

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

IARA SILVA SAMPAIO

**MODELAGEM DE UM GÊMEO DIGITAL DA EXTRAÇÃO FLORESTAL COM
*FORWARDER***

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

IARA SILVA SAMPAIO

**MODELAGEM DE UM GÊMEO DIGITAL DA EXTRAÇÃO FLORESTAL COM
*FORWARDER***

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Carlos Cardoso Machado

Coorientadores: Raiane R. Machado Gomes
Helio Garcia Leite

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S192m Sampaio, Iara Silva, 1993-
2023 Modelagem de um gêmeo digital da extração florestal com
forwarder / Iara Silva Sampaio. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (91 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Carlos Cardoso Machado.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.
Referências bibliográficas: f. 76-91.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.461>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira - Exploração. 2. Inteligência artificial - Métodos
de simulação. 3. Transportadores autocarregáveis. I. Machado,
Carlos Cardoso, 1951-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9307

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

IARA SILVA SAMPAIO

**MODELAGEM DE UM GÊMEO DIGITAL DA EXTRAÇÃO FLORESTAL COM
*FORWARDER***

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 24 de julho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 IARA SILVA SAMPAIO
Data: 07/08/2023 12:05:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Iara Silva Sampaio
Autora

Documento assinado digitalmente
 CARLOS CARDOSO MACHADO
Data: 28/07/2023 19:31:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carlos Cardoso Machado
Orientador

*Nós nunca somos nós, sós. Dedico esse
trabalho a todos que fazem parte de
mim.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força.

Aos meus pais, Sandra e Antonio, por verem em mim a pessoa que um dia sonho em ser. Devo a vocês a maior e mais bonita das gratidões. Ao meu irmão, Gabriel, por tanto carinho e acolhimento.

Ao meu marido, melhor amigo e companheiro, Lucas. Você é um dos grandes motivos da minha chegada (inteira) ao fim desse percurso tão importante. Obrigada por me manter em curso, meu amor.

Ao meu orientador, Carlos, pela confiança, paciência e por tantas trocas que levarei comigo por toda a vida.

À Raiane, professora e ser humano excepcionais, por tanto ensino, tantas trocas e boas conversas.

Ao professor Helio, pela orientação acadêmica e pessoal, pela amizade e por compartilhar conhecimentos de maneira tão brilhante.

Aos amigos que tanto apoiaram e acreditaram enquanto eu mesma duvidei. Em especial à Iara, Maria Tereza e Mariana. Obrigada por existirem na minha vida.

Encerro essa jornada grata à tantas pessoas maravilhosas que passaram e deixaram pedacinhos em mim ao longo dos últimos anos, e à tantas que permaneceram.

À UFV e ao DEF, pelos 12 anos mais desafiadores e lindos da minha vida. Tudo valeu a pena.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

BIOGRAFIA

Iara Silva Sampaio, filha de Sandra Helena Soares e Silva Sampaio e Antonio de Pádua Rigueira Sampaio, nasceu em 11 de março de 1993 em Viçosa, Minas Gerais. Em 2010, concluiu o ensino médio na Escola Estadual Doutor Raimundo Alves Torres, em Viçosa, Minas Gerais.

Em 2011, iniciou a graduação em engenharia florestal pela Universidade Federal de Viçosa. Em 2016, concluiu a graduação carregando experiências na Diretoria de Qualidade da Florestal Jr. Consultoria UFV e na Klabin Paraná S/A, atuando também no controle de qualidade da colheita e estradas florestais.

Em 2017, iniciou o Mestrado em Ciência Florestal na mesma instituição, desenvolvendo atividades de estabilização de solos nas estradas florestais, sob orientação do Professor Doutor Carlos Cardoso Machado. Obteve o título de *Magister Scientiae* em 2019. No mesmo ano, iniciou o Doutorado em Ciência Florestal, na mesma instituição, submetendo-se à defesa de tese para obtenção do título *Doctor Scientiae* em julho de 2023.

Você vai chegar lá. Mas até que chegue, espero que não corra, para que possa chegar inteiro, e pra que veja tudo que há de bom no caminho. E não desapareça antes de chegar.

Autor desconhecido

RESUMO

SAMPAIO, Iara Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Modelagem de um gêmeo digital da extração florestal com *forwarder***. Orientador: Carlos Cardoso Machado. Coorientadores: Raiane Ribeiro Machado Gomes e Helio Garcia Leite.

O *forwarder* é uma máquina autocarregável responsável pela extração da madeira recém-colhida que faz parte, junto ao *harvester*, do sistema *cut-to-length* da colheita florestal. Devido à sua importância e representatividade, o setor florestal apresenta crescente demanda por inovações. Os gêmeos digitais são potenciais ferramentas de gestão e otimização de processos e, através das simulações, assumem papel de extrema importância nesse contexto. O objetivo deste trabalho foi modelar um gêmeo digital da extração florestal com o *forwarder* através da simulação de eventos discretos. Também buscou-se definir e estratificar as variáveis relevantes para a construção do modelo, além de testá-lo e validá-lo. Os dados utilizados correspondem à extração florestal em uma empresa florestal localizada em Minas Gerais e foram coletados entre janeiro de 2022 e abril de 2023. O modelo foi desenvolvido através do software de simulação de eventos discretos Simul8 e envolveu a alocação de *building blocks* que representaram a atividade de extração no ambiente virtual. A estrutura do modelo de simulação é iniciada por três *start points*, cada um deles representando a madeira a ser extraída pelas máquinas estudadas. Foram adicionados três *building blocks* das paradas de abastecimento, manutenção e remoção. O modelo também conta com blocos de atividades de decisão, que foram incluídas para direcionar de maneira fiel as extrações para as atividades de manutenção e remoção. Ainda, foram adicionados e configurados três *building blocks* representantes das atividades de extração florestal e dez filas nas quais os insumos ficam aguardando algum tipo de processamento ou atividade. Após a estruturação de todos os blocos e do ajuste de todas as suas configurações, foi realizada simulação de 1 dia de duração. Foi realizada a validação do modelo de gêmeo digital através das técnicas de análise visual e comparação entre os resultados obtidos pela simulação e os dados reais obtidos da operação de extração. Do critério visual, entendeu-se que o modelo conseguiu representar de modo satisfatório a atividade de extração, associando as condições de campo às ferramentas disponíveis no software de simulação.

Comparando-se os resultados obtidos pela simulação com os dados reais da atividade, o modelo também atendeu de maneira satisfatória as expectativas quanto à representação fiel da realidade, com índices de similaridade de 97,53% nos dados de entrada e 91,12% nos dados de saída. O modelo de simulação desenvolvido representa uma grande inovação quanto ao emprego das tecnologias 4.0 no setor florestal e pode ser considerado uma ferramenta eficaz de representação da realidade.

Palavras-chave: Inteligência artificial. Colheita florestal. Simulação.

ABSTRACT

SAMPAIO, Iara Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Modeling a digital twin of forwarder forest extraction.** Adviser: Carlos Cardoso Machado. Co-advisers: Raiane Ribeiro Machado Gomes and Helio Garcia Leite.

The forwarder is a self-loading machine responsible for extracting the newly harvested wood that belongs, with the harvester, of the cut-to-length system of forest harvesting. Due to its importance and representativeness, the forest sector presents a scenario of growing demand for innovations. Digital twins are potential tools for managing and optimizing processes and, through simulations, assume an extremely important role in this context. The objective of this work was to model a digital twin of forest extraction with the forwarder through discrete event simulation. We also intended to define and stratify the relevant variables for building the model, in addition to testing and validating it. The data used correspond to forest extraction in a forestry company located in Minas Gerais and were collected between January 2022 and April 2023. The model was developed using the Simul8 software and involved the allocation of building blocks that represented the extraction activity in the virtual environment. The structure of the simulation model starts with three start points, each one of them representing the wood to be extracted by the studied machines. Three building blocks for vehicle fuelin, maintenance and removal stops were added. The model also has blocks of decision activities, which were included to faithfully direct extractions to maintenance and removal activities. Also, three building blocks representing forest extraction activities and ten queues were added and configured in which inputs are waiting for some type of processing or activity. After structuring all the blocks and adjusting all their settings, a 1-day simulation was performed. Validation of the digital twin model was carried out through visual analysis techniques and comparison between the results obtained by the simulation and the real data from the extraction operation. From the visual criterion, it was understood that the model was able to satisfactorily represent the extraction activity, associating the field conditions with the tools available in the simulation software. Comparing the results obtained by the simulation with the actual activity data, the model also satisfactorily met the expectations regarding the faithful representation of reality, with similarity rates of 97.53% in the input data and 91.12% in the output data. The developed simulation model represents a great innovation regarding the use

of 4.0 technologies in the forestry sector and can be considered an effective tool for representing reality.

