas operações manuais, inspeções, operadores e condutores, trocas de ferramentas, panes, manutenções freqüenciais, finalizando com modelo de tomada de decisão. Para cada uma destas etapas primeiramente é desenhado um esboço da lógica em papel, depois transcrita a lógica para o programa e finalmente a transformação deste pseudocódigo em código funcional.

O que permitiu esta abordagem de construção de modelo é a presença de funções no código, onde é possível deixar chamadas de funções para futuras programações, facilitando a verificação. Algumas destas função estão descritas na seção 4.1.6 e no Apêndice 1.

Esta forma de programação facilita tanto a parte de verificação do código quanto diminui o volume programado diminuindo linhas desnecessárias evitando a repetição do código. Além destes benefícios, isto facilita a replicação do modelo programado para outros processos pois assim é necessário apenas rearranjar as funções conforme necessário.

Conforme a programação é desenvolvida, é inserido linhas de impressão em txt para acompanhamento da simulação. Onde é possível verificar os eventos e situação da simulação. Já que, conforme as funções são finalizadas é realizada a verificação do código.

4.2.4 Verificação do modelo de simulação

Na etapa de verificação, o principal objetivo é confirmar se o modelo de simulação está de acordo com o definido na definição do modelo. Considerando o modelo desenvolvido, a validação ocorre a medida de o simulador é programado conforme a seção anterior.

Para garantir a verificação do modelo de simulação cada uma das subdivisões é utilizada a metodologia *trace* (ou *debugger* ou depurador) verificando as alterações no sistema a cada avanço de tempo. Esta metodologia é aplicada somente para cada uma das operações ou função específica até o momento onde não é encontrado mais problemas.

A verificação foi dividida em etapas: primeiro foi verificado a lógica programada para cada uma das máquinas sem a presença de inspeções, panes, manutenções e trocas de ferramentas. Depois foi habilitado as funções à medida que o código começa a ser verificado, onde é utilizado o relatório da simulação gerado devido à grande quantidade de operações quando a simulação completa é realizada.

Para apoiar a validação a partir do relatório de simulação é criado uma planilha em Excel onde as primeiras colunas encontra-se o descritivo para cada linha de evento, seguida por uma coluna para cada operação onde verifica-se a sequência na(s) máquinas e inspeção e a quantidade de itens nos buffers, seguida por uma coluna com o tamanho do relógio de simulação para as operações e uma coluna para cada operador e condutor com a máquina alocado, a prioridade atual e a variável booleana se está em intervalo.

A etapa de verificação foi a parte mais desgastante pois o código precisou ser constantemente retrabalhado para aprimorar continuidade do código, que apresentava falhas advindas do detalhamento do processo simulado. O principal problema enfrentado é quanto a “esquecimentos” de algumas operações em decorrência do direcionamento do código orientado para menor tempo computacional.

4.2.5 Validação do modelo de simulação

Diferentemente da verificação, a validação tem como função determinar se o modelo computacional está representando o modelo real com a acuracidade desejada. Como o modelo de simulação proposto é considerado um *Digital Twin*

(Gêmeo Digital) da linha de produção estudada é possível validar o modelo aplicando Teste de Turing (ou validação *black-box*). Neste teste é realizada a comparação dos resultados de uma simulação com as mesmas entradas do real e verificado se é possível diferenciar entre eles, caso não seja possível, o modelo é validado.

Como entrada para a validação teve-se o histórico de uma semana de paradas de máquina e os parâmetros das operações, desabilitando a troca de ferramenta pois já está contemplada no histórico. Para uma boa análise comparativa foi realizada mais de uma simulação devido aos parâmetros aleatórios de entrada, onde a quantidade produzida foi similar ao real do período do histórico.

Caso o modelo não esteja válido é realizada uma análise no relatório de simulação mais completo descrito na seção anterior. Grande parte dos erros se deu através de diferenças de tempo de ciclo entre o real e o simulado. A partir do momento em que os parâmetros são ajustados o modelo foi validado.

4.2.6 Experimentos

Nesta etapa é definido: comprimento de cada simulação executada, duração do período de *Warm-up* (aquecimento), parâmetros de entrada e o número de execuções de simulação independentes usando diferentes números aleatórios para facilitar a construção de intervalos de confiança.

Cada simulação possui seis dias simulados, sendo que o primeiro é o período de *Warm-up*, isto é necessário pois no início da simulação a linha produtiva encontra-se sem produtos. Durante a validação do modelo é definido parâmetros padrão que correspondem a situação atual da linha produtiva. Estes parâmetros são utilizados também para os experimentos, com alteração nos parâmetros desejados.

Para contabilizar as simulações o número de replicações das simulações por instancia é definido em 140 a partir do cálculo de amostragem tendo como base as simulações da validação. Quanto as instâncias selecionadas para a realização das simulações, são desenvolvidas com base nos objetivos da seção 4.2.1, instancias presentes em ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Para os experimentos, é criado dois relatórios. O primeiro é um resumo dos eventos de cada simulação. O segundo é o resultado das simulações em um único arquivo, com informações de produtividade.

4.2.7 Análise de resultados

Law (2013) cita dos objetivos quanto aos dados de saída: determinar o desempenho do ambiente simulado com parâmetros de entrada igual ao real e comparar com versões alternativas do sistema.

Para facilitar a análise de resultados é criado dois relatórios com o resultado com contadores estatísticos presentes no modelo de simulação proposto. O primeiro é a descrição das ações de toda a simulação para cada uma das simulações. O segundo relatório é um compilado da produtividade e tempos de máquina parada por turno e geral.

Após a obtenção dos resultados das simulações é realizada extrações conforme necessárias para as análises. Extrações estas a partir de determinado grupo de instâncias, com resultados dos turnos ou gerais de cada simulação, sobre a produtividade geral ou sobre o histograma pré definido, ou pelos tempos totais por turno de operação com falta de peça ou saturação. Este histograma consiste em faixas de tempo de atravessamento dos itens que foi definido a partir das simulações de validação.

Como os relatórios estão em formato txt é criado uma planilha Excel para os resultados. Nela é possível comparar os resultados com as variações de parâmetros de entrada através da criação de gráficos e estatísticas comparativas. Para a representação de uma análise comparativa é escolhido o histograma e o *boxplot*. Histograma para representar o tempo de atravessamento das instancias e *boxplot* pois é possível verificar a variabilidade dos resultados das repetições das instancias e compará-las ao mesmo tempo.

4.2.8 Documentação e implementação

Como documentação tem-se a presente dissertação apresenta a metodologia para desenvolvimento, juntamente com os arquivos de código e dados de entrada. Quanto a implementação, é necessário que a empresa aprove as mudanças necessárias para as melhorias apresentadas.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a validação do modelo de simulação desenvolvido foi possível definir os valores dos parâmetros que melhor representam a linha produtiva. Valores estes que foram utilizados como base para as simulações dos diferentes cenários analisados. Como exemplos desses parâmetros podem ser citados os tempos das operações, valorização das prioridades para a tomada de decisão e demais parâmetros que no momento da definição das primeiras simulações não são relevantes.

O escopo das primeiras simulações foi definido a partir das prioridades dos gestores da fábrica, que dizem respeito a desejos e questionamentos existentes sobre a real capacidade da linha produtiva. A partir disto traçou-se dois principais alvos: o primeiro para melhor compreensão dos impactos dos modelos produzidos e o segundo para dimensionar as perdas produtivas em decorrência das panes.

Depois da definição das simulações é estabelecido um conjunto de instancias, cujos valores utilizados em cada parâmetro estão no QUADRO 3. Destaca-se que este quadro apresenta somente os parâmetros variantes entre as instâncias, ou seja, aqueles que possuem valores diferentes para cada uma das instâncias em relação aos valores base. No quadro cada linha representa uma instância e tem-se a quantidade de replicações das simulações em decorrência dos parâmetros de entrada aleatórios, assim como a configuração dos lotes de produção e das panes.

Vale destacar que os valores de parâmetros definidos para as simulações realizadas nesta dissertação representam um subconjunto parte de uma ampla possibilidade de análises. Desta forma, o potencial de utilização do modelo desenvolvido não é limitado pelos resultados apresentados na presente dissertação e os cenários aqui descritos representam as situações mais relevantes de análise segundo os gestores da fábrica.

A escolha da quantidade de replicações está descrita na seção 4.2.6. do capítulo anterior. Os asterisco presente em algumas instancias dizem respeito a uma segunda bateria de simulações com a alteração da quantidade de adaptadores que está melhor explicado na seção 5.1.1.

Ainda no QUADRO 3, os lotes estão descritos em quantidade de cada modelo onde a sequência de produção. Como exemplo, a sequência de produção da primeira instância é de 20 itens do Modelo 1, 44 itens do Modelo 2A e 68 itens do Modelo 2B.

QUADRO 3 – INSTÂNCIAS SIMULADAS

Quantidade replicações	Lotes			Panes	
	Modelo 1	Modelo 2A	Modelo 2B	Base	Tipo
140 + 140*	20	44	68		Sem
140 + 140*	20	0	0		Sem
140 + 140*	0	44	0		Sem
140 + 140*	0	0	68		Sem
140	20	44	68	Semana 1	Parcial
140	20	44	68	Semana 1	Completa
140	20	44	68	Semana 2	Parcial
140	20	44	68	Semana 2	Completa
140	20	44	68	Semana 3	Parcial
140	20	44	68	Semana 3	Completa

FONTE: A autora (2020).

As últimas informação presente no QUADRO 3 são referentes às configurações de panes, existindo duas possibilidades: ter ou não ter pane (Sem). Nas instâncias com a ocorrência de pane são definidos a semana da base de dados (Semana 1, 2 e 3) e o tipo de pane (completa ou parcial), onde a pane do tipo parcial não contém as paradas de máquinas induzidas de curta duração.

Conforme discutido nas seções 2.5.2 e 4.1.3, para as panes são recolhidos dados referentes a três semanas aleatórias do histórico de paradas de máquina, onde as panes fazem parte do tipo parcial. As panes do tipo completa apresentam as paradas induzidas, onde por objetivos variados necessitam verificar o interior das máquinas, aliadas ao histórico das panes do mesmo período.

Em cada replicação da simulação tem-se a simulação seis dias de produção, sendo um inteiramente de *warm-up*, já que se inicia com a linha sem produto. O tempo médio computacional de cada replicação é de aproximadamente 1 minuto. Os resultados obtidos são armazenados em dois arquivos: o primeiro sendo o descritivo dos eventos durante as replicações (instante inicial da ação, ação, operação, instante de finalização e operador se houver) e o segundo apresenta um resumo de todas as simulações: total produzido por turno, representação gráfica do histograma do tempo de atravessamento e tempo de operação parada (separando os resultados entre dois motivos: falta de peça e saturação).

5.1 SIMULAÇÕES SEM PANES E MANUTENÇÃO

Inicialmente, na presente dissertação, é realizada uma análise mais aprofundada das quatro primeiras instancias, considerando a ausência das panes em todas elas. As diferenças entre as instâncias estão nas configurações dos lotes: primeiramente é simulado com o lote padrão da fábrica e em seguida a produção é restringida a apenas um modelo (1, 2A e 2B) totalizando as 4 configurações.

O intuito é entender os diferentes impactos de cada modelo produzido na linha produtiva. Com isto, diferentes análises são realizadas para verificar os principais gargalos para cada um dos modelos assim como a produtividade máxima para cada um dos modelos. Primeiramente é analisado os tempos de máquina parada, seguido por produtividade e tempo de atravessamento para as instancias selecionadas. As três análises são apresentadas nas três seções seguintes desta dissertação.

5.1.1 Análise sobre o tempo de máquina parada

Na simulação o tempo de máquina parada se apresenta de duas formas: tempo de operação vazia e saturação. A primeira ocorre em decorrência da operação estar sem peça na máquina e a segunda da máquina estar com peça, mas sem espaço disponível no buffer da operação seguinte.

Para esta análise é recuperado do relatório das simulações a soma dos tempos de parada por operação por turno de cada dia de todas as replicações. Depois disto é criado um *boxplot* para cada uma das instancias, pois com este tipo de gráfico é possível visualizar a variação dos resultados decorrentes principalmente pelos parâmetros de entrada estocásticos. A intenção neste momento é identificar os principais gargalos da linha com os parâmetros imputados.

Mas é importante ressaltar que algumas características no processo produtivo interferem diretamente na análise destes resultados. Neste caso algumas operações se destacam: OP 100, 310, 515, 600, 720, 525, 800, as lavadoras (OP 150, 410 e 550) e as operações manuais (OP 100, 510, 545, 570, 600 e 800).

Como a linha produtiva possui fluxo empurrado e o tempo de ciclo da OP 100 é menor que o tempo da OP 120 é natural esta aparecer saturada. A operação 100 ficará vazia somente quando há falta de adaptador ou não há operador na operação.

Devido a lógica de movimentação da OP 310, que pode ter mais de uma posição na máquina, pode-se interpretar o tempo de saturação também como falta de peça. Isto ocorre pois quando há duas peças na operação, uma delas está no local de saída esperando o próximo item chegar, impedindo a saída do item da máquina. Assim, somente a partir deste momento o item é permitido a sair da máquina, considerando-se como saturação caso o item já tiver sido processado.

As operações 515, 600 e 720 possuem mais de um processo disposto em série, onde parte da operação é realizada em cada máquina da operação. Como por exemplo: a operação 600 possui três postos, sendo duas prensas em que cada uma delas prensa objetos em partes diferentes no produto e um posto onde é realizada uma inspeção e limpeza. Com base nisto é considerado falta de peça se não há peça em qualquer etapa da operação e saturação caso a última etapa apresenta saturação.

Como a OP 525 processa somente o Modelo 2, ela pode ficar um período considerável vazia quando há passagem do Modelo 1 pela operação. Outra consideração é que a saída dos itens dos Modelo 1 do buffer anterior a operação é prioritária em relação as máquinas.

Como as lavadoras (operação 150, 410 e 550) possuem diversas posições internas é menos provável estarem completamente vazias no caso da não existência de panes na linha.

A operação 800 possui tempo de ciclo menor se comparado as demais operações. Esse fato habilita o operador a realizar outras tarefas como abastecer a linha de pré montagem e fazer o retorno das peças segregadas na operação 720.

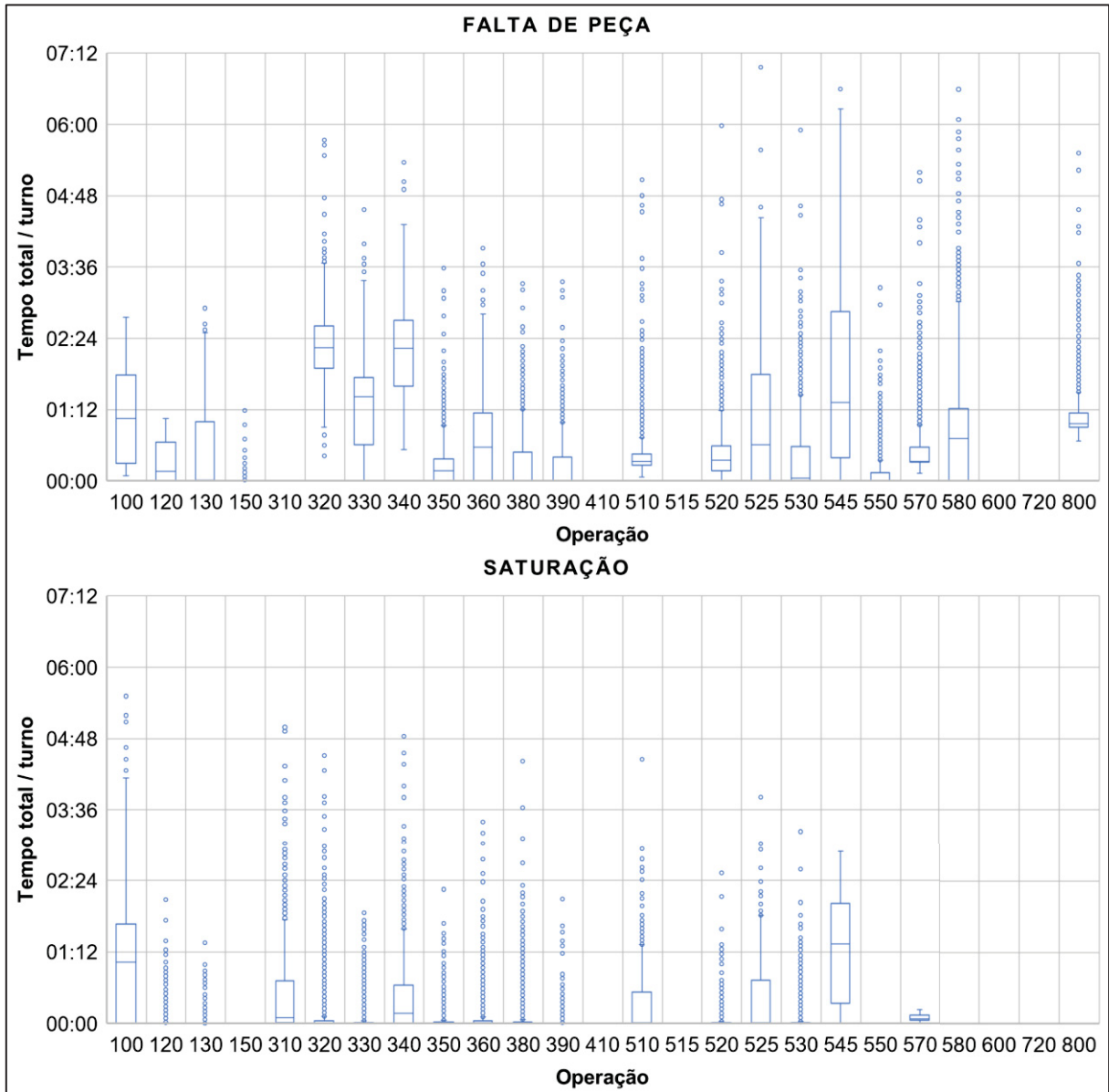
A variabilidade nos tempos totais se deve aos parâmetros estocásticos dos dados de entrada: quantidade faltante de itens a processar para a realização de inspeção visual e troca de ferramenta. Isto porque como o processo produtivo é sensível a paradas devido à alta produtividade, qualquer interrupção provoca alterações em toda a simulação.

Tamanho de lote padrão

A primeira simulação realizada possui como configurações: lote padrão e sem panes. Para analisar o tempo de máquina parada temos a FIGURA 16, onde é verificado a soma dos tempos por turno de cada dia por operação. Ao comparar os valores por operação da falta de peça com o tempo de saturação percebe-se que de

maneira geral as operações sofrem mais por falta de peça em confronto com a saturação.

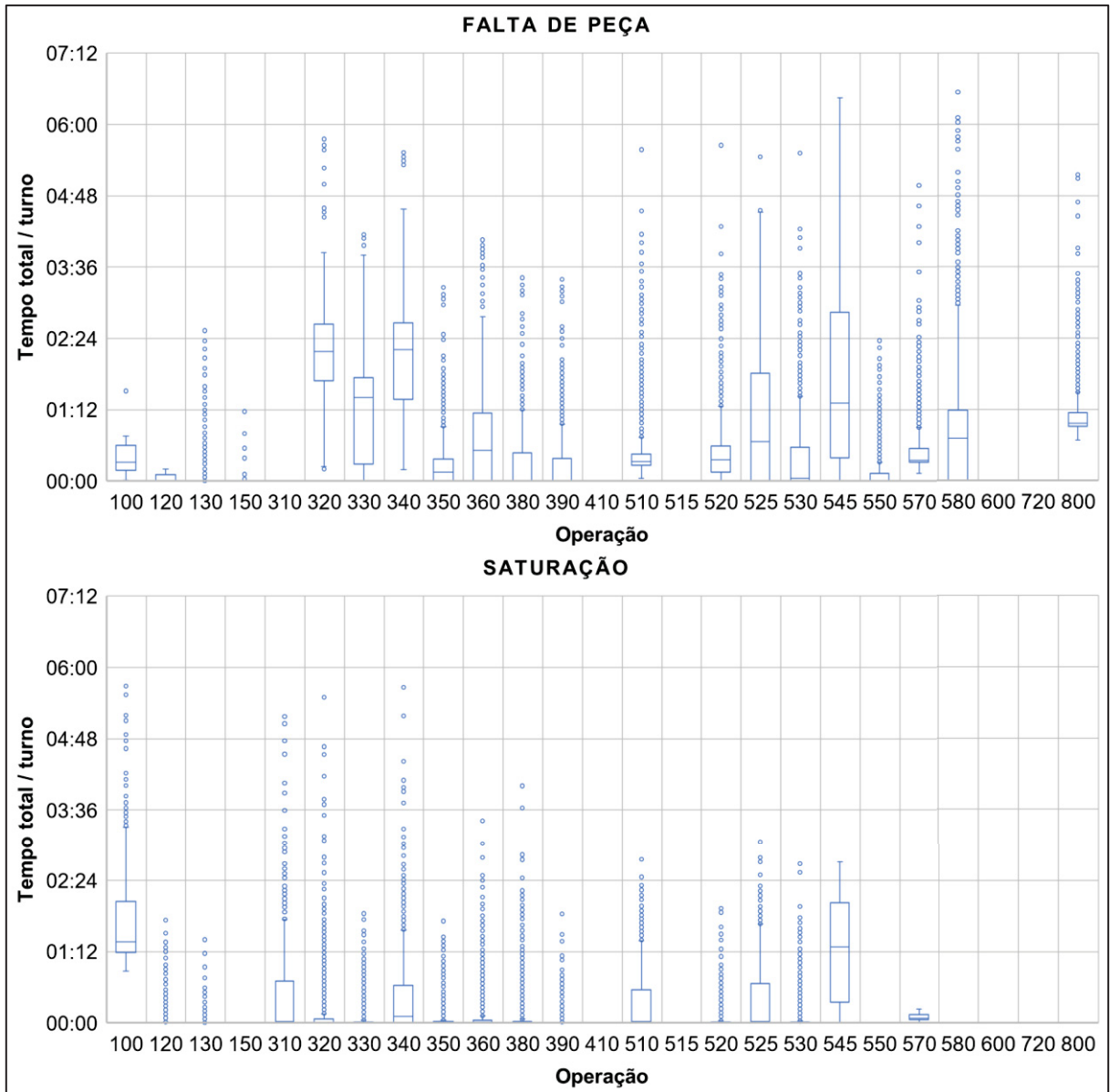
FIGURA 16 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (LOTE PADRÃO)



FONTE: A autora (2020).

Considerando que as operações no eixo horizontal da FIGURA 16 estão ordenadas da esquerda para a direita conforme o fluxo produtivo, é possível supor que há falta de adaptadores na linha pois há saturação na OP100 e após isto as saturações presentes são decorrências do fluxo conforme explicado no início da seção. Para verificar se a suposição é verdadeira são realizadas novas simulações com um número maior de adaptadores (resultados na FIGURA 17).

FIGURA 17 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (LOTE PADRÃO ESPECIAL)



FONTE: A autora (2020).

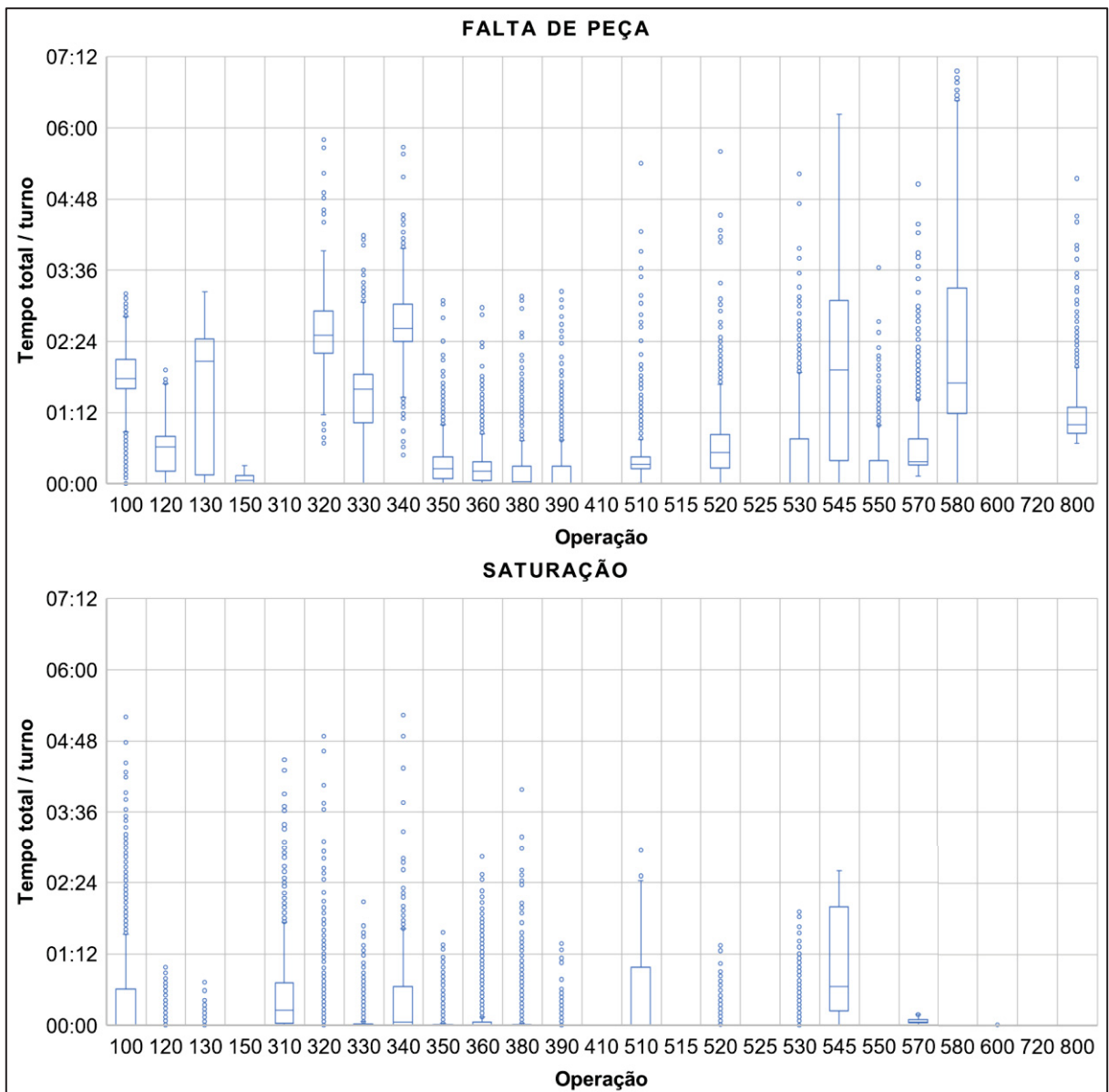
Comparando o resultado da FIGURA 17 com o gráfico da FIGURA 16 percebe-se que não há mudanças consideráveis uma vez que se duplicou a quantidade de adaptadores. O que invalida a hipótese de falta de adaptadores considerando apenas estas informações.

Com base nisto é possível identificar o principal gargalo com o mix padrão de produção como sendo a operação 310. O que pode ser justificado pois a operação apresenta o maior tempo de ciclo, juntamente com as operações 510, 600 e 720. Mas é a OP 310 que dita a velocidade de produção sem a presença de panes por ser a primeira desta lista.

Produção de um modelo

Para verificar o impacto de cada modelo a foi realizado simulações com somente um dos modelos sendo produzidos. Primeiramente é verificado, para o Modelo 1, o tempo de máquina parada conforme oa graficos *boxplot* da FIGURA 18.

FIGURA 18 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 1)

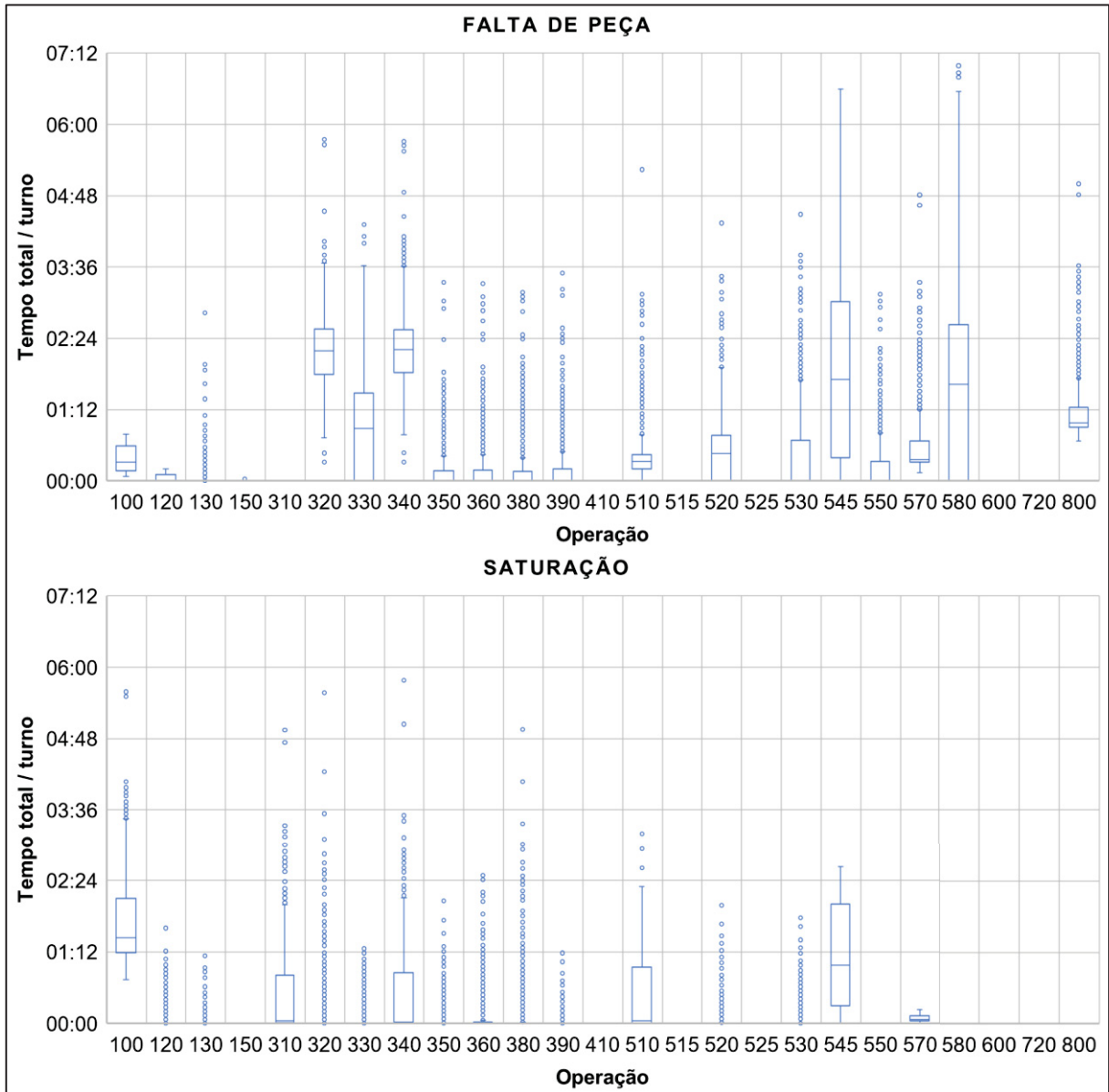


FONTE: A autora (2020).