Keywords: Artificial intelligence. Forest harvesting. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As cinco dimensões dos gêmeos digitais.....	30
Figura 2 - Gêmeos digitais nos principais setores industriais.....	32
Figura 3 - <i>Forwarder</i> John Deere	35
Figura 4 - <i>Forwarder</i> Ponsse.....	35
Figura 5 - " <i>Building blocks</i> " ou ferramentas de construção de modelos de simulação	42
Figura 6 - Esquema conceitual da atividade de extração florestal	42
Figura 7 - Configurações das propriedades do relógio de simulação.....	44
Figura 8 - Configurações iniciais dos parâmetros do <i>start point</i>	45
Figura 9 - Configuração da disponibilidade dos turnos no parâmetro de início da atividade de extração	46
Figura 10 - Demonstração do cálculo para determinação dos tempos entre paradas	51
Figura 11 - Modelo do gêmeo digital da extração florestal com <i>forwarder</i> desenvolvido no Simul8	55
Figura 12 - Exemplo de configuração dos parâmetros estatísticos de cada uma das paradas realizadas pelas máquinas na atividade de extração	65
Figura 13 - Modelo de gêmeo digital após a simulação de um dia de extração	68
Figura 14 - Gráficos de desempenho das atividades de abastecimento, manutenção e remoção	70
Figura 15 - Percentuais de tempos ativos (<i>working</i>), parados (<i>stopped</i>) e aguardando (<i>waiting</i>) do modelo de simulação	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas das máquinas estudadas	35
Tabela 2 - Perfis de extração de acordo com as regiões abordadas no estudo	38
Tabela 3 - Paradas mecânicas realizadas pelas máquinas	39
Tabela 4 - Paradas operacionais realizadas pelas máquinas	39
Tabela 5 - Produção média por boletim, capacidade média das máquinas, número de carregamentos por boletim e tempo entre chegadas dos carregamentos.....	56
Tabela 6 - Configurações das rotas de saída dos <i>start points</i>	58
Tabela 7 - Determinação da ocorrência de paradas mecânicas dos tipos manutenção e remoção	58
Tabela 8 - Configurações das atividades de decisão inseridas no modelo de simulação	59
Tabela 9 - Nomes dos blocos das atividades de paradas mecânicas, tempos médios de duração e recursos atribuídos a essas atividades.....	60
Tabela 10 - Rotas de saída e suas configurações das atividades de abastecimento, manutenção e remoção.....	61
Tabela 11 - Nomes atribuídos aos blocos das atividades de extração, e tempos médios de duração das atividades realizadas pelas máquinas FG33, FG52 e FG54	61
Tabela 12 - Recursos alocados às atividades de extração	62
Tabela 13 - Distribuição e parâmetros estatísticos dos tempos entre ocorrências de paradas das máquinas	63
Tabela 14 - Carregamentos reais e resultantes do modelo de simulação e sua diferença percentual.....	69
Tabela 15 - Tempos mínimos, médios e máximos de duração da espera nas filas 1 e 2, que antecedem as atividades de tomada de decisão.....	70
Tabela 16 - Tempos de ocorrência das atividades de abastecimento, manutenção e remoção nos ambientes real e simulado	71
Tabela 17 - Tempos mínimos, médios e máximos de duração da espera nas filas que antecedem as atividades de extração	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização.....	15
1.2. Justificativa.....	17
1.3. Objetivo Geral	19
1.4. Objetivos Específicos	19
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. A colheita florestal.....	19
2.2. O uso das simulações como ferramenta de gestão no setor florestal	21
2.3. Telemetria e a integração com os sistemas de gestão	23
2.4. A Indústria 4.0 e a Internet das Coisas (<i>Internet of Things – IoT</i>).....	25
2.5. Gêmeo digital	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1. Coleta de dados	34
3.2. Caracterização dos dados.....	36
3.3. Construção do modelo do gêmeo digital	41
3.3.1. Configurações iniciais.....	43
3.3.2. Ponto inicial (<i>Start Point</i>)	44
3.3.3. Recursos (<i>Resources</i>).....	47
3.3.4. Atividade (<i>Activity</i>)	48
3.3.5. Fila (<i>Queue</i>).....	52
3.3.6. Setas de Rotas (<i>Routing arrows</i>).....	52
3.3.7. Fim (<i>End</i>).....	53
3.4. Teste e validação do modelo	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Construção do modelo	56

4.2. Validação e análise do modelo	66
5. CONCLUSÕES	75
6. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O setor florestal possui reconhecimento mundial acerca de sua importância, devido ao seu potencial de contribuição com a sustentabilidade (YAKOVLEVA & SUBHONBERDIEV, 2019). Além dos ganhos em bem estar social, ele também proporciona a geração de empregos, renda e arrecadação de impostos. O setor apresenta, ainda, fundamental representatividade econômica, tanto no mercado interno quanto no comércio internacional (RAMOS *et al.*, 2018).

As florestas são potenciais geradoras de empregos em toda a sua cadeia produtiva, que vai desde o plantio até as indústrias de celulose e papel (OLMOS, 2022). Os programas de reflorestamento já consolidados e os programas de fomento florestal em pequenas e médias propriedades também são grandes geradores de emprego e renda (DRUMOND, 2007).

Fica evidente, portanto, que as florestas equiâneas apresentam protagonismo na produção nacional e mundial de madeira. Dessa forma, é importante compreender e aprimorar o processo produtivo florestal. A produção de madeira envolve diversas etapas interdependentes que se correlacionam com a finalidade de obter melhores qualidade e produtividade associadas a menores custos.

A colheita florestal é considerada a etapa final da produção florestal e inclui o corte, a extração e o transporte da madeira (MACHADO *et al.*, 2014). A atividade é feita, em muitos casos, por meio de sistemas de colheita, que são as modalidades associadas a máquinas e operações específicas, variando conforme características das áreas a serem colhidas e necessidades de uso do produto final (NASCIMENTO *et al.*, 2011). Um dos sistemas mais utilizados é o de toras curtas ou *cut-to-length*. Embora apresente maior custo operacional, este último acarreta em menor impacto ambiental relacionado à exportação de nutrientes e compactação do solo (LOPES *et al.*, 2015).

O sistema de colheita *cut-to-length* é um dos mais utilizados por empresas que trabalham com plantios clonais de eucalipto e pinus no Brasil (PEREIRA, 2022). Nesse cenário, é justificável o desenvolvimento de estudos que busquem conhecer e otimizar as operações realizadas pelas máquinas utilizadas nesse sistema.

A colheita florestal é uma atividade de alta complexidade (CARMO *et al.*, 2015), exigindo, para a tomada de decisão, a compreensão das variáveis que afetam as operações envolvidas. Além dos parâmetros relacionados à produtividade, os custos relacionados às atividades e máquinas de colheita florestal também são determinantes na busca pela otimização dessa etapa de produção (BASSOLI *et al.*, 2020).

O *forwarder* é uma máquina autocarregável responsável pela extração da madeira recém-colhida que faz parte, junto ao *harvester*, do sistema de toras curtas ou *cut-to-length* da colheita florestal (LEITE *et al.*, 2020). As máquinas são majoritariamente articuladas, com suspensão da plataforma de carga sobre o chassi traseiro e possuem grua hidráulica responsável pelo auto carregamento e descarregamento. Sua eficiência é dependente, dentre diversos fatores, de sua capacidade de carga (MACHADO *et al.*, 2014).

O setor florestal passou, nos últimos anos, por um cenário de crescente demanda, em que a escassez de mão de obra, a competitividade e as exigências de mercado tornam necessárias as pesquisas que visassem aumentar o rendimento e a produtividade das operações (SCHETTINO, MINETTE & SOUZA, 2015). Segundo Schettino *et al.* (2022), a colheita é uma das etapas do processo produtivo florestal que, diante do cenário predominantemente mecanizado, mais tem sofrido mudanças tecnológicas voltadas ao aumento da eficiência.

Inovações florestais são sempre importantes em programas de pesquisa (WEISS, LUDVIG & ŽIVOJINOVIĆ, 2020), sendo imprescindível o desenvolvimento de ferramentas científicas baseadas no monitoramento das condições reais e posterior elaboração de modelos assistidos por sistemas computacionais que representem os cenários reais e auxiliem na tomada de decisões (SILVA, 2015a).

As simulações assumem papel de extrema importância nesse contexto. Estas são ferramentas de estudos relacionados à redução de custos e melhoria de processos. Elas são parte inerente da recente tecnologia denominada *digital twin* ou

gêmeo digital (SINGH, WEBER & BIRKE, 2021). O gêmeo digital corresponde à representação virtual de um objeto físico, contando com o fluxo de dados operacionais do conjunto ciberfísico (KRITZINGER *et al.*, 2018). Essa tecnologia tem sido considerada tendência na área das simulações (BOSCHERT & ROSEN, 2016).

Os gêmeos digitais (GD) são ferramentas desenvolvidas no contexto da Indústria 4.0, que busca unir a computação aos processos físicos através de potentes ferramentas tais como *Big Data Analytics*, *Internet of Things*, entre outras (SHARMA *et al.*, 2021; RÜßMANN *et al.*, 2015). As tecnologias 4.0, além de integrarem os processos, podem contribuir para a sustentabilidade ambiental e econômica, além de promover maior automação e segurança nos processos, obtendo-se, dessa forma, ganhos consideráveis em eficiência (KAMBLE, GUNASEKARAN & GAWANKAR, 2018).

Portanto, são muitos os desafios envolvendo a consolidação da Indústria 4.0 no setor florestal, em especial na colheita e nas máquinas que envolvem suas operações. Entretanto, os potenciais benefícios justificam a busca por pesquisas que visem suprir essas barreiras e proporcionar as vantagens que esses modelos tecnológicos podem proporcionar tanto nos ganhos em produtividade e eficiência quanto na otimização de custos.

1.2. Justificativa

A tecnologia do gêmeo digital já é uma realidade em diversos segmentos da economia. Tao *et al.* (2023) apontam os ganhos em monitoramento, prognóstico e diagnóstico das operações logísticas de toda a linha de produção de fábricas de fibras têxteis químicas. Os gêmeos digitais também são aplicados na construção civil, abrangendo todo o contexto do setor de forma holística e supervisória (YOON, 2023).

Knebel *et al.* (2023), avaliaram em seu trabalho a aplicação dos gêmeos digitais nas indústrias de gás e óleo como ferramenta de monitoramento e de manutenções rotineira e preditiva do ambiente operacional das indústrias. Segundo os autores, a

tecnologia também é capaz de monitorar a ocorrência de acidentes e proteger a população, o meio ambiente e as próprias empresas.

Ainda, existem áreas que já utilizam os gêmeos digitais com o objetivo de promover ganhos em monitoramento e gestão. A ferramenta é utilizada, por exemplo, no armazenamento de energia térmica (SEMERARO *et al.*, 2023), na medicina (LAREYRE *et al.*, 2020) e nas denominadas *smart factories* (LIU *et al.*, 2023). Até mesmo a agricultura já passa por uma revolução tecnológica, utilizando os GD no processo de automação do setor (PURCELL & NEUBAUER, 2022).

Embora a literatura aponte aplicações e benefícios proporcionados pela adoção dos gêmeos digitais como ferramenta de monitoramento, gestão e visualização (KHAJAVI *et al.*, 2019), os estudos voltados para a área florestal são ainda muito incipientes. Especificamente sobre a colheita florestal, uma das atividades de maior complexidade e grande representatividade de custos do setor, foram encontrados poucos trabalhos relacionados à aplicação efetiva da tecnologia do GD.

Dessa forma, este estudo é justificado tanto pela existência de raros trabalhos desenvolvendo GD na colheita florestal quanto pelo enorme potencial apresentado pela tecnologia em diversas outras áreas e segmentos da sociedade. Assim, esta pesquisa surge como uma forma de preencher lacunas importantes relacionadas às novas revoluções tecnológicas na colheita mecanizada.

Por fim, a modelagem de um gêmeo digital na operação de colheita, realizada por meio das simulações, também contribui de forma a aplicar uma metodologia promissora em problemas reais do setor relacionados a dificuldades em monitorar tanto a geração de dados operacionais quanto a própria atividade de extração florestal, visto que o monitoramento em campo e em tempo real das operações florestais exige estudos e aprimoramento.

1.3. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi modelar um gêmeo digital da extração florestal com o *forwarder* através da simulação de eventos discretos.

1.4. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo incluem:

- Definir e estratificar as variáveis relevantes para a construção do modelo do gêmeo digital;
- Identificar, estudar e compreender o comportamento da ocorrência das paradas realizadas pelas máquinas;
- Desenvolver o modelo do gêmeo digital através da simulação;
- Validar o modelo por meio dos métodos visual e comparativo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A colheita florestal

A colheita apresenta fundamental importância no setor florestal, uma vez que possui alta complexidade e representa mais de 50% dos custos operacionais (LEITE, GUEDES & DO AMARAL, 2019). O manejo das atividades de colheita envolve diversas variáveis, tais como fatores econômicos, produtivos e ambientais (ROSSIT *et al.*, 2019).

A importância da colheita florestal cria a necessidade de técnicas de otimização capazes de promover um beneficiamento mais racional e garantir maior aproveitamento da madeira (MINETTE *et al.*, 2004). Também é imprescindível o

conhecimento acerca da capacidade produtiva das máquinas e dos fatores que afetam sua eficiência, ainda com o objetivo de otimizar os processos (LINHARES *et al.*, 2012).

A colheita florestal no Brasil passou por diversas mudanças. Até 1940, o emprego de máquinas era praticamente inexistente. Os avanços ocorridos entre 1960 e 1970 introduziram as primeiras motosserras, seguidos pelo início da produção nacional de maquinário de médio porte. As grandes mudanças ocorreram a partir de 1980 em que, por fim, os tratores florestais substituíram os tratores agrícolas adaptados (FREITAS *et al.*, 2011).

Dentre os sistemas de colheita florestal mecanizada utilizados mundialmente, os que apresentam maior destaque são o *cut-to-length* e o *full tree*. O primeiro, caracterizado como sistema de toras curtas, utiliza o *harvester* como equipamento de corte e o *forwarder* como equipamento de baldeio. Já o segundo, denominado sistema de árvores inteiras, utiliza a combinação *feller buncher* e *skidder* para proceder as operações de corte e extração (UDALI *et al.*, 2023).

Estudos envolvendo o funcionamento das máquinas florestais e as variáveis que afetam as atividades são uma das crescentes preocupações da área, buscando a otimização das operações, os ganhos de produtividade e a redução de custos (LINHARES *et al.*, 2012). Assim, o entendimento do funcionamento, das particularidades e dos potenciais das máquinas de colheita é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de atingir os objetivos futuros do setor florestal.

A colheita florestal mecanizada é responsável pelo aumento da produtividade das atividades florestais, assim como pela redução de custos operacionais (RODRIGUES *et al.*, 2015). O *forwarder* é uma máquina autocarregável pertencente ao sistema *cut-to-length* e é responsável pelo baldeio das toras colhidas e processadas pelo *harvester* do interior para as extremidades dos talhões (LEITE *et al.*, 2020).

O baldeio ou extração florestal corresponde à etapa em que a madeira é transportada do interior dos talhões para as margens de estradas e é uma das atividades da colheita de maiores complexidade e custo (ARAÚJO, 2019). Essa atividade tem sua produtividade afetada por diversos fatores que variam desde as distâncias de baldeio até a declividade do terreno (LEITE *et al.*, 2014).

O *forwarder*, uma das máquinas mais utilizadas na extração florestal, é operado por operadores que, com altos níveis de concentração e atenção, realiza movimentos simultâneos de controle da máquina (SANTOS, 2021). A tecnologia do sistema *cut-to-length* pode ser utilizada tanto no corte raso quanto no desbaste de povoamentos florestais, uma vez que as máquinas são passíveis de adaptações que acompanhem as peculiaridades tanto das áreas de colheita quanto dos povoamentos florestais (TIERNAN *et al.*, 2004).

O uso do *forwarder*, assim como do *harvester*, representa o emprego de métodos mais modernos e intensos de mecanização, necessitando assim de grandes investimentos de aquisição e manutenção (KIM & SHIN, 2022). Dessa forma, para que seu uso seja rentável, é imprescindível que as máquinas operem em alta capacidade e em situações cujo desempenho seja favorável à operação (BONT *et al.*, 2022). Por isso, o estudo acerca do *forwarder* e suas atividades é fundamental para que haja melhor planejamento operacional da extração florestal, gerando tanto melhores resultados em produtividade quanto em redução de custos.

2.2. O uso das simulações como ferramenta de gestão no setor florestal

O setor florestal lida constantemente com questões em níveis estratégico e operacional no que diz respeito a tomada de decisões. Os desafios envolvem desde a escolha das áreas e épocas de plantio até quais as melhores formas de colher e transportar a madeira (GONÇALVES & SCARPIN, 2022). Segundo afirmam Junior, Cardoso & Vendrametto (2016), as simulações demonstram grande importância nesse contexto, uma vez que possibilitam enfrentar impasses e criar alternativas diante de tantos fatores decisivos e fundamentais.

Os softwares de simulação podem assumir o protagonismo nesse contexto, já que permitem uma grande variação de análises de cenários e conclusões sobre os problemas enfrentados em diversos segmentos do setor florestal. Heinrich (2010) desenvolveu um estudo avaliando a utilização do software Arena que, através da simulação de eventos discretos, auxiliou desde o planejamento da matéria prima até

a organização de turnos, custos e outros parâmetros operacionais da produção de madeira serrada.

Existem ainda estudos na literatura correlacionando o Arena à outras aplicações, como o dimensionamento de frotas para fornecimento de madeira. Em sua pesquisa, Silva (2015b) demonstrou que as simulações não só são satisfatórias na análise do comportamento de frotas como também demonstraram de maneira fiel aspectos reais encontrados em campo.

Outra área que utiliza as simulações como ferramenta de gestão é a de incêndios florestais. De acordo com Dimopoulou & Giannikos (2004), simular cenários alternativos para alocação e ação de equipes de combate através do software Simul8 é uma forma de atender às particularidades de cada situação. Segundo os autores, esse tipo de abordagem inclusive fornece inputs valiosos para a predição do comportamento dos incêndios nas áreas estudadas.

Modelos e sistemas de simulação também são encontrados na literatura como auxiliares na predição de processos ecológicos em áreas da floresta amazônica oriental (AZEVEDO *et al.*, 2008), além de atuarem como ferramentas de análise da efetividade dos planos de manejo sustentável já existentes em florestas de araucária. Esses modelos são capazes de apontar impactos e danos em situações reais nesses fragmentos florestais (SANQUETTA, 1999).

Já em relação à colheita florestal, registros datados dos anos 70 iniciam o uso de programas de simulações, ainda que de forma indireta, para monitoramento de custos de máquinas florestais (HOSOKAWA, 1977; BURGER, 1978). Já no início dos anos 90, surgiram programas de simulação e de controle da produção (HILDEBRAND, 1995), além da projeção e análise dos sistemas mecanizados de colheita e do acompanhamento da cadeia de produção desde a colheita até a fábrica (RANDHAWA & OLSEN, 1990).

Ainda nos anos 90, outros estudos relataram o desenvolvimento de um software que objetivou controlar as máquinas e avaliar sua performance em tempo real, unindo programas computacionais a joysticks conectados ao computador. Esse modelo representou uma evolução significativa no que diz respeito à avaliação de protótipos e aplicação de conceitos na colheita de madeira (BASS *et al.*, 1991).

Ademais, foram encontrados na literatura estudos correlacionando a importância das simulações utilizando sensoriamento remoto na determinação da sustentabilidade da colheita em florestas naturais tropicais (VANCLAY, 1994). Em época semelhante, Randhawa & Scott (1996), desenvolveram pesquisa acerca da aplicação de modelo de simulação especificamente para a colheita florestal comercial. Segundo os autores, as simulações são importantes na colheita devido ao alto grau de importância dessa atividade no setor e, naquela época, os estudos envolvidos nessa área eram praticamente inexistentes.