A análise anterior para máquina parada para o Modelo 1 demonstrou possível falta de adaptador, que foi re-simulado com a adição de adaptadores extras com o

resultado na FIGURA 19. Assim como o lote padrão, não verifica-se diferença condizível nas paradas, descartando a ideia de falta de adaptadores do Modelo 1 através deste resultado.

FIGURA 19 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 1 ESPECIAL)

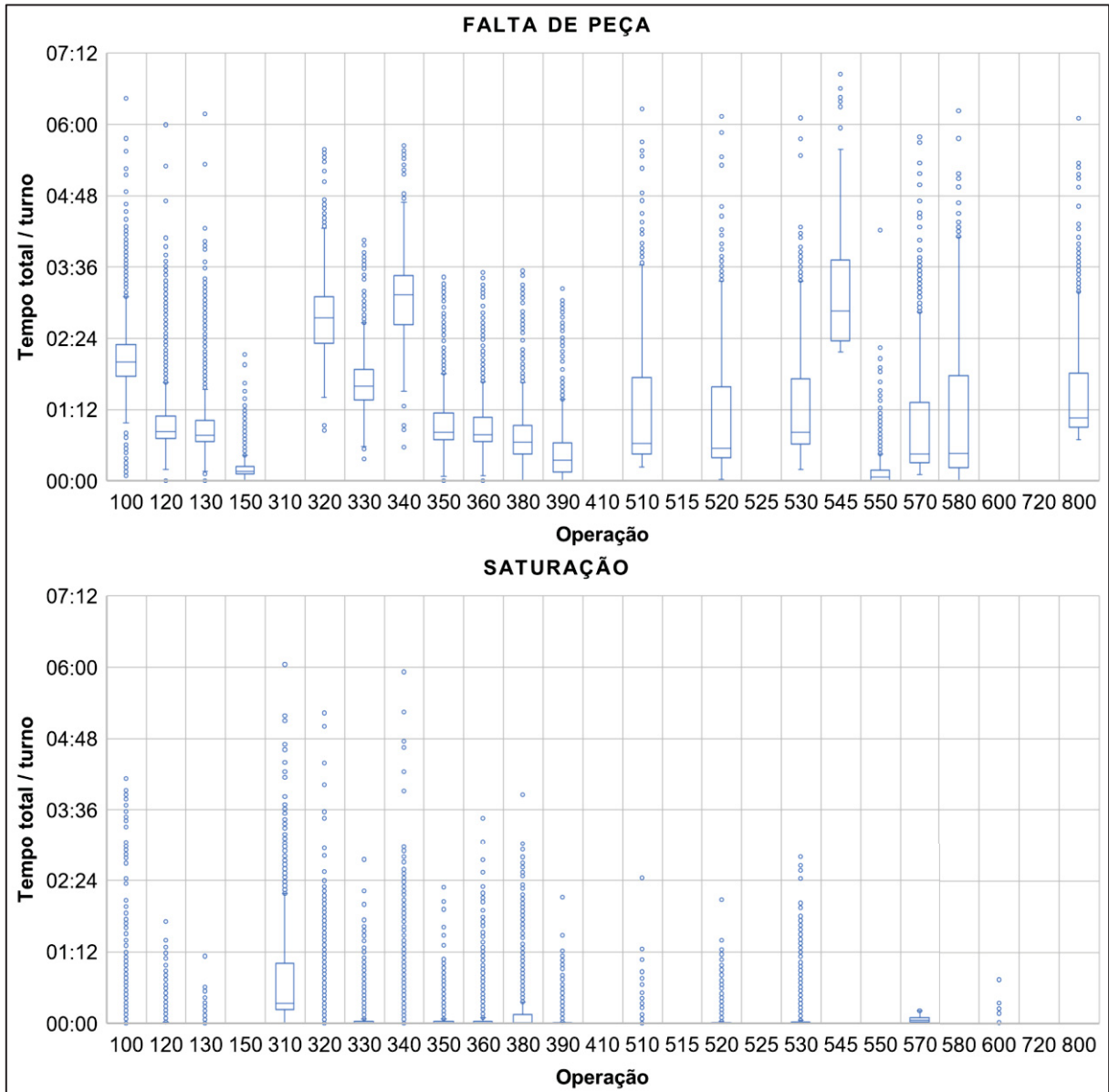


FONTE: A autora (2020).

O resultado para as simulações dos Modelos 2A e 2B quanto a tempo de parada são praticamente idênticos. Com base nisto, os resultados destas simulações são compilados em um único gráfico na FIGURA 20. Em comparação as figuras 16 e 18 nota-se que as operações elevaram consideravelmente o tempo de parada por falta de peça, aliando ao fato de praticamente não existir saturação na operação 100. Com isto em vista praticamente comprova a falta de adaptadores. Mas, a fim de

comprovação, também é realizado mais simulações com o acréscimo de adaptadores para o Modelo.

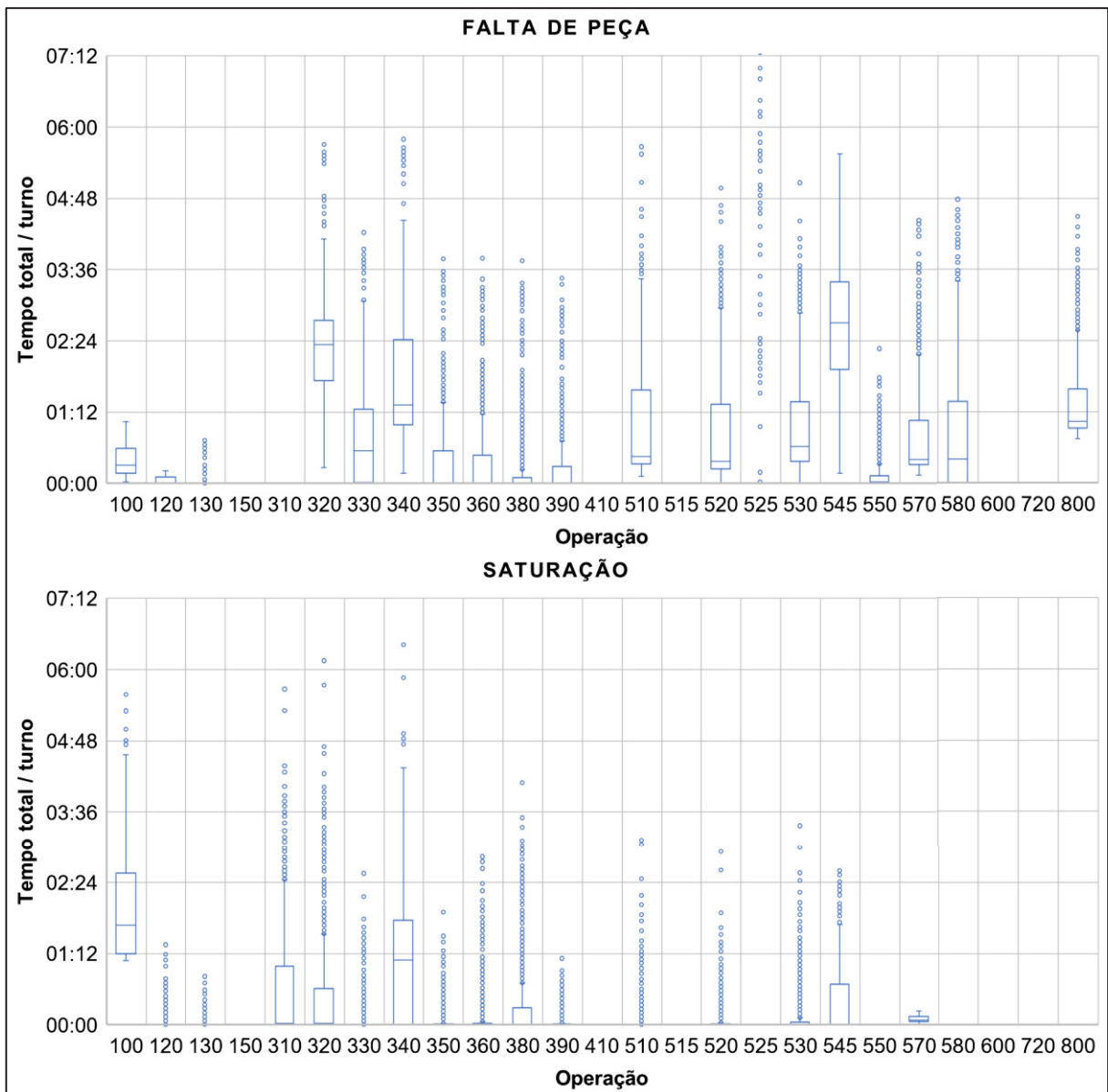
FIGURA 20 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 2)



FONTE: A autora (2020).

As simulações com mais adaptadores do Modelo 2 apresentaram melhor desempenho conforme a FIGURA 21. Porém a mudança não parece tão significativa ao comparar com os gráficos sem o acréscimo considerando apenas o tempo de máquina parada. Mas pode ser um indicativo de falta de adaptadores do modelo.

FIGURA 21 – TEMPO DE OPERAÇÃO PARADA (MODELO 2 ESPECIAL)



FONTE: A autora (2020).

Algo comum nas Figuras 17, 19 e 21 é o tempo elevado de saturação, isso acontece pois é a operação com maior valor para o tempo de ciclo, caracterizando um gargalo de produção. Em consequência disto e da não existência de panes nestas simulações a operação dita o ritmo de produção.

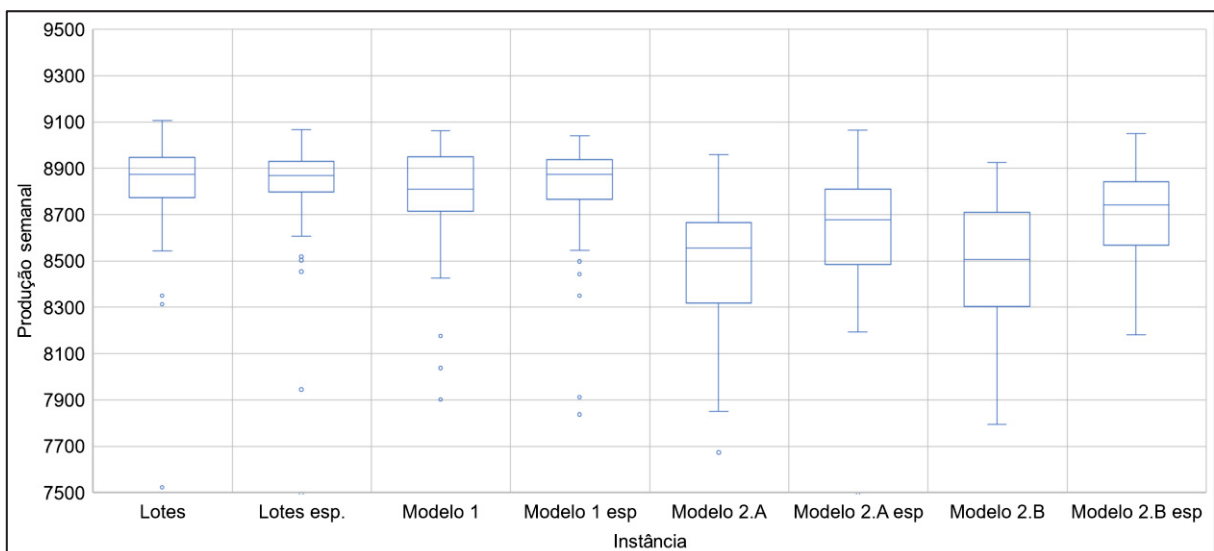
Juntamente a isto, o tempo por falta de peça nas operações seguintes é mais elevado. Mas esta característica auxilia a um melhor escoamento de produção na presença de panes, pois, uma vez que uma máquina posterior a OP 310 é interrompida é possível minimizar o impacto na produção devido ao menor tempo de ciclo desde que a saturação não comprometa a operação gargalo.

Uma vez que o gargalo de produção é a operação 310, as operações seguintes não deveriam apresentar a característica de saturação. Para esclarecer esta questão é verificado alguns relatórios mais detalhadamente, onde é possível verificar o impacto de cada evento da simulação. Sendo assim, verifica-se que a saturação ocorre majoritariamente devido à troca de ferramentas pois para que a operação se realize é necessário parar a máquina, liberando a mesma somente após a finalização da troca, o que pode ocasionar saturação da operação anterior e assim sucessivamente.

5.1.2 Comparação da produtividade das simulações

A fim de comparar a produtividade dos diferentes modelos produzido é feito um gráfico *boxplot* a partir da produtividade semanal das simulações (FIGURA 22). Os limites superiores das simulações foram praticamente idênticos para as instancias exceto para o Modelo 2 sem o acréscimo de adaptadores. Enquanto os limites inferiores do Lote padrão e do Modelo 1 apresentaram-se com pouca diferença, as simulações com o Modelo 2 apresentam uma diferença maior.