Já em 1999, Malinovski (1999) desenvolveu um simulador de colheita de madeira que, levantando mais de 70 variáveis influentes na produtividade e custo da operação, se mostrou ferramenta capaz de servir como base para planejamentos operacionais da produção de pinus e eucalipto com flexibilidade e agilidade.

Com o passar dos anos, as simulações foram ganhando mais espaço na colheita florestal. Atualmente, elas são utilizadas como importantes ferramentas de treinamento de operadores das máquinas florestais, visto que em muitos casos treinar os operadores na realidade do campo é oneroso e inviável (MUCELLINI, 2014). Já Lopes (2017) desenvolveu o sistema *Harvest Scheduling System*, que simula cenários da colheita florestal visando, através da análise de diversos critérios, o atendimento das demandas do planejamento operacional da colheita.

2.3. Telemetria e a integração com os sistemas de gestão

A telemetria é compreendida pela realização de medições à distância, e surgiu devido à necessidade da realização da mensuração em locais afastados ou inacessíveis (DE MATTOS, 2004). Essa tecnologia de transmissão em tempo real, devido à sua grande praticidade, ganhou as mais diversas áreas de pesquisa. A telemetria é aplicada atualmente na medicina, como ferramenta de transmissão de exames via *wireless* em tempo real; na ecologia, monitorando espécies da fauna e seus hábitos; na engenharia espacial, monitorando satélites, foguetes e mísseis; e em muitas outras áreas (MARTINCOSKI, 2003; MANTOVANI, 2001; ALMEIDA, 2007).

Segundo Long, Jordaan & Castro-Santos (2023), a telemetria foi concebida na década de 50 e, desde então, passa por diversas mudanças que visam a melhoria dos sistemas de GPS, acústica, rádio e satélite. Ainda de acordo com os autores, todas as formas de transmissão de dados em tempo real são dependentes de sinais de rádio que enviam as informações para receptores localizados em diversos pontos do planeta e do espaço.

A obtenção e o monitoramento de dados em tempo real por via remota, juntamente com a análise de padrões e tendências, são fundamentais para a avaliação do funcionamento de redes e possíveis falhas que acarretam muitas vezes em enormes perdas financeiras (ALHAMED *et al.*, 2023). Essa tecnologia pode ser suportada pelos conceitos da Indústria 4.0, cuja essência constitui-se no desenvolvimento de sistemas integrados de comunicação eficiente com o objetivo de aumentar os níveis de coordenação e eficiência (ZAMBON *et al.*, 2019).

Notadamente, o cenário de inovações da Indústria 4.0 e de tecnologias como a telemetria abrange, em sua maioria, as grandes empresas. Nesse sentido, a aplicação dessas potentes ferramentas de monitoramento e gestão em negócios de pequeno e médio porte torna-se um grande desafio, principalmente pela dinâmica de desenvolvimento dessas tecnologias, que ocorre de forma contínua e acelerada e dificulta o acompanhamento de menores empreendimentos (BAKKARI & KHATORY, 2017).

Visto que as tecnologias necessárias à utilização da telemetria são consolidadas majoritariamente nas áreas urbana e industrial, a aplicação dessa ferramenta no meio rural e agrícola é também considerada um grande desafio. Segundo Marucci *et al.* (2017), o emprego de tecnologias consideradas simples como o GPS (*Global Positioning System*), a radiofrequência e o *bluetooth* podem ser combinados à interação entre máquinas e operadores de máquinas agrícolas para tornar o campo um sistema auto otimizado em toda a cadeia de suprimentos.

Ademais, a era da digitalização trouxe consigo a possibilidade de automação de máquinas agrícolas e florestais, embasando o fenômeno da agricultura e das florestas de precisão. Esses conceitos envolvem a combinação de sensores e dados coletados das máquinas que, explorados de forma conjunta, fornecem informações

importantes para a otimização da produção e aumento do rendimento (MARUCCI *et al.*, 2017; GRIEPENTROG, 2016).

O agronegócio é o maior setor produtivo brasileiro, com significativa representação no PIB (CEPEA, 2022), tornando sua produtividade um dos fatores de grande visibilidade, principalmente em termos de aprimoramento ao longo do tempo. Assim, o emprego de tecnologias 4.0 nesse setor é vantajoso e pode possibilitar enormes ganhos financeiros e produtivos (MCKINSEY, 2016). Foi nesse cenário que essas tecnologias, com o auxílio de dados obtidos pela telemetria, possibilitaram o desenvolvimento de ferramentas capazes de auxiliar na produção agrícola e, por consequência, no setor florestal.

Na ciência florestal, especificamente, muitos estudos que abordam a telemetria a abordam como ferramenta de monitoramento de espécies em habitats florestais (ALLEVATO, 2013; VOGLIOTTI, 2003). Entretanto, estudos realizados por Goulart (2022) revelam o potencial da telemetria como instrumento para o emprego de tecnologias da Indústria 4.0 na manutenção de máquinas e equipamentos agroindustriais florestais.

Em relação aos gêmeos digitais, a telemetria assume papel fundamental, uma vez que permite o compartilhamento de dados via sensores em tempo real sem que haja necessidade de interferência humana (ABREU, LANA & RIBEIRO, 2019). Esse perfil de coleta de dados de maneira eletrônica já é consolidado no Brasil, principalmente no que diz respeito a pesquisa científica (WACHELKE *et al.*, 2014).

2.4. A Indústria 4.0 e a Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*)

A primeira revolução industrial foi responsável por introduzir a mecanização como forma de facilitar o trabalho fabril e aumentar a produtividade. A segunda também buscou os mesmos objetivos através do desenvolvimento dos motores a combustão, correias transportadoras e a divisão de trabalho. A terceira revolução foi caracterizada pela automação de diversos processos produtivos. Atualmente, se vivem o limiar da quarta revolução industrial: a Indústria 4.0 (NAKAGAWA *et al.*, 2021).

A iniciativa da Indústria 4.0 foi desenvolvida pelo governo alemão como estratégia de alta tecnologia para flexibilização, medição e monitoramento da produção em tempo real, aumentando a eficiência e reduzindo desperdícios. Sua filosofia baseia-se na transformação digital na indústria (DUMAN & AKDEMIR, 2021). As tecnologias mais populares englobadas por esse conceito são os sistemas ciber físicos, sistemas Inteligentes, Internet das Coisas (IoT), *digital twins*, *Big Data* e computação em nuvem. Diversas áreas baseadas em Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquinas tem convergido para apoiar essa revolução (NAZARENKO *et al.*, 2021).

Construídos inteiramente sobre os pilares das revoluções industriais anteriores, os conceitos englobados pela Indústria 4.0 envolvem um maior grau de digitalização, automação, virtualização e descentralização nos mais diversos setores produtivos (CULOT *et al.*, 2020; BORDELEAU, MOSCONI e DE SANTA-EULALIA, 2020). São muitas as promessas envolvendo as contribuições das tecnologias 4.0 nos aspectos sociais, ambientais e econômicos das sociedades. Por isso, o interesse em priorizar o entendimento de todo o conceito e suas aplicações aumenta muito entre governos, sociedades, comunidades industriais e academias (GHOBAKHLOO *et al.*, 2021).

A Internet das Coisas surgiu como um dos reflexos das tecnologias criadas pela Indústria 4.0, buscando a automação de ecossistemas inteligentes que combinam tecnologias operacionais e sistemas industriais capazes de alcançar altos graus de automatização (KEBANDE, 2022). O conceito, simples e eficiente, foi idealizado no início dos anos 2000 pelo pesquisador Kevin Ashton enquanto buscava desenvolver melhorias em transações comerciais conectando todas as ferramentas necessárias para tal (ASHTON, 2009).

De acordo com Yang (2023), os conceitos de IoT estão inseridos no cotidiano através das tecnologias pessoais, dos eletrodomésticos, das cidades inteligentes, entre outros. O autor justifica esse novo cenário apontando as evoluções computacionais e tecnológicas dos últimos tempos que possibilitam a comunicação efetiva entre diversos dispositivos inteligentes interconectados por configurações de comunicação, microcontroladores e modelos de trocas de dados.

Tripathy *et al.* (2023) descrevem que a arquitetura dos sistemas de IoT envolvem elementos externos, camadas de rede e sistemas de controle. Os

elementos externos são representados pelos sensores, que correspondem à fonte do fluxo de informações, e pelos dispositivos, que são representados pelos hardwares programáveis que funcionam como o destino final do fluxo de informações. Já as camadas de rede são responsáveis pela transmissão das informações e pela conexão entre sistemas de controle e elementos externos. Por fim, os autores caracterizam os sistemas de controle como a parte capaz de modelar os processos e delimitar as regras do sistema, além de realizar análises lógicas sobre os dados coletados de acordo com o conhecimento dos controladores.

É consenso entre diversos autores que o emprego da Internet das Coisas tem grande capacidade de melhorar as performances dos negócios, além de promover soluções mais sustentáveis (ONU, PRADHAN e MBOHWA, 2023). Entretanto, embora a tecnologia apresente potenciais promissores em diversas áreas, especialmente na engenharia, essa ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento (ONU & MBOHWA, 2021), dificultando seu emprego e aproveitamento efetivos.

O setor florestal também tem sido alvo de modificações estruturais e tecnológicas. Dantas & Andreoli (2017) citam a existência de uma verdadeira revolução florestal, justificada pela representatividade do setor que demanda, assim, inovações e avanços tecnológicos. Os nichos do setor florestal são os mais diversos, e nesse cenário as novas tecnologias podem atuar de diferentes maneiras buscando inovações e a melhoria de processos. Figueiredo *et al.* (2018) mostraram a importância do denominado “Manejo Florestal 4.0” ao utilizar aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), GNSS (Global Navigation Satellite System) de alta precisão e algoritmos de segmentação e geolocalização automáticos no manejo de precisão de florestas tropicais na Amazônia.

O crescimento da Indústria 4.0 gera no setor florestal grandes discussões sobre como extrair os melhores benefícios desse novo cenário. Estima-se que a adoção das novas técnicas de produção seja capaz de aumentar o valor agregado bruto do setor (BAYNE, DAMESIN e EVANS, 2017).

Ainda assim, as novas soluções digitais oferecem a possibilidade de um melhor gerenciamento dos desafios atuais e futuros. Estudos realizados na Europa Central avaliam os desafios e oportunidades em diversas etapas do fornecimento de madeira na região. Assim como as cadeias de processos industriais, os povoamentos passam

a ser digitalmente representados, possuindo, entretanto, imagens digitais muito mais complexas que as tradicionais linhas de montagens fabris, dada a natureza orgânica da matéria prima (MÜLLER, JAEGER & HANEWINDEL, 2019).

Sendo chamados de povoamentos virtuais, esses modelos contam com as informações sobre as árvores, a topografia, as condições de solo e demais informações pertinentes (ROSSMANN, SCHLUSE & SCHLETTE, 2009). Embora as florestas virtuais não possam ser atribuídas a etapas específicas do processo de abastecimento de madeira, elas geram uma base de dados que pode servir a diversas aplicações ao longo do processo (MÜLLER, JAEGER & HANEWINDEL, 2019).

As principais tecnologias envolvidas são o sensoriamento remoto e as técnicas avançadas de modelagem envolvendo inteligência artificial. Estudos realizados por Dassot, Constant e Fournier (2011), Torabzadeh, Morsdorf e Schaepman (2014), Valbuena *et al.* (2017) e White *et al.* (2016) mostram como o sensoriamento remoto evoluiu ao longo dos anos e apontam a tecnologia LiDAR (Light Detection And Ranging) como potencial capacitadora para o desenvolvimento das florestas virtuais. Segundo Rossmann, Schluse e Schlette (2009), a mão de obra especializada e os custos de aquisição de equipamentos constituem os principais problemas na aplicação florestal do sensoriamento remoto para a geração das florestas virtuais.

A colheita florestal também é uma área com projeções animadoras, uma vez que a digitalização dos povoamentos e das operações pode representar enormes ganhos na eficiência e na precisão do planejamento dessa área que é, de acordo com Machado (2014), a operação de maior custo da produção de madeira. Nesse contexto, as tecnologias da Indústria 4.0 podem facilitar a tomada de decisão quanto à acessibilidade e a trafegabilidade de áreas de colheita com base em dados de infraestrutura e suporte do terreno. Os modelos preditivos podem, nesse sentido, auxiliar na definição tanto da época de colheita quanto da sequência operacional mais indicada (SALMIVAARA *et al.*, 2016; GRIGOLATO, PELLEGRINI e CAVALLI, 2014).

Outras tecnologias na colheita florestal envolvem a utilização do LiDAR na demarcação de potenciais árvores a serem colhidas, bem como a utilização de telefones celulares no rastreamento de árvores demarcadas manualmente (MÜLLER, JAEGER e HANEWINDEL, 2019). Fransson, Brännström e Franklin (2021) exemplificaram ainda a aplicação da Indústria 4.0 na colheita ao descreverem o

processo em que as árvores são demarcadas nas florestas virtuais e, através de transmissão sensorial de dados, as máquinas de colheita são capazes de identificá-las e proceder o corte e a extração.

Além disso, a orientação e a navegação das máquinas de colheita, a coleta de dados cada vez mais precisos e completos, a transmissão em tempo real e remota dos dados facilitam a relação entre homens e máquinas, aumentam o controle de qualidade das operações e facilitam a tomada de decisões e resoluções de problemas de maneira prévia (FRANSSON, BRÄNNSTRÖM & FRANKLIN, 2021).

Em um panorama mais recente do setor florestal, Nemoto, Santos e Pinochet (2018) evidenciaram em seu estudo o potencial emprego da IoT na melhoria do desempenho em sustentabilidade de uma empresa do setor florestal. Já Pereira (2020), trabalhando com sensores IoT na área florestal, evidenciou que são muitos os desafios que envolvem a coleta de dados em campo e sua posterior transmissão remota. Entretanto, o autor demonstra que, focando-se nas necessidades específicas das operações, os ganhos em mobilidade e confiabilidade acerca da transmissão de dados podem ser rápidos e muito proveitosos.

A tecnologia também é empregada tanto na avaliação de impactos da utilização de biomassa florestal na biodiversidade quanto no monitoramento e detecção de incêndios florestais (LIU *et al.*, 2021; RAO *et al.*, 2018; STIAWAN *et al.*, 2022). Porém, em relação à colheita florestal, bem como à extração com o *forwarder*, são escassos na literatura trabalhos que lidem diretamente com o emprego da IoT como ferramenta de melhoria dos processos, tornando esse tópico uma excelente oportunidade na área da pesquisa florestal.

2.5. Gêmeo digital

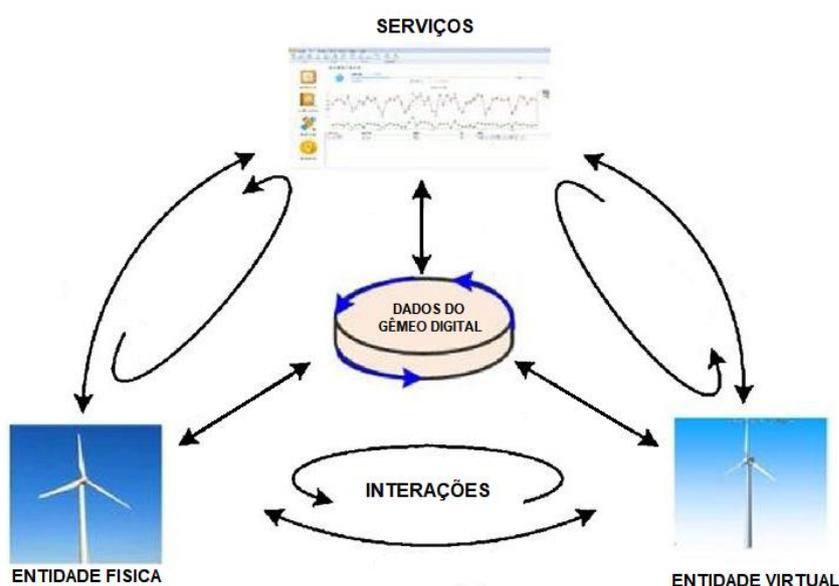
O conceito de gêmeo digital (*digital twin*) foi concebido em 2003 pelo especialista em engenharia da computação Dr. Michael Grieves. Na época, as representações digitais de produtos físicos ainda se encontravam em estágios iniciais de desenvolvimento (GRIEVES, 2014).

Dentre as definições de gêmeo digital encontradas na literatura, estes podem ser conceituados como a contraparte virtual e computadorizada de um sistema físico simulado com diversos fins, contando com a sincronização em tempo real dos dados obtidos em campo (NEGRI, FUMAGALLI & MACCHI, 2017). O modelo inicial de gêmeo digital proposto por Grieves era composto por três partes principais:

- a) Produtos físicos no espaço real;
- b) Produtos virtuais no espaço virtual;
- c) Conexões de dados e informações que unem o real e o virtual.

Publicações mais recentes já descrevem não mais três dimensões, e sim modelos multidimensionais que consideram também a geometria e o comportamento dos GD (ZHANG *et al.*, 2022). Tao *et al.* (2018) propõem a adição dos próprios dados dos gêmeos digitais ao escopo, obtendo dessa forma informações mais abrangentes e precisas. Funções dos gêmeos digitais, tais como detecção, julgamento e previsão, também são uma aposta dos autores para compor as partes do GD (Figura 1).

Figura 1 - As cinco dimensões dos gêmeos digitais



FONTE: Adaptado de Tao *et al.*, 2018.

Atualmente, um dos conceitos mais utilizados é aquele reformulado pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, em que o gêmeo digital é considerado uma tecnologia de simulação multifísica, multiescala e ultrafiel que reflete em tempo real o estado de um gêmeo correspondente com base em dados históricos, sensores em tempo real e modelos físicos (BARTH *et al.*, 2020). Ferreira, Armellini e de Santa-Eulalia (2020) apontam que os GD são uma das abordagens baseadas em simulação existentes na literatura, ou seja, eles são uma parte integrante da simulação com importância chave na aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 (ADAMENKO, KUNNEN e NAGARAJAH, 2020; NAKAGAWA *et al.*, 2021).

Uma vez que o valor dos GD foi se tornando cada vez mais claro ao longo do tempo, essa tecnologia passou a ser cada vez mais utilizada, sendo apontada inclusive como uma das dez principais tendências estratégicas atuais. O conceito de GD já é desenvolvido nas maiores empresas do mundo, e estimava-se que em 2021 metade dos maiores grupos industriais já iria adotar a tecnologia, com o potencial aumento até 10% da eficiência operacional (TOP, 2019).