FIGURA 22 – PRODUTIVIDADE SEMANAL SEM PANE E MANUTENÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Ao analisar os tempos de máquina parada por troca de ferramentas percebe-se que as simulações com a produção somente com o Modelo 2 apresentam um

tempo total de parada maior. Isto se pois o Modelo 2 possui 101 ferramentas presentes na linha enquanto o Modelo 1 possui somente 66, o que representa em torno do dobro de trocas de ferramentas em termos do ciclo de vida de cada uma delas.

Já a variação da quantidade produzida por este modelo se deu pois ao iniciar a simulação é gerado valores aleatórios para a quantidade de ciclos restantes para cada ferramenta, e como o Modelo 2 apresenta uma maior quantidade também apresenta maior variabilidade, pois com este aleatório pode ter pouquíssimas trocas para realizar assim com todas as trocas.

Quanto à quantidade de adaptadores, para o Modelo 1 não é necessário aumentar a quantidade. Já para o Modelo 2 é possível que haja algum benefício com a compra de novos adaptadores, mas isto não é certo uma vez que a linha produtiva possui muitas paradas não programadas e o custo desta compra não seja compensado com os ganhos.

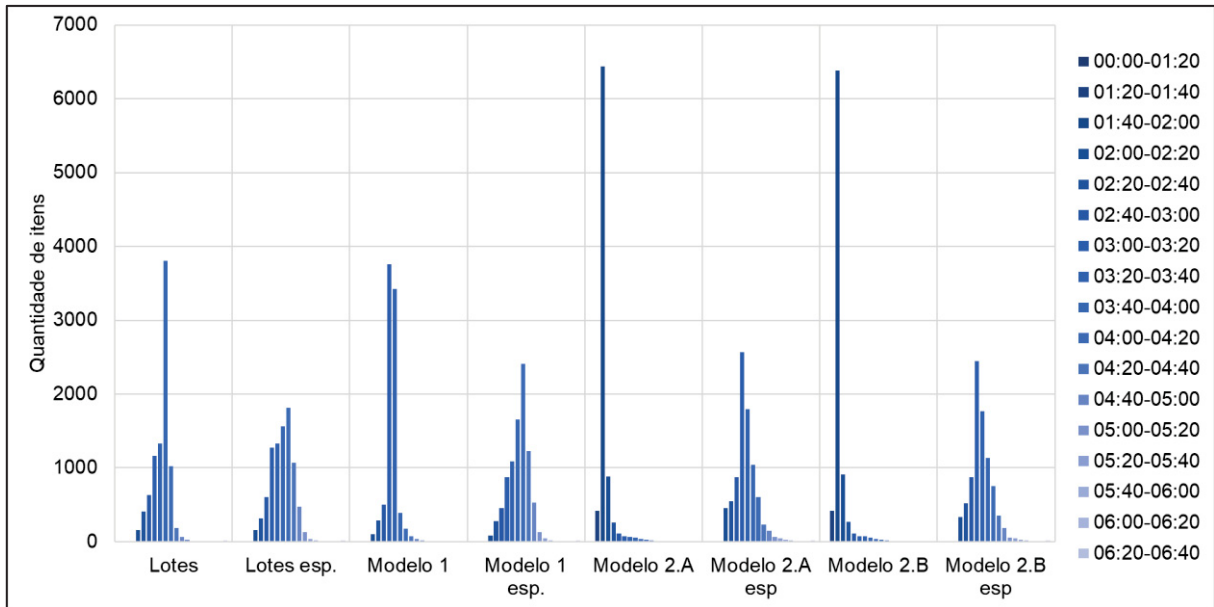
Outra análise a partir destas simulações é a relação entre o tempo de ciclo da linha e a quantidade produzida, uma vez que considerando somente o tempo de ciclo das operações é produzido em torno de 10080 peças por semana. A partir dos resultados das simulações sem paradas não previstas a produtividade máxima (OEE¹⁴) é de 89%. Isto se deve principalmente pelas movimentações das operações (portais, esteiras...).

5.1.3 Tempo de atravessamento

A última análise com relação aos modelos produzidos é quanto ao tempo de atravessamento, ou seja, o tempo que uma peça demora entre a primeira operação e a última operação da linha. Para facilitar esta análise foi criado uma escala depois da validação, onde foi feito um histograma a partir do relatório de eventos. A partir deste relatório se determinou os valores para o histograma para as futuras simulações, onde à medida que os itens são finalizados na última operação é acrescido o valor de 1 no contador conforme a escala do histograma. Como resultados destas simulações temos o gráfico da FIGURA 23.

¹⁴ OEE: indicador de efetividade global de um equipamento (*Overall Equipment Effectiveness*) calculado a partir da formula: $OEE = \text{disponibilidade} * \text{qualidade} * \text{performance}$.

FIGURA 23 – TEMPO DE ATRAVESSAMENTO SEM PANE E MANUTENÇÃO



FONTE: A autora (2020).

No gráfico verifica-se que um item é capaz de atravessar toda a linha produtiva em menos de 2 horas. O que reforça a importância de possuir paradas de máquina de menor duração na linha produtiva, principalmente nas operações com uma única máquina ou em portais.

Outro ponto a ser observado no gráfico é quanto a dispersão dos histogramas, onde as simulações com o acréscimo de adaptadores apresentam-se mais dispersos em comparação as simulações com a quantidade original. Ao comparar os relatórios de eventos das simulações percebe-se que de maneira geral as simulações com mais adaptadores possuem os buffers entre operações mais cheios. Com isso aumentando o tempo de atravessamento, mas não necessariamente impactando em quantidade produzida.

5.2 PANES

A segunda parte das simulações é sobre o impacto das panes¹⁵ na linha produtiva. Para isso é selecionado aleatoriamente três semanas do histórico

¹⁵ Panes: Paradas de máquina devido algum mal funcionamento, que impede a produção na mesma. Este mal funcionamento pode ser quebra de ferramenta, colisão dos mais variados tipos, problema no software da máquina...

disponibilizado pela empresa (S1, S2 e S3). A partir dos dados coletados é retirada as paradas de máquina já contempladas na simulação como a troca de ferramentas, manutenção e falta de peça ou saturação.

Como esta análise foi impulsionada pelo desejo de verificar o impacto das paradas induzidas de curto período cada semana selecionada recebe a variação dela com a retiradas destas paradas (S1, S2 e S3) enquanto as semanas S1C, S2C e S3C contemplam estas paradas induzidas.

No QUADRO 4 tem-se as principais diferença do histórico das panes. Onde visualiza-se que a S1 possui a maior quantidade (36215), mas também apresenta a média das panes com maior duração menor (01:55:26). A S2 que possui a segunda maior quantidade de paradas, mas possui o maior tempo total de panes (25 12:34) considerando a soma do tempo para todas as máquinas, o que indica que há mais panes longas se comparado a S1. Já a semana três apresenta o menor tempo total de paradas (13 07:02), mas apresenta a maior média as 20 paradas de maior duração (05:30:45).

QUADRO 4 – CARACTERISTICAS GERAIS DAS PANES

Instancia	Geral				Imp. fluxo		
	Qnte	Duração Total	Média	Média Top 20	Qnte	Duração Total	Média
S1	2845	8 09:44	00:04:15	01:55:26	1067	2 09:50	00:03:15
S1 C.	36315	13 15:27	00:00:32	01:55:26	32295	7 04:50	00:00:19
S2	1752	22 02:39	00:18:10	03:17:29	591	8 04:36	00:19:58
S2 C.	23212	25 12:34	00:01:35	03:17:29	20947	11 10:39	00:00:47
S3	1307	10 17:15	00:11:49	05:30:45	477	2 18:28	00:08:22
S3 C.	18844	13 07:02	00:01:01	05:30:45	17618	5 06:08	00:00:26

FONTE: A autora (2020).

Ainda analisando o QUADRO 4 percebe-se nas ultimas três colunas os dados das panes que impedem o fluxo, ou seja, panes que acontecem em operações de máquina única ou em portais¹⁶ ou esteiras, o que impede a passagem dos itens para as próximas operações. Percebe-se que a duração média é menor se comparado a média geral, isto ocorre, pois, os técnicos e condutores priorizam este tipo de parada.

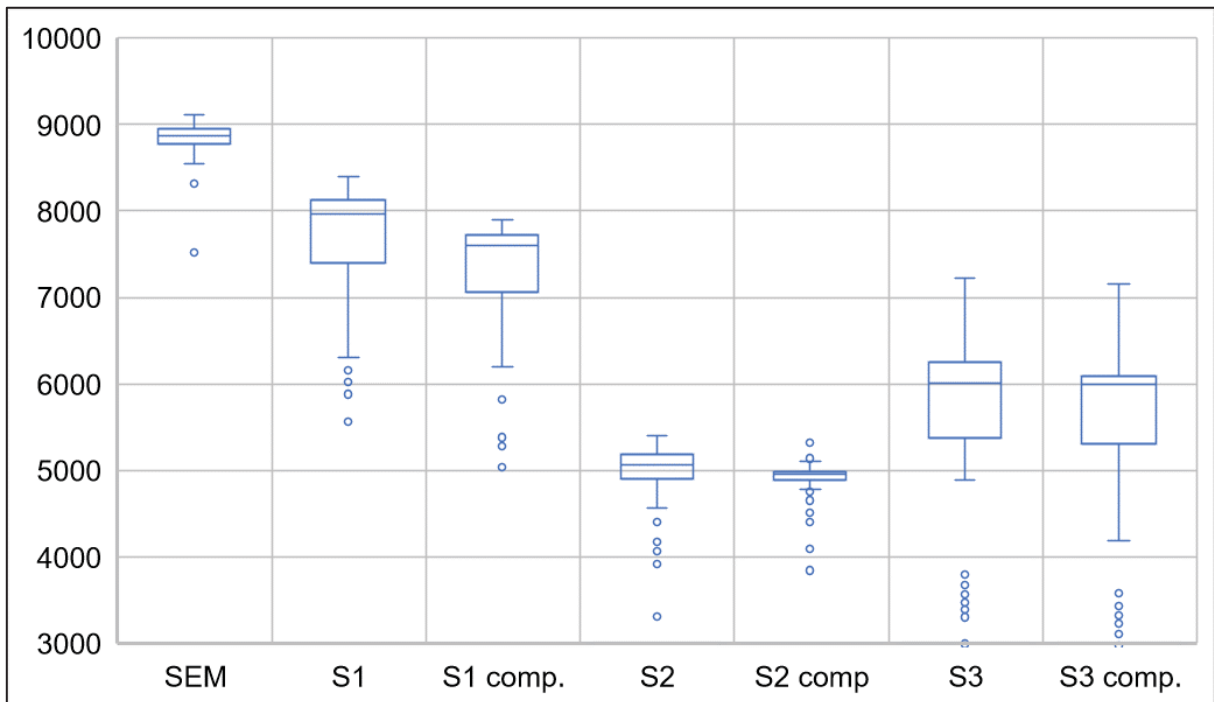
¹⁶ Portal: Estrutura responsável pela movimentação das peças nas máquinas múltiplas, realizando as movimentações entre os buffers e as máquinas

Diferentemente das outras paradas que pode demorar um pouco para que alguém se disponibilize para a averiguação e correção.

No Apêndice 2 encontra-se um resumo sobre cada uma das panes selecionadas e das extrações delas. Onde é possível visualizar com mais detalhes a quantidade e os tempos de panes por máquina e por período.

Como resultados destas simulações temos a FIGURA 24 e a FIGURA 25, onde a primeira mede a produtividade das instâncias através de um *boxplot*, enquanto a segunda verifica-se o tempo de atravessamento para as simulações considerando o histórico de panes selecionado.

FIGURA 24 – PRODUTIVIDADE COM PANES



FONTE: A autora (2020).

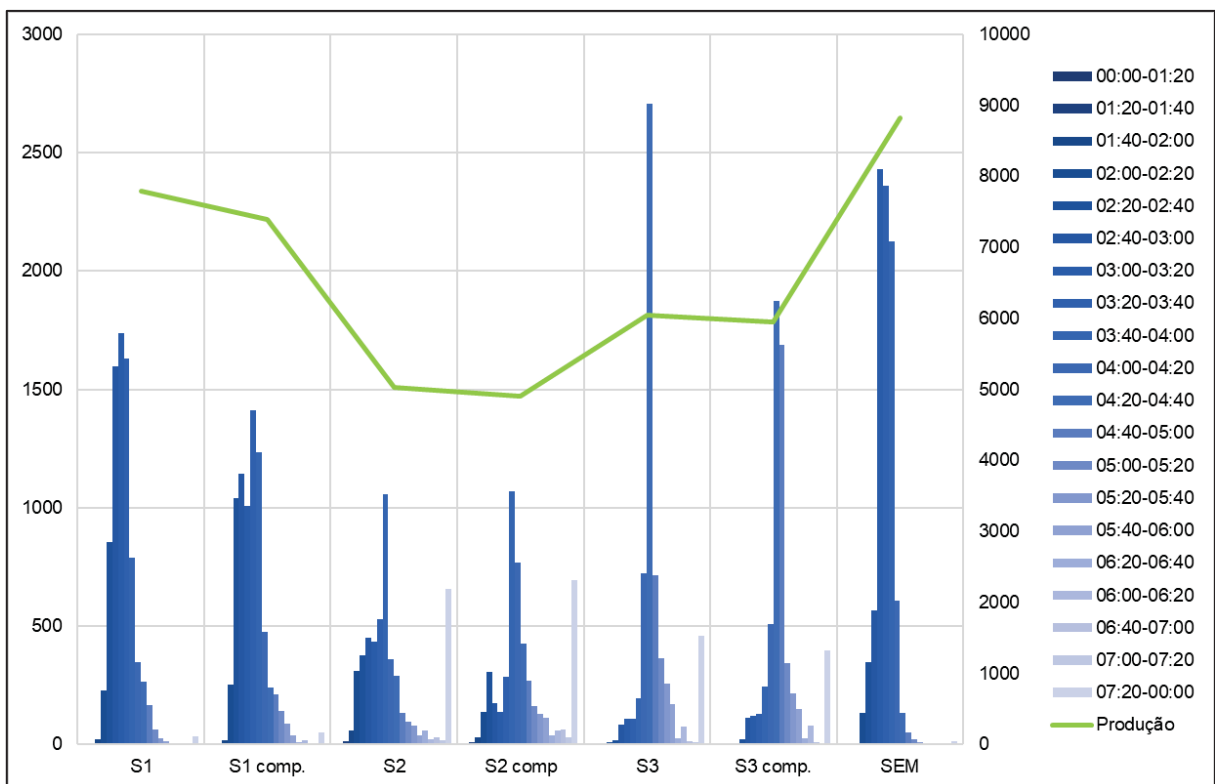
A FIGURA 24 trás a produtividade semanal de cada uma das semanas (S1, S2 e S3) juntamente com uma semana sem pane a fim de comparação. Como esperado as simulações com pane apresentaram produtividade menor se comparadas sem as paradas em até 60%. Além disto, a produtividade da S1 foi maior que a S3 e S2 respectivamente pois é a semana que apresenta menor tempo das panes longas, destacando a importância de uma rápida solução das paradas.