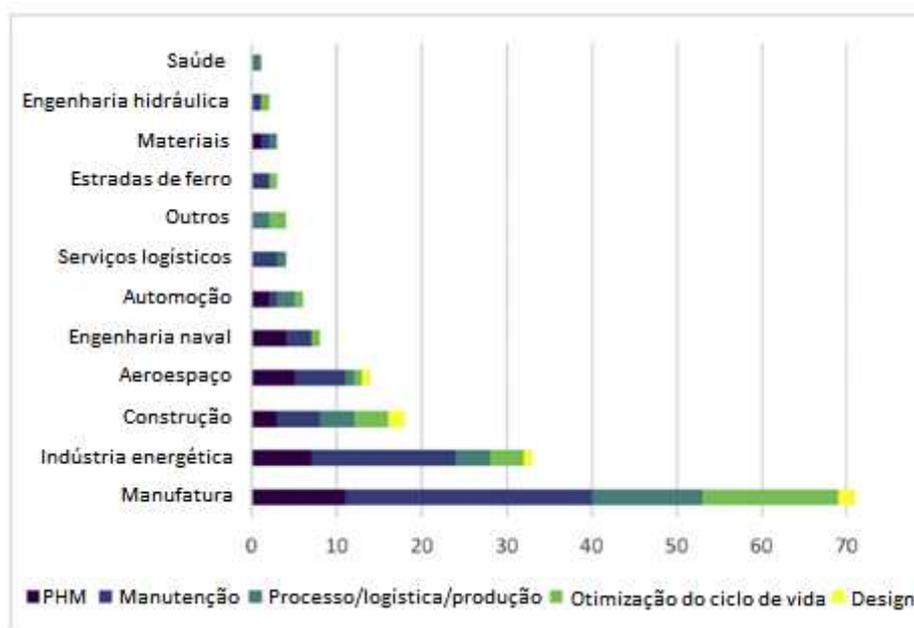
Os requisitos relacionados ao uso dos gêmeos digitais envolvem a necessidade de ferramentas capazes de unir a coleta física ao desenvolvimento virtual, garantindo a possibilidade do fluxo de dados entre esses dois mundos (GRIEVES, 2014). Ademais, sua associação com o *big data* também pode ser necessária, uma vez que a criação de um gêmeo digital requer grandes quantidades de dados e boa capacidade computacional (GRIEVES & VICKERS, 2017).

A otimização que a tecnologia do GD alcança minimiza o tempo de inatividade e o custo de desenvolvimento nas empresas. Suas aplicações atendem as mais diversas áreas. Um uso de sucesso do GD foi demonstrado no projeto Apollo 13 da NASA (MITTAL, 2020). Na área da saúde, o uso de GD também ganha destaque, principalmente durante a pandemia de COVID-19. Os gêmeos digitais foram usados nesse cenário como ferramentas de monitoramento e gestão em centros de vacinação em massa (PILATI *et al.*, 2021).

De acordo com Sacks *et al.* (2020), os GD também podem ser utilizados na construção civil, em que modelos digitais de edifícios são desenvolvidos para facilitar o processo de construção. Na educação, os gêmeos digitais atuam como ferramentas de apoio à realidade virtual, facilitando experiências práticas e treinamento dos

estudantes. Na indústria, assumem papel fundamental como auxiliares no conhecimento acerca do funcionamento interno e falhas em processos e produtos. Os principais setores industriais que adotam a tecnologia dos gêmeos digitais estão descritos na Figura 2.

Figura 2 - Gêmeos digitais nos principais setores industriais



FONTE: Adaptado de Errandonea, Beltrán & Arrizabalaga, 2020.

Dentre os benefícios dos gêmeos digitais, citam-se o gerenciamento e a integração de dados e sensores com o objetivo de aprimorar o monitoramento de operações (ATTARAN & CELIK, 2023). Além disso, eles auxiliam na visualização do status e desempenho dos produtos durante seu desenvolvimento. Os gêmeos digitais também têm boa comunicabilidade com outras tecnologias 4.0 como a IoT. A gestão de crises também pode se beneficiar dessa tecnologia, já que esta pode auxiliar na identificação de problemas e suas causas antes mesmo de sua ocorrência (KWOK *et al.*, 2021).

É fato que serviços baseados em gêmeos digitais agregam valor aos negócios e promovem a colaboração entre especialistas de diversas áreas tanto dentro quanto fora das empresas (BARTH *et al.*, 2020). Entretanto, o valor e os retornos de investimentos em GD são muitas vezes difíceis de serem observados na prática. Isso

ocorre devido à alta complexidade acerca do tema e dos estudos ainda iniciais sobre os impactos da tecnologia em processos internos e externos (VOELL *et al.*, 2018).

Atualmente, tanto na área acadêmica quanto na prática, protocolos de comunicação, modelos e fluxos de dados são combinados para desenvolver aplicativos criadores de gêmeos digitais (BARTHELMEY *et al.*, 2019). Entretanto, a utilização ampla dessa tecnologia ainda enfrentará muitos desafios. O alto custo das ferramentas necessárias na criação de um GD, a segurança digital da tecnologia e a dependência da conectividade de rede configuram barreiras na ampla difusão dos GD nos diversos setores (MITTAL, 2020).

Adamenko, Kunnen e Nagarajah (2020) mencionam que os dados utilizados na criação do GD geralmente são oriundos de diversas fontes e possuem, portanto, certo grau de desacoplamento. Os possíveis desvios entre os sistemas reais e as imagens digitais também podem colocar em risco a confiabilidade do gêmeo digital. Dessa forma, a conversão e o manejo adequado dos dados permitem que eles se conectem e forneçam informações confiáveis sobre o ciclo de produção, de vida e a funcionalidade dos produtos.

As exigências de infraestrutura de rede também constituem um importante requisito quando se trata de GD. A entrega de dados precisa ser contínua, mantendo assim a integração temporal entre objeto e imagem. Esse cenário só pode ser alcançado através da conectividade efetiva entre sensores e sistemas. O tempo dispendido na construção dos sistemas digitais de alta resolução e personalizáveis também é fator importante (TAO *et al.*, 2023). Portanto, a análise dos requisitos necessários à construção de GD deve ser acompanhada do estudo dos custos e desafios envolvidos, garantindo assim que os modelos sejam concisos e forneçam informações de valor na gestão empresarial.

Na área florestal, os gêmeos digitais já têm sido empregados na modelagem de florestas por meio de imagens de satélite Landsat (JIANG *et al.*, 2022). A tecnologia também já é empregada no monitoramento individual de árvores (NIŢĂ, 2021) e na criação de florestas virtuais, com toda a sua complexidade e variabilidade (BUONOCORE, YATES & VALENTINI, 2022). Também já foram encontradas aplicações dos gêmeos digitais que, por meio da simulação, auxiliam na manutenção

de estradas florestais (ARRIVABENI, 2021). Por fim, Silva (2021) idealizou um modelo de gêmeo digital para o corte florestal com o *harvester*.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta de dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos da operação de extração florestal com o *forwarder* em plantios comerciais de eucalipto de uma empresa do setor florestal localizada em Minas Gerais. O tipo de solo predominante da região é o latossolo vermelho-amarelo e o clima característico é o tropical com inverno seco (Aw segundo a classificação Köppen), com temperatura anual média de 23,8° e 1108 mm de precipitação média anual.

Os dados coletados referem-se à atividade de extração da madeira do interior para a margem dos talhões utilizando-se o *forwarder*, pertencente ao sistema *cut-to-length* de colheita florestal. O corte da madeira extraída pela máquina em estudo foi realizado pelo *harvester*. Os dados foram coletados durante três turnos de trabalho: Turno 1: 00 às 08 h; Turno 2: 08 às 16 h e Turno 3: 16 às 24 h.

Foram utilizados dados de três máquinas diferentes, sendo uma delas da fabricante John Deere (Figura 3) e as demais da fabricante Ponsse (Figura 4). As especificações técnicas das máquinas estão descritas na Tabela 1.

Figura 3 - *Forwarder* John Deere

FONTE: John Deere, 2023.

Figura 4 - *Forwarder* Ponsse

FONTE: Grupo Timber, 2023.

Tabela 1 - Especificações técnicas das máquinas estudadas

Código da máquina	Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Capacidade de carga média (m ³)	Capacidade da garra (m ²)	Tipo de rodado
FG33	John Deere	1910E	186	12,19	0,36	Pneus
FG52	Ponsse	Elephant King 8x8	210	9,63	0,42	Pneus
FG54	Ponsse	Elephant King 8x8	210	9,63	0,42	Pneus

As três máquinas utilizadas possuem tempos de uso diferentes, medidos em horas. O *forwarder* FG33 possuía, em 30 de abril de 2023, 30.010,10 horas de uso. Na mesma data, o horímetro das máquinas FG52 e FG54 indicava 15.209,70 e 11.804,30 horas, respectivamente. A substituição das máquinas na empresa cujos dados foram coletados ocorre quando as mesmas alcançam o tempo de uso de 30.000 horas, em média.

A escolha das máquinas cujos dados serviram como inputs do modelo de GD foi feita de maneira cuidadosa para que a maior diversidade possível de cenários pudesse ser representada. As máquinas selecionadas possuem horímetros distintos, representando desde as condições de máquina mais jovem quanto de máquinas em idade de substituição. Os dados coletados dessas máquinas oferecem grande diversidade de operadores com diferentes datas de admissão na empresa, de regiões trabalhadas, de paradas mecânicas e operacionais, de tipos de extração e de produção. Isto foi necessário para permitir a construção de um modelo abrangente quanto à realidade operacional da extração de madeira.

3.2. Caracterização dos dados

Os dados utilizados na modelagem do gêmeo digital foram coletados entre janeiro de 2022 e abril de 2023 e contaram com a diversidade de máquinas, formas de manejo, admissão dos operadores, regiões, paradas e produção. Estas informações foram concentradas em uma base de dados do software Microsoft Excel, que era composta por boletins que continham as informações acima citadas.

A base de dados é estratificada em boletins, que correspondem aos dados registrados por um operador em um turno de trabalho, e cada um deles contém as informações do operador, do tipo de extração, da região e da produção. Ainda, em cada boletim são encontrados um ou vários dados sobre as paradas realizadas pelas máquinas. Cada tipo de parada apontado na planilha traz consigo as informações de data e horário iniciais e finais correspondentes àquela parada.