Comparando as simulações com panes parciais e completas da FIGURA 24. Verifica-se que as simulações com as panes parciais apresentaram limite superior

similar as simulações com as panes completas das respectivas semanas. Exceto para a S1 provavelmente pois é a semana que apresenta maior diferença entre o tempo total da S1 e S1 completa. Também há uma melhora do limite inferior indicando melhor produtividade principalmente na S3, isso se deve em parte pela distribuição destas panes nas máquinas conforme o Apêndice 2.

Na FIGURA 25 há os tempos de atravessamentos para as simulações desta seção. Destaca-se a quantidade de itens que demoram mais de 7:20 para finalizar a produção para as semanas S2 e S3, isto porque elas apresentam a maior média das maiores durações de parada de máquina, o que impede o fluxo por períodos longos e como consequência aumenta o tempo de atravessamento.

FIGURA 25 – TEMPO DE ATRAVESSAMENTO COM PANES



FONTE: A autora (2020).

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se a operações em parte dos parâmetros do modelo. Mas já são importantes para demonstrar qual tipo de resultados podem ser obtidos a partir de um Gêmeo Digital e a importância para o auxílio para a tomada de decisão. Além disso, é possível realizar diversas outras

simulações alterando os parâmetros existentes sem a necessidade de alterar o modelo de simulação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Indústria 4.0 aliada diversas tecnologias buscam, entre outras coisas, melhorar a competitividade, produtividade e otimização de processo de fabricação. Uma ferramenta que pode auxiliar com relação a estes objetivos é a simulação. Que com o aumento exponencial de dados e avanços computacionais permitiu-se respostas em intervalos de tempo menores e com mais precisão.

A simulação nos permite avaliar diferentes cenários, otimizar a produção e a qualidade do produto. Se mostrando uma ferramenta que pode entregar resultados satisfatórios para problemas complexos, sem a necessidade de simplificação exagerada do problema como em algumas aplicações de métodos algébricos puros.

A presente dissertação trouxe um estudo de caso onde foi desenvolvido um simulador computacional como ferramenta da Indústria 4.0. Modelo este com base em uma linha produtiva de configuração *Flow Shop* flexível de uma indústria automotiva.

O modelo foi desenvolvido inteiramente em linguagem de programação *c#* onde é simulado todo o fluxo produtivo desde a entrada do produto na linha até a saída na última operação. Além disto, também é simulado as inspeções de qualidade, as paradas de máquina não planejadas (panes), as manutenções preventivas, as trocas de ferramentas frequências e a mão de obra presente na linha. O simulador pode ser classificado como um Gêmeo digital pois ele reflete todo o processo produtivo estudado.

A programação do simulador foi realizada de forma que seja possível adaptá-lo para outros processos que possuam características semelhantes. Características quanto a um fluxo único de produção, presença ou não de operadores, inspeções... conforme descritas na metodologia.

As etapas mais desgastantes da criação do simulador foram a verificação e validação (mais da metade do período de desenvolvimento). Isto porque, utilizando linguagem de programação e não um programador, não há a parte visual do processo, sendo necessário utilizar outros métodos. Além disto, quanto se utiliza linguagem de programação é necessário se preocupar com coisas como o relógio da simulação e o fluxo de informações. Junto na etapa de validação foram identificados parâmetros base que melhor identificam a situação atual da linha produtiva.

Ao fazer uma análise quanto a ferramenta de simulação não há arrependimento. Como o objetivo é a implementação online como ferramenta da

Industria 4.0, o processo é compensado por menor tempo computacional e a implementação mais simples pois o simulador consiste em um código de simples acesso. Quanto a falta de visualização do processo durante a simulação, uma vez implementado a ferramenta não é mais necessária pois o que interessa é o resultado em si (distribuição de tarefas).

Para testar a ferramenta foi realizada uma consulta com os gestores da linha produtiva para elencar prioridades para as simulações, com base nos questionamentos e desejos existentes sobre a capacidade da linha produtiva. Com base nisto foi estipulado um plano de simulações, onde primeiramente foi verificado os impactos dos diferentes modelos produzidos na linha e depois dimensionado as perdas produtivas em decorrência das panes.

Quanto aos diferentes modelos produzidos, verificou-se uma possível falta de adaptadores¹⁷ para o Modelo 2. Nestas mesmas simulações constatou-se o gargalo da Operação 310 que mesmo não sendo o único com o tempo de ciclo mais alto, é esta operação dita o ritmo de produção. Como estas simulações foram realizadas sem a presença de paradas de máquinas não programadas, verificou-se que a linha produtiva atinge uma produtividade máxima de 89% considerando o cenário atual.

Já as simulações para o dimensionamento das perdas em decorrência das panes constatou, com base nos dados de entrada escolhidos, que a produtividade pode cair em até 60%. Outra variação que as panes provocam ao funcionamento da linha produtiva é quanto ao tempo de atravessamento, que pode aumentar consideravelmente em decorrência das panes de longa duração.

Para resultados obtidos foram alterados parte dos parâmetros do modelo, com a possibilidade de novos estudos com diferentes variações. Como por exemplo: analisar o impacto de possíveis diminuições no tempo de ciclo das operações gargalo atuais; verificar os impactos em indicadores de produtividade e OEE se diminuir a quantidade e/ou a duração e/ou intervalo das panes; testar alterar as habilitações e responsabilidades dos operadores e condutores; verificar se há impacto de alguma forma se alterar a lógica de saída da mão de obra para os intervalos longos; e testar diferentes capacidades para os buffers presentes entre as operações.

¹⁷ Adaptadores: Instrumento utilizado na linha produtiva, que acompanha individualmente os itens de cada modelo desde a primeira até a última operação.

A escolha da tomada de decisão ser quanto a alocação da mão de obra se deu ao fato de a linha produtiva possuir menos pessoas no processo em comparação ao número de operações (10/27), não sendo possível atender todas as operações ao mesmo tempo. Sendo assim, é necessário priorizar as ocorrências de parada de máquina visando o menor impacto possível em produtividade. Esta decisão com base no feeling nem sempre é o melhor dos cenários, pois há diversos critérios a serem considerados para tal decisão.

O simulador desenvolvido para esta dissertação já consegue dar um direcionamento quanto as prioridades, de acordo a quantidade de máquinas, disponibilidade nos buffers e operações gargalo. Mas é mais interessante que, para cada cenário, se consiga visualizar as consequências produtivas das possíveis decisões. Para isto seria necessário introduzir a ferramenta de forma a fazer sugestões de forma online. Caso seja o interesse, é necessário investimentos e adaptações no simulador e na linha produtiva.

Primeiramente seria necessário criar uma forma de comunicação entre o simulador e as pessoas, que pode ser através de um computador ou até mesmo sugestões direcionadas para cada pessoa através de algum aparelho de uso pessoal. Além disto, criar uma forma de comunicação entre o sistema fabril e o simulador para que os dados de parada de máquina, inspeções e trocas de ferramentas sejam disponibilizados.

Já para a implementação online do Gêmeo digital são necessárias algumas adaptações no simulador quanto a entrada dos parâmetros, aquecimento, tomada de decisão e tempo simulado. Além disto é necessário criar uma rotina para reiniciar as simulações com novos dados de entrada, eu sugiro que seja a cada nova máquina parada ou liberação de uma máquina que estava parada.

Quanto a entrada de parâmetros é necessário que o simulador receba os itens que estão na linha juntamente com a posição de cada um, assim como uma descrição da situação das maquinas, identificando a contagem dos contadores de inspeção e troca de ferramenta assim como as maquinas que estão paradas e uma previsão da duração de intervenção e identificação da mão de obra necessária (condutor ou técnico).

Nas simulações realizadas para a presente dissertação iniciavam com a linha vazia e com os contadores com valores aleatórios, isto seria substituído pela situação

da linha no instante do início da simulação, não necessitando mais o período de aquecimento.

Neste momento a tomada de decisão não precisa mais ser com base em prioridades uma vez que o próprio sistema faz sugestões para os condutores e eventualmente aos técnicos. Com isto, esta parte pode ser reformulada, onde as simulações testam diferentes posições para os condutores e técnicos com base nos dados de entrada, buscando maximizar a produção. Uma vez que se chega em uma solução ideal e ainda há condutores e/ou técnicos disponíveis realiza-se novas simulações para propor manutenções buscando minimizar as perdas. Nestas simulações não há mais a necessidade de simular uma semana inteira, o interessante seria fazer testes para chegar em um bom período, mas acredito que não precise ser mais de um turno (8 horas).

De maneira geral, este trabalho contribui de maneira a identificar uma metodologia de criação de um simulador de aplicação em uma linha protetiva. Assim como identificar o potencial da ferramenta e uma estratégia de implementação.

REFERÊNCIAS

- ALMEDER, C.; HARTL, R. F. A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer. **International Journal of Production Economics**, v. 145, n. 1, p. 88–95, 2013.
- ALRABGHI, A. Simulation based optimization frameworks as key enablers for the transformation to industry 4.0. **Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE**, v. 2018-Decem, n. April, p. 0–6, 2018. Curran Associates Inc. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061297725&partnerID=40&md5=8159e29d4254fa61e90149f6c80eb03b>>. .
- AMIRI, F.; SHIRAZI, B.; TAJDIN, A. Multi-objective simulation optimization for uncertain resource assignment and job sequence in automated flexible job shop. **Applied Soft Computing Journal**, v. 75, p. 190–202, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.015>>. .
- AUFENANGER, M.; DANGELMAIER, W.; LAROQUE, C.; RUNGENER, N. Knowledge-based event control for flow-shops using simulation and rules. **Winter Simulation Conference**, p. 1952–1958, 2008.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. 1998.
- CARSON, Y.; MARIA, A. Simulation optimization: methods and applications. **Winter Simulation Conference**, p. 118–126, 1997.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicação**. 4º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações**. 2º ed. São Paulo: Atlas SA, 2010.
- DALENOGARE, L. S.; BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, n. July, p. 383–394, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>>. .
- ESTEBAN, J.; HANDL, J.; XU, D. Integrating meta-heuristics , simulation and exact techniques for production planning of a failure-prone manufacturing system. **European Journal of Operational Research**, v. 266, n. 3, p. 976–989, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.062>>. .
- FRAGA-LAMAS, P.; FERNANDEZ-CARAMES, T. M. A Review on Blockchain Technologies for an Advanced and Cyber-Resilient Automotive Industry. **IEEE ACCESS**, v. 7, p. 17578–17598, 2019.
- FREITAS FILHO, P. J. DE. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. 2º ed. Florianópolis: Visual Bools, 2008.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0**. New York: Springer, 2016.

JUNGWATTANAKIT, J.; REODECHA, M.; CHAOVALITWONGSE, P.; WERNER, F. A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 2, p. 358–378, 2009.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBING, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Forschungsunion, 2013.

KAR, B. C.; PANDA, A.; KUMAR, R.; SAHOO, A. K.; MISHRA, R. R. Research trends in high speed milling of metal alloys: A short review. **Materials Today: Proceedings**, , n. xxxx, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.559>>. .

KELTON, W. D. **Simulation with Arena**. 2^o ed. McGraw-Hill, 2002.

KIANFAR, K.; GHOMI, S. M. T. F.; JADID, A. O. Study of stochastic sequence-dependent flexible flow shop via developing a dispatching rule and a hybrid GA. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 25, n. 3, p. 494–506, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2011.12.004>>. .

KUMAR, S.; PUROHIT, B. S.; MANJREKAR, V.; SINGH, V.; LAD, B. K. Investigating the value of integrated operations planning: A case-based approach from automotive industry. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 22, p. 6971–6992, 2018. Taylor and Francis Ltd. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1424367>>. .

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5^o ed. Ney York: McGraw-Hill, 2013.

LEUNG, J. Y.-T. **Handbook of Scheduling: Algorithms, models, and performance analysis**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004.

LOPEZ, P.; ROUBELLAT, F. **Production scheduling**. WILEY, 2008.

MAKAROVA, I.; SHUBENKOVA, K.; BUYVOL, P. Intellectualization of the management processes at the enterprise of automotive industry. **Proceedings of the International Conference on Geoinformatics and Data Analysis - ICGDA '18**, p. 177–181, 2018. New York, New York, USA: ACM Press. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3220228.3220257>>. .

MOUELHI-CHIBANI, W.; PIERREVAL, H. Training a neural network to select dispatching rules in real time. **Computers and Industrial Engineering**, v. 58, n. 2, p. 249–256, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.03.008>>. .

MOYNIHAN, G. P. Expert systems in foundry operations. **Knowledge-Based Systems**. v. 4, p.1273–1292, 2000. Alabama: ACADEMIC PRESS.

MUHURI, P. K.; SHUKLA, A. K.; ABRAHAM, A. Industry 4 . 0 : A bibliometric analysis

and detailed overview. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 78, n. September 2018, p. 218–235, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>>. .

NAYAK, V. C.; RAMESH, M. R.; DESAI, V.; SAMANTA, K. Fabrication of stainless steel based composite by metal injection moulding. **Materials Today: Proceedings** **5**, v. 5, n. 2, p. 6805–6814, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.340>>. .

PEGDEN, C. D. Advanced tutorial: Overview of simulation world views. **Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference**, p. 210–215, 2010. IEEE.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. 5^o ed. SPRINGER, 2016.

POLENGHI, A.; FUMAGALLI, L.; RODA, I. Role of simulation in industrial engineering: focus on manufacturing systems. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 496–501, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318314927>>. .

RIBAS, I.; LEISTEN, R.; FRAMINAN, J. M. Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. **Computers and Operation Research**, v. 37, n. 8, SI, p. 1439–1454, 2010. Oxford: Pergamon - Elsevier Science LTD.

ROY, R. B.; MISHRA, D.; PAL, S. K.; et al. Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 9–10, p. 3691–3714, 2020. Springer. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084031553&doi=10.1007%2Fs00170-020-05306-w&partnerID=40&md5=9378449a6a3991d4a7cd18ffc58ae6e9>>. .

SAKR, A. H.; YACOUT, S.; BASSETTO, S. A discrete event simulation logic for semiconductor production planning and control within industry 4.0 paradigm. **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, p. 172–182, 2019. IEOM Society. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079280461&partnerID=40&md5=82070fb16ee82b00635b902f98a2eba2>>. .

SALAMA, S.; ELTAWIL, A. B. A Decision Support System Architecture Based on Simulation Optimization for Cyber-Physical Systems. (W. L., Org.) **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 1147–1158, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978918308278>>. .

SANTOS, C. H. DOS; DE QUEIROZ, J. A.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B. Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. **Journal of Simulation**, v. 00, n. 00, p. 1–14, 2020. 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OR14 4RN, OXON, ENGLAND: TAYLOR & FRANCIS LTD. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17477778.2020.1811172>>. .

SILVA, S.; REIS, V.; MORAIS, A.; et al. A comparison of production control systems

in a flexible flow shop. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1090–1095, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.169>>. .

STEARNS, P. N. **The Industrial Revolution in World History**. 4^o ed. New York: Perseus Books Group, 2012.

TSOURMA, M.; ZIKOS, S.; DROU, A.; TZOVARAS, D. Online task distribution simulation in smart factories. **2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)**, v. 2018-Janua, p. 1–6, 2018. IEEE. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8355301/>>. .

TURKER, A.; AKTEPE, A.; INAL, A.; et al. A Decision Support System for Dynamic Job-Shop Scheduling Using Real-Time Data with Simulation. **Mathematics**, v. 7, n. 3, p. 278, 2019. MDPI AG. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-7390/7/3/278>>. .

UHLEMANN, T. H.-J. T. H.; SCHOCK, C.; LEHMANN, C.; FREIBERGER, S.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 113–120, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>>. .

WENG, W.; FUJIMURA, S. Control methods for dynamic time-based manufacturing under customized product lead times. **European Journal of Operational Research**, v. 218, n. 1, p. 86–96, 2012. PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS: ELSEVIER SCIENCE BV. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-83955162304&doi=10.1016%2Fj.ejor.2011.10.014&partnerID=40&md5=aa7b844a16edcf86916924c85766005d>>. .

WEYER, S.; MEYER, T.; OHMER, M.; et al. Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 31, p. 97–102, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85012920563&doi=10.1016%2Fj.ifacol.2016.12.168&partnerID=40&md5=7bbbed1f2237d571e604f7c2a5f3595d6>>. .

YU, A. J.; SEIF, J. Minimizing tardiness and maintenance costs in flow shop scheduling by a lower-bound-based GA. **Computers & Industrial Engineering**, v. 97, p. 26–40, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.024>>. .

GLOSSÁRIO

Acumuladores estatísticos ou contadores estatísticos: para verificar a performance, onde acumula-se resultados durante a simulação, como por exemplo, quantidade produzida, soma dos tempos de espera em filas, maior tempo em uma fila, maior tempo de uma entidade no sistema.

Atributos: São as características das entidades, exemplo: prioridades, cor, data de entrega. Serve para conseguir diferenciar uma entidade da outra.

Entidades (*Entities*): São os objetos dinâmicos a serem simulados e que usualmente sofrem ações durante a simulação. Grande parte das entidades são representações de objetos/pessoas reais na simulação, como itens a serem processados em uma fabricação e pessoas em atendimento em um hospital.

Eventos: é algo que acontece em instantes da simulação e que podem alterar valores de atributos, variáveis ou acumuladores estatísticos. Os eventos de chegada (arrival) acontecem quando algo novo entra no sistema. Os eventos de saída (departure) são quando algum processo é finalizado. O evento de finalização (the end) acontece quando a simulação é finalizada. Além disso o início e término de cada atividade também são exemplos de eventos na simulação.

Lista de eventos: Uma lista contendo a próxima vez em que cada tipo de evento ocorrerá.

Recursos: são objetos que provêm serviços às entidades, como por exemplo pessoas, equipamentos e espaço. As atividades podem necessitar da disponibilidade de determinados recursos para que possam ter o seu início.

Relógio de simulação: Uma variável que fornece o valor (representando o instante) atual do tempo simulado.

Variáveis ou variáveis globais: são informações que refletem algumas características do sistema. Estão acessíveis pelas entidades, possuem os mesmos valores para todas elas e podem ser alteradas por alguma delas. Estas podem ser as filas, números de recursos ocupados, relógio da simulação, entre outras.

APÊNDICE 1 – PSEUDOCÓDIGOS

FIGURA 26 – PSEUDOCÓDIGO MÁQUINAS NORMAIS

Algorithm 5: Maquinas

```

if Maquina = vazia & tiver item no buffer & (não está em pane || manutenção) then
    | Inserir primeiro item do buffer na máquina vazia mais próxima();
    | Relogio recebe instante finalização operação();
end
if Máquina possui item then
    | if Máquina finalizou operação & (não está em pane || manutenção) then
        | if Há espaço no próximo buffer then
            | if Item precisa ser inspecionado then
                | Separar item para inspeção();
            | else
                | Se proximo buffer esta vazio relógio recebe instante item chega ao final do
                | buffer();
                | Libera item para próximo buffer();
            | end
            | Atualiza contador de troca de ferramenta();
            | if precisa trocar ferramenta then
                | Marca que máquina precisa trocar ferramenta();
            | end
            | if Há item disponível para a operação then
                | Se buffer anterior esta saturado relógio recebe este instante para liberar
                | buffer();
                | Inserir item na máquina();
                | Relogio recebe instante finalização operação();
            | else
                | Relogio recebe instante que próximo item chega ao final do buffer();
            | end
        | else
            | if item a ser liberado precisa de inspeção then
                | Separar item para inspeção();
            | end
        | end
    | else
        | Relogio recebe o instante com maior valor da máquina();
    | end
end

```

FIGURA 27 – PSEUDOCÓDIGO OPERAÇÕES MANUAIS

Algorithm 6: Operacao manual

```

if operação não está em pane || manutenção then
  if há alguém na máquina e a última operação manual realizada já foi finalizada then
    if há algum item sendo processado then
      if próximo buffer não está saturado then
        Se proximo buffer esta vazio relógio recebe instante item chega ao final do
        buffer();
        Liberar item para o próximo buffer();
      end
      Atualizar prioridade atual da máquina();
    end
    Verificar se operador possui algo mais importante para fazer();
    if operador continua na operação then
      if há item no buffer para processar then
        Bloqueia operador para outras atividades();
        Se buffer máquina anterior esta saturado relógio recebe este instante
        liberação buffer();
        Relógio recebe instante que operação é finalizada();
      end
    else
      if algum operador pode ser alocado na operação then
        Alocar operador na operação();
      end
    end
  end
end

```

FIGURA 28 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 1

Algorithm 7: Buffer especial 1

```

if há algum item já chegou na bifurcação then
  Verificar modelo do primeiro item do buffer();
  if buffer modelo está saturado then
    if outro buffer não está saturado then
      Se buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
      Colocar item no outro buffer();
      Relógio recebe instante chegada próximo item na bifurcação();
    end
  else
    Se buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
    Colocar item no buffer modelo();
    Relógio recebe instante chegada próximo item na bifurcação();
  end
end
if próximo buffer não está saturado then
  if há item no buffer sendo chamado then
    Se buffer sendo chamado esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
    Item é deslocado para o próximo buffer();
    Relógio recebe instante que próximo item chegar no buffer que está sendo
    chamado();
  else
    if há item no outro buffer then
      Se outro buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
      Item é deslocado para o próximo buffer();
      Relógio recebe instante que próximo item chegar no outro buffer();
      Buffer sendo chamado = outro;
    end
  end
end

```

FIGURA 29 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 2

Algorithm 8: Buffer especial 2

```

if há algum item já chegou na bifurcação then
  if buffer habilitado não está saturado then
    Se buffer máquina esta saturado relógio recebe instante para liberar máquina();
    Item é deslocado para o buffer habilitado();
    Relógio recebe instante que próximo item chegar na bifurcação();
  end
end
if há algum item já chegou no final do buffer habilitado then
  if próximo buffer não está saturado then
    Se buffer habilitado esta saturado relógio recebe instante para liberar buffer();
    Item é deslocado para o próximo buffer();
    Relógio recebe instante que próximo item chegar no buffer habilitado();
  end
end

```

FIGURA 30 – PSEUDOCÓDIGO BUFFER ESPECIAL 3

Algorithm 9: Buffer especial 3

```

if há algum item já chegou na bifurcação then
  Verificar modelo do primeiro item do buffer();
  if buffer modelo está saturado then
    if outro buffer não está saturado then
      Se buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
      Colocar item no outro buffer();
      Relógio recebe instante chegada próximo item na bifurcação();
    end
  else
    Se buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
    Colocar item no buffer modelo();
    Relógio recebe instante chegada próximo item na bifurcação();
  end
end
if Proximo buffer não está saturado then
  if Há item no buffer sendo chamado & (Outro buffer não está saturado || Buffer sendo
  chamado está saturado) then
    Se buffer sendo chamado esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
    Item é deslocado para o próximo buffer();
    Relógio recebe instante que próximo item chegar no buffer que está sendo
    chamado();
  else
    if Há algum item no outro buffer then
      Se outro buffer esta saturado relógio recebe instante liberação buffer();
      Item é deslocado para o próximo buffer();
      Relógio recebe instante que próximo item chegar no outro buffer();
      Buffer sendo chamado = outro;
    end
  end
end

```

FIGURA 31 – PSEUDOCÓDIGO 3D

Algorithm 10: 3D

```

Verificar o que os operadores da tridimensional estão fazendo();
if operadores da tridimensional não estão em horário de almoço then
  for Cada operador que esteja alocado na tridimensional do
    if a tridimensional já finalizou tarefa & existir item nela then
      Retirar item da máquina se existir item nela();
      Se tem item limpo colocar na máquina e bloquear operador temporariamente();
    end
  end
  Verificar situação das tridimensionais();
  for Cada operador limpando item do
    if já finalizou limpeza then
      Inserir item na fila de itens limpos();
      if tem tridimensional necessitando operador then
        Retirar item da máquina se houver algum();
        Se tem item limpo colocar na máquina e bloquear operador
        temporariamente();
      else
        if Operador continua livre neste instante de tempo then
          Se tem item limpo colocar na máquina e bloquear operador
          temporariamente();
        end
      end
    else
      if Operação tridimensional finalizada & há item limpo then
        Retirar item da máquina se houver algum e colocar outro na máquina();
        Atualizar tempo finalização limpeza somando tempo gasto na máquina();
      end
    end
  end
  for Cada operador que esteja em outra operação manual do
    if Operação tridimensional finalizada & há item limpo then
      Retirar item da máquina se houver item e colocar outro na máquina();
      Atualizar tempo finalização da outra operação somando tempo gasto na
      tridimensional e deslocamento();
    end
  end
end

```

FIGURA 32 – PSEUDOCÓDIGO VER SE TEM ALGO MAIS IMPORTANTE

Algorithm 11: Verificar se tem algo mais importante para fazer

```

Verificar o que o operador poderia fazer();
if alguma coisa é mais importante se comparado a tarefa atual then
  Alterar local do operador e inserir outra operação no relógio();
end

```

FIGURA 33 – PSEUDOCÓDIGO TENTAR ALOCAR

Algorithm 12: Tentar colocar operação

```

Verificar situação atual do responsável pela operação();
if Responsável não está fazendo algo mais importante then
    | if responsável está ocupado then
    | | Garantir que ocupação atual não seja esquecida();
    | end
    | Alocar responsável na operação e inserir instante chegada operação no relógio();
else
    | Verificar operadores habilitados para a operação();
    | if Se algum habilitado está disponível then
    | | Escolher o mais próximo da operação();
    | | Alocar habilitado na operação e inserir instante chegada operação no relógio();
    | else
    | | if algum deles está com prioridade atual menor que a prioridade da maquina then
    | | | Escolher o com menor prioridade com menor distância até a operação();
    | | | Garantir que ocupação atual não seja esquecida();
    | | | Alocar habilitado na operação e inserir instante chegada operação no relógio();
    | | end
    | end
end

```

FIGURA 34 – PSEUDOCÓDIGO ALOCAR MÃO DE OBRA

Algorithm 13: Alocar conforme possível

```

Verificar o que tem para fazer e as respectivas prioridades();
while Enquanto lista de prioridades responsáveis e a lista de prioridades habilitados não estiverem vazias do
    | Pegar a prioridade de maior valor das listas();
    | Tentar colocar operação() //se for responsável = aloca responsável, se for habilitado = aloca habilitado;
end

```

APÊNDICE 2 – PANES

Como ler as tabelas:

1. Cores: Mais vermelho = maior tempo de máquina parada
2. Numeração unto com as cores: quantidade de panes
3. Primeira coluna: máquinas, o P é panes que ocorrem no portal, impactando toda a operação. Exemplo: 120.0 é a máquina 0 da operação 120, 120.P é o portal da operação 120, o que impede qualquer movimentação entre as máquinas
4. Cada coluna com os dias da semana representa um período de 6 horas
5. Coluna do total: tempo total de pane para cada uma das máquinas
6. Coluna Qnte: quantidade de panes de cada uma das máquinas
7. Maior: Maior período que a máquina ficou parada na semana