Dentre as formas de extração adotadas atualmente pela empresa, foram utilizados neste estudo dados de boletins cujas extrações eram do tipo padrão e guincho. A extração padrão ocorre em terrenos com inclinação até 28° e a máquina transita e trabalha livremente pelos talhões. Já a extração do tipo guincho contempla terrenos com $28^\circ < \alpha \leq 38^\circ$ de inclinação, nos quais o *forwarder* trabalha ancorado em estacas via cabos de aço.

Ainda que a empresa trabalhe com uma terceira forma de extração especialmente em terrenos de inclinação superior a 38° , dados desse modelo não foram abordados na modelagem do GD. Sendo um dos requisitos para a criação e utilização de um gêmeo digital a conectividade de dados, um modelo especial de extração que utiliza combinações de equipamentos que ainda não são passíveis de transmitir dados via telemetria impossibilita tanto a coleta de dados automatizada quanto a aplicação do modelo de GD.

Já em relação às informações sobre os operadores, as informações da base de dados contam com a matrícula do operador responsável por cada boletim e com a data de admissão do mesmo na empresa. Os registros mais antigos mostram que os operadores mais antigos da empresa foram admitidos em 1985, totalizando 38 anos de experiência. Já os operadores mais recentes foram admitidos em 2023.

Outra informação encontrada no banco de dados é a região em que a atividade de extração foi realizada. A estratificação das regiões de colheita foi feita considerando-se a complexidade e diversidade de perfis de inclinação observados na área estudada. A distribuição espacial da atividade florestal da empresa dispõe de agrupamentos de três regionais e seis regiões diferentes.

Uma vez que as regionais não apresentam diferenças expressivas de padrões de inclinação do terreno, e também pelo fato de regiões localizadas em regionais diferentes apresentarem padrões muito semelhantes de declividade, os dados das regiões é que compuseram a informação de localidade dos boletins. Os perfis de inclinação nas seis regiões estudadas estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Perfis de extração de acordo com as regiões abordadas no estudo

Regional	Região	Perfil de extração (%)		
		Padrão ($0^\circ \leq \alpha \leq 28^\circ$)	Guincho ($28^\circ < \alpha \leq 38^\circ$)	Especial ($38^\circ < \alpha \leq 45^\circ$)
1	1-A	91	7	2
	1-B	87	10	3
2	2-A	85	10	5
	2-B	97	3	0
	2-C	55	32	13
3	3-A	56	34	10

Outro parâmetro fundamental para a construção do modelo de gêmeo digital é a identificação e caracterização das paradas realizadas pelas máquinas ao longo de seu ciclo produtivo. De todos os apontamentos realizados pelos operadores em campo, as paradas podem ser do tipo mecânica ou operacional.

As paradas mecânicas dependem de equipes específicas de manutenção ou remoção para realização das atividades. Já as paradas operacionais estão relacionadas a atividades e ações que dependem do próprio operador ou de equipes internas da área de colheita florestal da empresa. A descrição das paradas e de sua caracterização estão contidas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Paradas mecânicas realizadas pelas máquinas

Nome da parada	Descrição
Abastecimento	máquinas em pausa enquanto comboios responsáveis abastecem e lubrificam as máquinas em campo
Aguardando manutenção	o operador verifica problema mecânico e aguarda a equipe de manutenção acionada chegar em campo para realizar a ação corretiva
Fim de turno em manutenção	o turno do operador é encerrado enquanto a máquina está inativa e em manutenção
Lavagem	equipes externas responsáveis vão a campo realizar a lavagem das máquinas
Manutenção técnica	realizada por equipes externas e especializadas
Remoção	a máquina permanece inoperante enquanto é removida do projeto para realizar manutenções que não são possíveis no ambiente de campo ou então para mudança de projeto

Tabela 4 - Paradas operacionais realizadas pelas máquinas

Nome da parada	Descrição
Aguardando remoção	a máquina permanece inativa aguardando o transporte específico para a realização da mudança de projeto
Ancoragem	o operador realiza a fixação das estacas necessárias ao trabalho ancorado da máquina

Nome da parada	Descrição
Controle de qualidade	preenchimento de checklist pelo próprio operador sobre as condições da máquina e da operação de extração
Falha de processo	acasos relacionados à danos que podem ocorrer à máquina no processo de extração
Falha operacional	falhas humanas que danificam a máquina ou partes dela fundamentais à operação
Inspeção visual	avaliação visual das condições da máquina por parte do operador
Limpeza	retirada de resíduos que prejudicam a continuidade adequada da operação, realizada pelo próprio operador
Mau tempo	situações meteorológicas que impossibilitam a continuidade da atividade
Operador ausente	máquina inativa devido à ausência do operador por motivos pessoais ou imprevistos
Pausa pessoal	pausas realizadas pelos operadores por necessidades fisiológicas, de hidratação, e outras
Pré-ancoragem	pausa para aguardar a fixação, feita por equipes especializadas, das estacas utilizadas para a operação com guincho
Refeição	máquina inativa enquanto o operador realiza pausa para alimentação
Reunião operacional / de segurança	reuniões para repasses operacionais e de saúde e segurança no trabalho

Nome da parada	Descrição
Trânsito	consiste na mudança de projeto realizada pela máquina
Trânsito para manutenção	deslocamento da máquina até as margens da estrada onde as equipes de manutenção conseguem acesso para a realização dos reparos
Trânsito para abastecimento	deslocamento da máquina até as margens da estrada onde os comboios de abastecimento conseguem acesso
Treinamento	atividade em pausa enquanto, ainda em campo, o operador passa por treinamentos para aprimoramento da operação
Troca de turno	parada da máquina para que um operador saia do turno e outro assuma a atividade

3.3. Construção do modelo do gêmeo digital

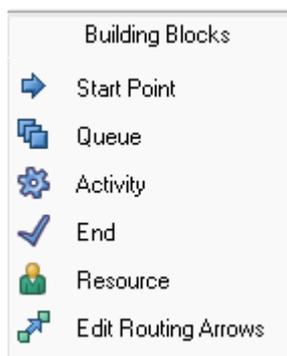
A modelagem do gêmeo digital foi realizada através do Simul8. O Simul8 é um software de simulação de eventos discretos desenvolvido na Escócia no início dos anos 90 (CHWIF & MEDINA, 2006). Este permite a criação de modelos visuais de simulação com diversos testes a serem rodados, gerando dados estatísticos acerca da performance dos sistemas desenvolvidos (MCGREGOR & CAIN, 2004).

O uso da simulação de eventos discretos (SED) neste trabalho é justificado pelas características que os dados utilizados na modelagem do gêmeo digital assumem. De acordo com Amarante *et al.* (2022), esse tipo de simulação envolve dados que assumem valores discretos e com determinação clara das mudanças no

sistema. Além disso, na SED todos os dados, entidades e atividades são conhecidos após o modelo estar finalizado e pode-se inclusive entender os eventos de forma cronológica (PONTES, DO AMARAL e RODRIGUES, 2020).

A criação de um modelo de simulação utilizando o Simul8 é realizada através de “*building blocks*” ou ferramentas de construção que consistem em parâmetros de início e fim, filas e recursos (Figura 5). Outro parâmetro disponibilizado pelo software engloba as setas de rotas, que interligam os blocos e conferem fluidez e consistência ao modelo.

Figura 5 - “*Building blocks*” ou ferramentas de construção de modelos de simulação



FONTE: A autora.

A definição de quais aspectos da atividade de extração deveriam ser atribuídos a cada um desses blocos de simulação foi feita com base no conhecimento dos pesquisadores envolvidos nesse trabalho e em consultas realizadas às equipes de colheita florestal da empresa cujos dados foram coletados. Dessa forma, buscou-se garantir que o modelo representasse a realidade da operação da maneira mais fiel possível. A atividade de extração florestal está esquematizada de forma conceitual na Figura 6.

Figura 6 - Esquema conceitual da atividade de extração florestal



FONTE: A autora.

3.3.1. Configurações iniciais

Para o início da modelagem do gêmeo digital, foi necessário configurar algumas premissas básicas no Simul8. Essas premissas envolvem tanto o ajuste das propriedades do relógio de simulação do modelo quanto a alocação dos turnos de trabalho. Quanto às propriedades do relógio, a unidade de tempo foi ajustada em minutos, a definição da jornada de trabalho foi feita assumindo-se que a simulação deve ocorrer 7 dias por semana, iniciando a atividade à 00:00 e encerrando-a às 24:00. As configurações do relógio estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7 - Configurações das propriedades do relógio de simulação

FONTE: A autora.

Em relação aos turnos de trabalho ao modelo, foram adicionados os três turnos com duração de 8h observados na realidade da operação, em campo. Ainda, nas configurações desses três intervalos, foi assinalada a propriedade que define que os mesmos ocorrem todos os dias da semana, sem exceção. Os turnos, com seus horários de início e término estão descritos abaixo:

- Shift 1: 00:00 às 08:00;
- Shift 2: 08:00 às 16:00;
- Shift 3: 16:00 às 24:00.

3.3.2. Ponto inicial (*Start Point*)

Para a configuração dos parâmetros do “*start point*”, foi necessário inicialmente nomear o *building block*, informar o tempo entre chegadas do insumo do modelo de simulação e o tipo de distribuição estatística dessa informação. As configurações básicas de um dos pontos iniciais da atividade de simulação estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Configurações iniciais dos parâmetros do *start point*

FONTE: A autora.

No modelo de simulação do GD, os *start points* correspondem à madeira no interior do talhão ainda a ser extraída, uma vez que a extração com o *forwarder* de fato é iniciada com a madeira cortada pelo *harvester* distribuída por todo o talhão. Para a definição de quais dados iriam compor os *start points*, foi necessário observar que a base de dados utilizada no desenvolvimento do modelo não engloba o corte com o *harvester*, e portanto não há dados reais do volume de madeira disponível para extração em função da atividade de corte.