FIGURA 35 – PANE S1

	Aque.			Segunda			Terça			Quarta			Quinta			Sexta			Total	Qnte	Maior				
100	9	5	1	0	2	9	12	4	17	8	3	1	10	9	9	1	8	0	7	11	7	9	0 06:32	150	0:50
120.0	0	1	0	0	0	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:42	10	0:16
120.1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:30	5	0:21
120.2	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:39	9	0:16
120.P	0	2	3	1	0	5	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0 00:31	20	0:12	
130.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0 04:38	17	3:01
130.1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0 03:10	11	2:30
130.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0 00:55	9	0:20
130.P	2	2	0	0	1	2	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0 01:16	19	0:25
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0 00:03	3	0:01
310.0	3	5	10	2	2	6	1	3	4	8	3	3	8	3	9	1	0	5	6	5	6	6	0 07:26	114	1:42
310.1	2	0	4	2	4	5	12	5	11	6	6	0	0	0	0	3	0	1	1	6	0	0	0 03:48	89	0:41
310.2	9	34	9	0	1	1	0	4	0	5	5	3	12	3	2	17	0	20	0	5	6	5	0 08:58	159	1:25
320	5	6	6	13	14	7	15	8	9	4	10	6	11	22	9	5	6	4	4	12	15	3	0 10:15	208	0:56
330.0	2	0	9	6	1	1	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:17	26	0:24
330.1	1	7	5	2	0	0	0	3	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0 02:23	24	1:05
330.P	3	1	9	6	4	6	1	7	11	2	6	2	6	0	6	4	7	0	1	2	4	1	0 07:14	105	1:04
340	4	4	3	12	18	6	9	6	11	5	6	4	9	9	8	6	9	3	3	6	7	3	0 05:58	162	0:37
350.0	1	4	4	5	4	5	20	5	1	25	38	44	16	66	0	1	0	0	0	0	0	0	0 08:55	247	2:50
350.1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:42	5	1:39
350.2	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	2	0	4	2	4	2	0 02:16	22	1:39
350.P	1	1	0	1	1	1	1	0	0	4	2	1	4	5	0	1	0	0	0	2	0	0	0 00:37	27	0:05
360.0	1	0	0	0	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	0 00:49	14	0:12
360.1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0 00:24	6	0:17
360.2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0 00:17	6	0:10
360.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:05	1	0:05
360.P	3	0	0	0	2	5	0	0	1	1	1	0	0	0	2	7	0	2	0	0	0	24	0 01:49	55	0:37
380	0	0	1	0	0	0	3	0	0	2	3	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0 03:48	22	1:15
380.1	10	18	14	10	21	11	14	18	20	5	0	0	5	1	0	5	2	2	1	1	0	8	0 20:07	210	3:19
380.2	3	2	0	0	9	3	2	0	1	2	0	4	4	1	2	2	0	0	0	7	9	1	0 03:11	57	0:58
380.3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0 01:05	15	0:26
380.P	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	2	4	0	3	0	1	1	0	1	1	0	0 00:56	24	0:13
390.0	0	0	2	0	0	4	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:17	15	0:34
390.1	0	1	2	0	6	6	3	6	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 11:50	37	3:43
390.2	0	1	4	6	2	2	3	1	2	1	2	0	2	1	5	6	1	6	14	1	0	3	0 04:58	76	1:14
390.3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0 00:35	9	0:11
390.P	0	0	2	1	3	0	2	3	1	0	1	1	2	0	1	4	0	1	0	2	1	3	0 01:28	32	0:21
410	7	2	7	5	4	4	5	3	5	6	6	6	0	6	2	6	6	2	2	6	9	3	0 05:00	116	0:34
520.0	10	22	20	17	26	18	20	26	22	7	5	0	1	0	1	1	2	0	9	16	3	2	0 17:49	271	1:51
520.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0 02:17	8	2:01
520.2	0	1	7	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0 01:29	17	0:46
520.3	0	0	0	2	0	5	2	0	0	0	3	2	3	0	1	0	0	0	2	0	4	0	0 04:49	25	2:01
520.P	3	1	0	1	1	5	3	1	0	2	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:21	24	0:33
525.0	12	6	14	15	10	13	13	15	0	2	1	1	1	1	0	8	3	0	1	2	1	3	0 14:35	138	2:04
525.1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0 00:16	16	0:05
525.P	2	5	1	1	1	1	1	5	0	2	0	1	2	0	0	5	1	3	2	0	0	1	0 01:39	41	0:15
530.0	2	3	0	1	1	0	0	0	2	1	0	0	3	1	0	1	0	1	0	2	1	0	0 02:13	21	1:09
530.1	3	0	1	1	0	1	0	0	0	3	0	0	3	0	1	1	0	0	0	1	2	1	0 00:50	19	0:22
530.2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	2	2	0	3	2	2	0	0	3	0	0	0	0	0 00:48	20	0:15
530.3	1	0	0	3	0	1	0	0	1	2	0	2	4	1	1	1	1	0	0	3	3	2	0 02:46	28	0:33
530.P	1	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0 08:26	8	7:48
550	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	8	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0 01:25	18	0:35
710	0	4	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0 01:29	14	0:58
720	0	3	2	1	0	2	1	5	0	5	3	0	1	2	0	3	1	2	1	0	2	0	0 01:42	41	0:19

FIGURA 36 – PANE S2

	Aque.	Segunda			Terça			Quarta			Quinta			Sexta			Total	Qnte	Maior						
100	3	17	7	0	0	0	0	5	7	3	2	0	3	4	5	4	2	4	3	1	5	3	0 03:58	94	0:29
120.0	0	5	1	0	1	3	1	0	1	0	3	0	2	4	2	4	0	0	1	0	0	1	0 15:21	29	6:24
120.1	0	3	4	0	1	3	1	0	0	0	3	0	1	2	0	0	9	0	0	1	2	4	0 23:30	35	6:24
120.2	0	2	1	0	1	3	4	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0 13:32	19	6:24
120.P	0	1	6	0	1	3	1	0	0	0	3	0	0	3	0	0	1	0	0	0	1	0	0 12:15	21	6:24
130.0	7	8	8	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0 08:08	40	2:45
130.1	0	3	1	0	1	3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	2	0	0 15:36	17	6:24
130.2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0 01:36	6	1:10
130.P	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	4	0	1	0	1	0	0 02:05	16	0:53
150	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0 01:00	7	0:47
310.0	0	5	2	0	0	0	4	2	3	9	5	1	4	2	1	2	1	0	4	5	2	2	0 06:52	58	1:47
310.1	2	1	1	0	0	2	1	1	2	0	1	0	1	1	7	0	5	0	1	3	1	5	0 13:52	39	5:05
310.2	12	5	2	0	0	0	4	2	2	1	0	0	1	2	5	2	0	0	8	11	0	4	0 06:01	68	2:01
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	0	0:00
330.0	2	2	2	2	0	4	1	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	5	1	1	0	1	0 17:43	29	4:39
330.1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	3	0	0	0	6	1	3	1	0	0 02:55	24	1:31
330.P	3	3	9	2	1	3	1	2	3	6	2	6	2	8	7	3	5	2	4	9	2	4	0 18:09	102	2:40
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	0	0:00
350.0	0	3	2	2	0	2	2	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 15:32	17	5:05
350.1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0 01:36	9	1:04
350.2	2	3	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0 02:38	14	1:36
350.P	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	2	0 00:48	11	0:29
360.0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0 01:16	7	0:53
360.1	1	1	0	0	0	0	1	0	3	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 02:14	17	0:52
360.2	0	5	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 04:29	12	2:00
360.3	0	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 02:44	7	2:10
360.P	10	5	14	2	1	3	2	2	3	0	0	0	0	2	2	1	3	0	0	0	1	3	0 20:20	57	6:24
380	0	5	2	2	1	3	2	4	3	0	3	6	2	1	0	1	13	1	1	5	1	3	1 00:16	66	6:24
380.1	3	3	2	2	1	3	1	0	0	1	0	0	0	3	0	2	2	1	0	1	0	0	0 22:57	39	6:24
380.2	0	1	1	2	1	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0 18:28	15	6:24
380.3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0 01:24	7	1:17
380.P	0	2	1	0	0	0	0	4	3	1	0	1	5	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0 01:00	21	0:30
390.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	3	2	4	0	0	0	0	0	1	0 01:25	16	0:41
390.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0 00:33	6	0:17	
390.2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0 00:56	12	0:28
390.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	7	0	0	0	0 02:59	11	2:30
390.P	1	1	4	2	1	3	2	0	1	2	0	0	2	4	1	0	1	0	0	0	2	2	1 12:29	31	7:24
410	2	1	2	2	1	3	2	2	0	4	1	2	0	1	1	0	2	0	0	1	6	1	0 22:42	35	6:24
520.0	20	14	7	0	0	0	0	0	26	17	16	6	14	23	20	24	24	14	16	1	1	10	0 21:14	271	2:53
520.1	0	3	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	5	3	1	0	0	1	0	0	0	1	0 03:31	25	0:55
520.2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	3	0	8	1	3	0	0	0	0 04:25	24	0:58
520.3	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0 02:13	8	1:00
520.P	0	3	2	2	1	3	2	0	0	1	0	0	1	5	2	3	3	3	7	1	0	1	0 21:27	43	6:24
525.0	2	7	3	0	1	3	1	0	2	2	4	0	0	4	0	7	7	3	1	0	0	2	0 16:49	55	6:24
525.1	0	12	2	2	1	3	2	0	0	4	2	0	0	8	0	13	5	1	2	0	0	0	0 20:56	63	6:24
525.P	2	6	1	0	1	3	2	1	2	6	2	1	0	6	3	4	4	2	2	0	0	1	0 15:50	54	6:24
530.0	0	4	1	0	1	3	1	0	3	2	0	0	4	0	1	3	1	1	0	0	0	4	0 16:43	29	6:24
530.1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	2	7	2	3	0	2	1	0	1	0	0	2	0 02:16	27	0:40
530.2	1	0	1	0	1	3	1	0	1	2	1	1	2	2	0	3	1	1	0	0	2	4	0 16:13	28	6:24
530.3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	4	0	0	3	0	0	0	1	0	1	0	0 00:50	12	0:15
530.P	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	2	2	2	0	1	0	2	1	2	0 01:17	16	0:29
550	0	0	2	2	1	3	3	0	0	1	0	2	3	3	0	2	1	1	0	1	2	0	0 18:05	29	6:24
710	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0 01:54	4	0:56
720	2	0	2	2	1	3	2	4	3	3	5	1	5	3	0	2	0	1	2	0	1	2	0 19:11	50	6:24

FIGURA 37 – PANE S3

	Aque.	Segunda			Terça			Quarta				Quinta			Sexta			Total	Qnte	Maior					
100	0	1	0	0	2	3	0	1	6	9	3	10	3	4	8	0	3	0	0	1	2	8	0 07:09	64	3:45
120.0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	0	0 06:17	11	3:45
120.1	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0 05:17	9	3:45
120.2	0	1	0	0	1	1	2	5	2	1	13	7	9	3	9	8	6	0	0	1	1	5	0 10:48	75	3:45
120.P	0	0	0	0	3	1	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0 04:42	12	3:45
130.0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:19	2	0:14
130.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0 05:55	4	3:45
130.2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:03	2	0:02
130.P	0	0	0	0	0	5	2	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0 00:32	13	0:08
150	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0 00:37	6	0:19
310.0	0	1	0	1	1	1	0	0	5	4	3	2	12	3	3	4	0	0	0	0	7	11	0 05:31	58	1:58
310.1	0	1	0	1	4	0	2	5	5	3	3	6	7	1	1	4	2	0	0	1	5	9	0 06:14	60	3:44
310.2	0	1	0	1	0	6	8	11	1	10	13	7	6	1	10	6	7	0	0	0	6	3	0 04:48	97	0:49
320	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	6	6	15	8	8	0	0	0	0	0	0 02:17	46	0:46
330.0	0	0	0	0	1	1	1	0	4	2	1	0	0	3	0	0	1	0	0	1	2	2	0 06:19	19	3:45
330.1	0	0	0	0	0	1	3	1	3	5	13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 02:07	28	0:56
330.P	0	0	0	1	3	2	3	6	5	3	7	2	4	1	3	2	0	0	0	1	1	3	0 06:57	47	3:45
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	2	0	0	0	0	0	0	0 00:08	20	0:08
350.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0 06:04	7	3:45
350.1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0 04:18	5	4:07
350.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0 00:01	1	0:01
350.P	0	1	0	1	0	0	0	0	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 08:32	7	8:24
360.0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0 05:29	9	3:45
360.1	0	0	0	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:06	5	0:03
360.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	1	0:00
360.3	0	0	0	1	3	20	4	16	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 04:22	72	1:11
360.P	0	1	0	0	15	19	9	3	2	20	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0 02:06	71	0:34
380	0	1	0	0	0	0	1	4	3	8	3	0	0	5	14	0	0	0	0	0	1	0	0 20:52	40	8:19
380.1	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0 01:07	11	0:23
380.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:01	1	0:01
380.3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:20	1	0:20
380.P	0	0	0	0	0	2	0	2	0	4	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0 00:16	12	0:04
390.0	0	1	0	1	0	1	2	4	1	0	2	2	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0 09:15	19	8:19
390.1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	7	7	0	2	7	1	3	4	0	0	0	0	1	0 01:21	34	0:23
390.2	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0 08:32	8	8:15
390.3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	4	3	0	0	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0 00:35	17	0:13
390.P	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0 00:28	13	0:06
410	0	1	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0 05:28	11	3:45
520.0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0 08:42	4	8:02
520.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	0	0 02:34	8	1:55
520.2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0 08:31	6	8:03
520.3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:46	3	1:17
520.P	0	0	0	1	0	0	1	5	1	2	2	0	0	1	3	0	0	0	0	1	2	1	0 06:00	20	3:45
525.0	0	1	0	1	1	1	2	0	3	7	6	2	0	4	4	1	1	0	0	1	2	2	0 08:40	39	3:45
525.1	0	1	0	1	0	0	1	0	3	1	5	0	0	3	6	0	0	0	0	1	3	2	0 06:37	27	3:45
525.P	0	1	0	1	3	5	3	0	4	6	4	3	0	2	5	2	2	0	0	1	2	4	0 06:41	48	3:45
530.0	0	0	0	1	1	6	1	1	0	4	8	1	0	6	24	10	8	0	0	1	11	22	0 12:27	105	3:45
530.1	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	0	1	1	1	4	1	0	0	0	0	0	2	0 09:22	17	7:42
530.2	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	3	3	1	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0 14:16	16	7:43
530.3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0 01:36	9	1:14
530.P	0	1	0	1	1	2	2	1	0	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0 04:47	15	3:45
550	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1	4	7	0 05:52	20	3:44
710	0	1	0	1	0	1	1	0	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	0 01:10	13	0:19
720	0	1	0	0	2	1	6	0	0	3	1	0	3	5	5	2	0	0	0	0	3	7	0 02:39	39	0:59

FIGURA 38 – PANE S1 COMPLETA

	Aque.			Segunda				Terça				Quarta				Quinta				Sexta				Total	Qnte	Maior
100	20	14	25	18	25	29	23	19	28	21	26	19	18	19	27	19	25	16	12	19	22	18	0 07:42	502	0:52	
120.0	0	1	0	0	0	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:42	10	0:16	
120.1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:30	5	0:21	
120.2	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:39	9	0:16	
120.P	76	83	89	75	89	116	84	88	74	92	71	94	67	102	86	122	82	65	52	85	97	70	0 06:07	2017	0:31	
130.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0 04:38	17	3:01	
130.1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0 03:10	11	2:30	
130.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0 00:55	9	0:20	
130.P	70	75	78	72	72	86	97	107	62	96	61	87	92	113	100	115	124	106	59	81	57	59	0 07:48	1996	0:37	
150	102	82	95	94	88	88	45	85	75	74	36	39	47	94	50	58	86	68	31	38	81	34	0 03:52	1592	0:22	
310.0	46	38	27	27	43	46	54	38	53	43	44	45	50	54	36	43	73	58	22	44	36	49	0 12:18	1062	1:47	
310.1	8	3	14	10	11	10	31	35	19	20	21	24	16	12	11	30	49	5	8	27	13	8	0 04:40	418	0:42	
310.2	20	38	28	37	21	23	35	41	20	16	33	27	27	30	17	39	60	34	10	31	34	27	0 10:55	695	1:33	
320	99	122	100	72	110	89	117	106	86	118	86	82	92	86	84	95	117	103	50	94	88	77	0 18:07	2285	1:14	
330.0	2	0	9	6	1	1	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:17	26	0:24	
330.1	1	7	5	2	0	0	0	3	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0 02:23	24	1:05	
330.P	21	14	23	16	24	23	25	35	29	20	15	14	19	19	20	10	35	11	15	11	14	10	0 09:34	465	1:18	
340	70	93	71	88	95	99	117	97	88	110	76	74	85	111	90	89	96	88	57	80	93	74	0 13:09	2117	0:55	
350.0	1	4	4	5	4	5	20	5	1	25	38	44	16	66	0	1	0	0	0	0	0	0	0 08:55	247	2:50	
350.1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:42	5	1:39	
350.2	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	2	0	4	2	4	2	0 02:16	22	1:39	
350.P	109	74	74	108	89	111	97	108	89	100	83	97	116	123	88	90	107	75	50	106	143	96	0 09:58	2334	1:04	
360.0	1	0	0	0	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	0 00:49	14	0:12	
360.1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0 00:24	6	0:17	
360.2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0 00:17	6	0:10	
360.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:05	1	0:05	
360.P	88	75	75	95	82	103	109	93	79	116	91	108	124	119	93	91	94	85	51	87	134	92	0 08:49	2272	0:55	
380	0	0	1	0	0	0	3	0	0	2	3	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0 03:48	22	1:15	
380.1	10	18	14	10	21	11	14	18	20	5	0	0	5	1	0	5	2	2	1	1	0	8	0 20:07	210	3:19	
380.2	3	2	0	0	9	3	2	0	1	2	0	4	4	1	2	2	0	0	0	7	9	1	0 03:11	57	0:58	
380.3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	2	0	1	0	0	2	1	0 01:05	15	0:26	
380.P	112	99	88	105	94	87	112	118	100	112	84	113	113	77	88	102	80	70	57	101	143	74	0 10:09	2339	0:40	
390.0	0	0	2	0	0	4	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 01:17	15	0:34	
390.1	0	1	2	0	6	6	3	6	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 11:50	37	3:43		
390.2	0	1	4	6	2	2	3	1	3	1	2	0	2	1	5	6	1	6	14	1	0	3	0 04:59	77	1:14	
390.3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 00:35	9	0:11	
390.P	71	95	103	90	83	71	100	56	105	92	121	75	98	112	70	76	82	68	53	73	130	77	0 10:17	2119	0:49	
410	75	98	83	81	71	76	107	73	88	86	90	68	87	88	81	58	61	63	30	70	91	83	0 10:24	1842	0:45	
520.0	10	22	20	17	26	18	20	26	22	7	5	0	1	0	1	1	2	0	9	16	3	2	0 17:49	271	1:51	
520.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0 02:17	8	2:01	
520.2	0	1	7	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0 01:29	17	0:46	
520.3	0	0	0	2	0	5	2	0	0	0	3	2	3	0	1	0	1	0	2	0	4	0	0 04:53	26	2:01	
520.P	69	92	84	79	52	83	76	75	64	67	44	40	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 08:21	1061	1:03	
525.0	60	55	52	53	54	59	64	54	0	2	1	1	1	1	0	8	3	0	1	2	1	3	0 17:34	565	2:18	
525.1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0 00:16	16	0:05	
525.P	178	178	156	171	217	154	190	208	148	164	167	132	144	179	163	171	141	80	94	170	148	153	0 17:43	3818	1:11	
530.0	2	3	0	1	1	0	0	0	2	1	0	0	3	1	0	1	0	1	0	2	1	0	0 02:13	21	1:09	
530.1	3	0	1	1	0	1	0	0	0	3	0	0	3	0	1	1	0	0	0	1	2	1	0 00:50	19	0:22	
530.2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	2	2	0	3	2	2	0	0	3	0	0	0	0	0 00:48	20	0:15	
530.3	1	0	0	3	0	1	0	0	1	2	0	2	4	1	1	1	1	0	0	3	3	2	0 02:46	28	0:33	
530.P	98	103	99	93	84	88	118	104	70	99	113	81	94	113	99	76	92	31	52	60	96	101	0 15:57	1990	7:48	
550	39	35	37	38	41	45	62	27	38	41	40	24	47	49	51	29	47	22	21	20	54	39	0 05:23	935	0:45	
710	19	25	37	21	9	24	35	57	36	44	68	80	63	34	54	66	45	48	42	66	31	42	0 03:59	1001	1:00	
720	63	76	98	66	60	76	77	78	69	88	92	56	61	54	48	80	70	49	44	71	49	53	0 05:25	1610	0:28	

FIGURA 39 – PANE S2 COMPLETA

	Aque.		Segunda			Terça				Quarta				Quinta				Sexta				Total	Qnte	Maior	
100	19	27	19	0	0	0	0	18	29	24	19	19	16	24	23	19	14	26	27	16	30	15	0 05:07	442	0:32
120.0	0	5	1	0	1	3	1	0	1	0	3	0	2	4	2	4	0	0	1	0	0	1	0 15:21	29	6:24
120.1	0	3	4	0	1	3	1	0	0	0	3	0	1	2	0	0	9	0	0	1	2	4	0 23:30	35	6:24
120.2	0	2	1	0	1	3	4	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0 13:32	19	6:24
120.P	9	48	85	0	1	3	6	86	98	90	81	83	64	96	86	97	116	71	94	95	185	66	0 18:34	1748	6:24
130.0	7	8	8	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0 08:08	40	2:45
130.1	0	3	1	0	1	3	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	2	0	0 15:36	17	6:24
130.2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0 01:36	6	1:10
130.P	80	80	65	0	0	0	2	82	98	72	96	79	70	95	75	60	85	64	61	78	165	62	0 08:04	1653	1:17
150	59	56	44	0	0	0	3	34	50	44	56	42	49	65	49	41	50	32	71	65	127	77	0 04:28	1151	0:55
310.0	10	35	18	0	0	0	6	9	18	17	27	14	21	6	9	11	10	15	5	7	55	10	0 08:07	333	1:49
310.1	16	28	21	0	0	2	3	11	17	10	28	20	29	9	18	8	17	16	16	8	53	16	0 14:52	388	5:05
310.2	26	33	24	0	0	0	6	19	28	17	33	30	27	16	22	12	29	14	43	31	56	16	0 07:39	546	2:03
320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	0	0:00
330.0	2	2	2	2	0	4	1	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	5	1	1	0	1	0 17:43	29	4:39
330.1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	3	0	0	0	6	1	3	1	0	0 02:55	24	1:31
330.P	36	27	15	2	1	3	1	16	22	12	9	13	28	28	10	6	16	9	8	17	24	14	0 19:27	350	2:40
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	0	0:00
350.0	0	3	2	2	0	2	2	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 15:32	17	5:05
350.1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0 01:36	9	1:04
350.2	2	3	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0 02:38	14	1:36
350.P	93	65	84	0	0	0	0	92	71	71	94	81	48	90	86	64	99	47	94	70	79	77	0 05:35	1574	0:49
360.0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0 01:17	8	0:53
360.1	1	1	0	0	0	0	1	0	3	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 02:14	18	0:52
360.2	0	5	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 04:29	12	2:00
360.3	0	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 02:44	7	2:10
360.P	69	84	92	2	1	3	2	47	75	67	92	67	61	77	76	67	78	53	92	84	42	68	1 01:05	1464	6:24
380	0	5	2	2	1	3	2	4	3	0	3	6	2	1	0	1	13	1	1	5	1	3	1 00:16	66	6:24
380.1	3	3	2	2	1	3	1	0	0	1	0	0	0	3	0	2	2	1	0	1	0	0	0 22:57	39	6:24
380.2	0	1	1	2	1	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0 18:28	15	6:24
380.3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0 01:24	7	1:17
380.P	90	66	104	0	0	0	2	95	94	101	94	93	63	96	94	72	89	58	96	106	39	44	0 07:45	1689	0:52
390.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	3	2	4	0	0	0	0	0	1	0 01:25	16	0:41
390.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0 00:33	6	0:17
390.2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0 00:56	12	0:28
390.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	7	0	0	0	0 02:59	11	2:30
390.P	72	61	81	2	1	3	4	47	68	83	72	76	49	5	1	0	1	0	0	0	2	2	1 15:29	790	7:24
410	51	70	86	2	1	3	2	81	70	76	58	75	37	70	64	27	65	55	96	100	43	70	1 03:25	1372	6:24
520.0	20	14	7	0	0	0	0	0	26	17	16	6	14	23	20	24	24	14	16	1	1	10	0 21:14	271	2:53
520.1	0	3	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	5	3	1	0	0	1	0	0	0	1	0 03:31	25	0:55
520.2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	3	0	8	1	3	0	0	0	0 04:25	24	0:58
520.3	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0 02:13	8	1:00
520.P	91	81	86	2	1	3	5	94	111	82	92	65	54	97	96	74	103	87	95	105	52	76	1 05:39	1734	6:24
525.0	2	7	3	0	1	3	1	0	2	2	4	0	0	4	0	7	7	3	1	0	0	2	0 16:49	55	6:24
525.1	0	12	2	2	1	3	2	0	0	4	2	0	0	8	0	13	5	1	2	0	0	0	0 20:56	63	6:24
525.P	137	136	105	0	1	3	6	164	138	155	124	133	79	158	185	170	177	167	157	162	106	96	1 05:46	2835	6:24
530.0	0	4	1	0	1	3	1	0	3	2	0	0	4	0	1	3	1	1	0	0	0	4	0 16:43	29	6:24
530.1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	2	7	2	3	0	2	1	0	1	0	0	2	0 02:16	27	0:40
530.2	1	0	1	0	1	3	1	0	1	2	1	1	2	2	0	3	1	1	0	0	2	4	0 16:13	28	6:24
530.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	4	0	0	3	0	0	0	1	0	1	0 00:50	12	0:15
530.P	9	68	81	0	0	0	5	87	103	93	67	74	46	87	80	83	87	87	112	98	59	61	0 06:43	1387	0:39
550	22	28	17	2	1	3	5	34	18	46	25	36	29	42	32	27	43	25	38	23	53	29	0 21:07	658	6:24
710	8	17	48	0	0	0	3	51	27	47	40	52	20	29	15	26	41	28	17	50	24	12	0 03:38	623	1:00
720	70	55	84	2	1	3	4	62	77	93	76	72	58	63	82	59	77	91	77	73	74	43	0 22:39	1477	6:24

FIGURA 40 – PANE S3 COMPLETA

	Aque.	Segunda						Terça						Quarta						Quinta						Sexta				Tptal	Qnte	Maior
100	0	1	0	0	6	18	13	18	22	25	34	20	18	22	35	29	14	0	0	1	10	25	0 08:00	311	3:45							
120.0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	0	0 06:17	11	3:45							
120.1	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0 05:17	9	3:45							
120.2	0	1	0	0	1	1	2	5	2	1	13	7	9	3	9	8	6	0	0	1	1	5	0 10:48	75	3:45							
120.P	0	0	0	0	30	97	94	86	80	102	120	92	103	144	116	128	63	0	0	1	42	93	0 08:55	1391	3:45							
130.0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:19	2	0:14							
130.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0 05:55	4	3:45							
130.2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:03	2	0:02							
130.P	0	0	0	0	41	90	90	83	57	95	112	67	64	113	80	92	45	0	0	0	52	68	0 02:39	1149	0:24							
150	0	1	0	1	55	46	136	103	98	105	167	84	88	86	137	139	46	0	0	0	45	56	0 02:34	1393	0:19							
310.0	0	1	0	1	1	9	4	2	15	10	7	6	20	19	9	7	7	0	0	0	20	21	0 05:56	159	1:58							
310.1	0	1	0	1	4	6	7	10	11	12	16	11	14	18	5	9	7	0	0	1	20	29	0 06:59	182	3:44							
310.2	0	1	0	1	0	21	14	15	13	19	29	14	18	20	20	6	15	0	0	0	24	34	0 05:33	264	0:52							
320	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	83	152	171	150	167	101	0	0	0	0	0	0 05:02	825	1:16							
330.0	0	0	0	0	1	1	1	0	4	2	1	0	0	3	0	0	1	0	0	1	2	2	0 06:19	19	3:45							
330.1	0	0	0	0	0	1	3	1	3	5	13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0 02:07	28	0:56							
330.P	0	0	0	1	15	22	41	30	30	28	49	24	30	28	25	31	12	0	0	1	15	15	0 08:43	397	3:45							
340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	2	0	0	0	0	0	0	0 00:08	20	0:08							
350.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0 06:04	7	3:45							
350.1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0 04:18	5	4:07							
350.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0 00:01	1	0:01							
350.P	0	1	0	1	28	52	97	98	70	89	73	97	100	101	95	116	51	0	0	0	62	57	0 12:20	1188	8:24							
360.0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0 05:29	9	3:45							
360.1	0	0	0	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:06	5	0:03							
360.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:00	1	0:00							
360.3	0	0	0	1	3	20	4	16	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 04:22	72	1:11							
360.P	0	1	0	0	37	101	95	96	82	79	93	102	101	87	104	106	53	0	0	0	43	87	0 06:34	1267	0:57							
380	0	1	0	0	0	0	1	4	3	8	3	0	0	5	14	0	0	0	0	0	1	0	0 20:52	40	8:19							
380.1	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0 01:07	11	0:23							
380.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:01	1	0:01							
380.3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 00:20	1	0:20							
380.P	0	0	0	0	37	110	89	118	122	116	84	111	118	108	125	106	79	0	0	0	49	102	0 06:40	1474	1:00							
390.0	0	1	0	1	0	1	2	4	1	0	2	2	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0 09:15	19	8:19							
390.1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	7	7	0	2	7	1	3	4	0	0	0	0	1	0 01:21	34	0:23							
390.2	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0 08:32	8	8:15							
390.3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	4	3	0	0	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0 00:35	17	0:13							
390.P	0	0	0	0	40	93	72	109	128	127	97	89	99	91	101	111	61	0	0	0	37	73	0 05:21	1328	0:37							
410	0	1	0	0	45	102	79	75	83	89	80	77	98	87	94	90	66	0	0	1	21	82	0 10:41	1170	3:45							
520.0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0 08:42	4	8:02							
520.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	0	0 02:34	8	1:55							
520.2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0 08:31	6	8:03							
520.3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0 01:46	3	1:17							
520.P	0	0	0	1	25	77	81	89	85	70	83	72	87	86	81	90	62	0	0	1	41	77	0 09:51	1108	3:45							
525.0	0	1	0	1	1	1	2	0	3	7	6	2	0	4	4	1	1	0	0	1	2	2	0 08:40	39	3:45							
525.1	0	1	0	1	0	0	1	0	3	1	5	0	0	3	7	0	0	0	0	1	3	2	0 06:37	28	3:45							
525.P	0	1	0	1	33	72	105	88	118	108	109	74	127	122	174	132	100	0	0	1	63	119	0 13:24	1547	3:45							
530.0	0	0	0	1	1	6	1	1	0	4	8	2	0	6	25	10	8	0	0	1	11	22	0 12:39	107	3:45							
530.1	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	0	2	1	1	4	1	0	0	0	0	0	2	0 09:22	18	7:42							
530.2	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	3	4	1	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0 14:16	17	7:43							
530.3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0 01:36	10	1:14							
530.P	0	1	0	1	35	92	92	92	94	125	82	91	83	88	130	83	60	0	0	1	33	76	0 10:13	1259	3:45							
550	0	1	0	1	14	32	22	32	47	43	49	24	26	40	35	41	34	0	0	1	7	18	0 08:09	467	3:44							
710	0	1	0	1	65	46	34	21	24	20	21	19	17	32	21	24	16	0	0	0	17	42	0 02:10	421	0:19							
720	0	1	0	0	32	60	82	55	58	43	73	49	68	74	102	48	45	0	0	0	49	64	0 04:35	903	1:14							