Assim, para configurar o início da atividade de extração, as entradas foram os carregamentos de madeira comportados pelo *forwarder*. A determinação do tempo entre chegadas desses carregamentos de madeira foi feita calculando-se, por meio das Equações 1 a 4: (1) a produção média por boletim de cada máquina, (2) a capacidade de carga média das máquinas, (3) o número médio de carregamentos que cada máquina comporta por boletim e (4) o tempo, em minutos, entre a chegada de cada carregamento de madeira para a execução da extração. O tipo de distribuição selecionado foi a distribuição média, uma vez que não existem dados reais da produção dos *harvesters* para proceder análises e a consequente configuração estatística mais detalhada no programa de simulação.

$$(1) \quad PMB = \frac{PTm}{NB}$$

$$(2) \quad CMt = \frac{CM_{9FG33} + CM_{9FG525} + CM_{9FG54}}{3}$$

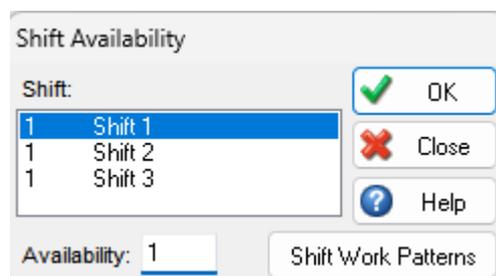
$$(3) \quad NCB = \frac{PMB}{CM}$$

$$(4) \quad TEC = \frac{NCB}{TB}$$

Em que: PMB: produção média por boletim, em metros³; PTm: produção total da máquina, em m³; NB: número total de boletins; CMt: capacidade média das máquinas, em m³; CM: capacidade média de cada máquina; NCB: número de carregamentos por boletim; TEC: tempo entre chegadas, em min; TB: tempo de duração de um boletim, em min.

Também foi necessário configurar o parâmetro *Constrains*, que envolve a alocação dos turnos de trabalho ao longo da atividade do *start point*. Nesse caso, foi atribuído o valor 1 no campo de disponibilidade dos três turnos de trabalho (Figura 9). A atribuição do valor 1 indica que os inputs podem ser recebidos sem restrições nos três turnos de trabalho de forma ininterrupta.

Figura 9 - Configuração da disponibilidade dos turnos no parâmetro de início da atividade de extração



FONTE: A autora.

Por fim, foi necessário configurar as rotas de saída dos pontos iniciais do modelo de GD. Essas rotas é que determinam o comportamento do modelo: caso haja

paradas mecânicas, essas rotas precisam ser alocadas no sistema. Dessa forma, para cada *start point*, foi determinado o percentual de boletins continham informações de abastecimento (Equação 5). De posse desses valores, o *routing out* de cada um dos três pontos iniciais foi configurado enviando para abastecimento o percentual encontrado na equação 5, e o restante enviado para as filas das próximas atividades.

$$(5) \quad PBAb = \frac{NBAb * 100}{NB}$$

Em que: PBAb: percentual de boletins que continham a atividade de abastecimento; NBAb: número de boletins de abastecimento; NB: número total de boletins.

3.3.3. Recursos (*Resources*)

Outro parâmetro fundamental para a modelagem do GD é a definição dos recursos básicos que irão compor a modelagem. Foram inseridos e configurados os *building blocks Resources* que são exclusivos de cada uma das três atividades de extração contidas no modelo. As configurações desses *building blocks* envolvem a nomeação e a definição do número de cada tipo de recurso disponível no modelo.

Os *building blocks* exclusivos de cada atividade de extração adicionados foram:

- Máquina: três recursos correspondendo, cada um deles, a uma das máquinas utilizadas no estudo;
- Operador: três recursos correspondendo, cada um deles, a um grupo de operadores responsável por uma máquina em um turno de trabalho de 8h;

Também foram adicionados os recursos referentes às atividades de paradas mecânicas. Para estas, foram adicionados:

- Um recurso correspondendo à equipe de abastecimento;
- Um recurso correspondendo à equipe de manutenção;
- Um recurso correspondendo à equipe de remoção.

3.3.4. Atividade (*Activity*)

Este tópico se refere às configurações dos *building blocks* correspondentes às atividades do modelo de simulação. Para essa etapa, foram adicionadas doze atividades ao modelo, sendo três delas correspondentes à extração de madeira, três delas relacionadas às paradas realizadas pelas máquinas: abastecimento e lubrificação, manutenção técnica e remoção, e seis delas relacionadas a decisões sobre necessidade ou não de realizar essas paradas.

As atividades adicionadas ao modelo que tratam da decisão sobre realizar ou não uma parada mecânica têm como objetivo garantir que o mesmo reflita as condições encontradas na base de dados estudada e conseqüentemente na operação. Nela, um boletim pode conter dados de uma manutenção, mas não de uma remoção, por exemplo. Assim, essas atividades decisórias garantem que a realização de paradas mecânicas ocorra de maneira fiel à realidade.

As configurações das atividades de decisão envolveram sua nomeação, definição do tempo de duração e rotas de saída. Para a definição dessas *routing out*, foi necessário calcular o percentual de boletins que continha informações de manutenção e remoção (Equações 6 e 7). De posse desses valores, as saídas de cada uma das atividades foram configuradas enviando para as paradas os percentuais encontrados nas Equações 6 e 7, e para as filas das próximas atividades as quantidades não-participantes das paradas mecânicas.

$$(6) \quad PBMan = \frac{NBMan * 100}{NB}$$

$$(7) \quad PBRem = \frac{NBRem * 100}{NB}$$

Em que: PBMan: percentual de boletins que continham a atividade de manutenção; PBRem: percentual de boletins que continham a atividade de remoção; NBMan: número de boletins de manutenção; NBRem: número de boletins de remoção; NB: número total de boletins.

Também foram adicionados e configurados os *building blocks* das atividades referentes às paradas mecânicas executadas pelas máquinas durante a extração. A adição dessas atividades foi necessária para representar aquelas atividades que

dependem de recursos comuns a mais de uma máquina para sua execução. Tanto o abastecimento quanto a manutenção e a remoção são executadas por equipes que atendem mais de um *forwarder* de forma simultânea. Assim, as *activities* relacionadas a essas paradas foram adicionadas ao modelo com o objetivo de representar os possíveis gargalos gerados pela competição por recursos nas operações.

Quanto às configurações desses blocos, foi necessário definir inicialmente a duração dessas atividades, em minutos. Para a determinação desse fator, foram:

- criadas três tabelas (“Abastecimento”, “Manutenção” e “Remoção”) contendo as datas e horas iniciais e finais das paradas mecânicas de todas as máquinas juntas;
- calculados, pela Equação 8, os tempos de duração de cada uma dessas paradas;
- calculada a média de duração das paradas pela Equação 9.

$$(8) \quad DP = Hf - Hi$$

$$(9) \quad DMP = \frac{\sum DP}{NB}$$

Em que: DP: duração da parada, em minutos; Hf: hora final da parada; Hi: hora inicial da parada; DMP: duração média da parada, em minutos; NB: número total de boletins.

Os recursos alocados aos *building blocks* das paradas mecânicas foram as equipes responsáveis pela execução das atividades demandadas em cada uma das paradas: equipes de abastecimento, equipes de manutenção e equipes de remoção. Embora a atividade de extração florestal exija um número muito maior de recursos do que essas equipes, foram considerados aqui nesse estudo apenas aqueles que, de maneira geral, resultam em interrupção da atividade de extração quando ausentes.

Também foi necessário configurar as *routings out* das três atividades. Esses parâmetros foram definidos seguindo as seguintes etapas:

1. foi rodado um piloto do modelo de simulação, com um dia de duração, a fim de compreender quantos carregamentos de madeira o sistema seria capaz de processar em um dia de trabalho;

2. os resultados desse piloto informam qual a capacidade diária do modelo de GD com relação total de carregamentos possíveis de processamento;
3. de posse da quantidade de carregamentos processáveis por dia, e da porcentagem dos mesmos que precisou de abastecimento, foi calculado o número de carregamentos que passariam pelo abastecimento;
4. com base nos números de carregamentos de cada uma das máquinas, foi calculada, em relação a todos os carregamentos que passaram pelo abastecimento, a porcentagem que cada um deles representou. Essas porcentagens de carregamentos, após o abastecimento, seguem então para as filas das próximas atividades.

Com relação às atividades de extração, foram adicionados três *building blocks* representando as extrações com a FG33, FG52 e FG54, respectivamente. O tempo de duração de cada uma das três atividades de extração foi definido como o período necessário, em minutos, para que a máquina conseguisse processar um carregamento inteiro de extração. O cálculo do tempo de duração das atividades, em minutos, foi realizado por meio da Equação 10.

$$(10) \quad TDA = \frac{DB * CM}{VM}$$

Em que: TDA: tempo médio de duração da atividade de extração, em minutos; DB: tempo de duração do boletim, em minutos; CM: capacidade média das três máquinas, em m³; VM: volume médio de madeira por boletim de cada máquina, em m³.

Os recursos alocados aos *building blocks* das atividades de extração foram aqueles exclusivos de cada operação: máquinas e operadores. Para cada uma das atividades foi definido então um recurso correspondente à máquina e um ao operador, ambos com disponibilidade integral para a extração florestal.

Quanto à eficiência da atividade de extração, foram utilizados os tipos de paradas realizadas pelas máquinas e os dados relacionados à frequência temporal com que ocorrem. Nesta configuração, os dados de entrada são os *Current Break*

Type Names, que correspondem aos nomes das paradas e os *Times Between Breaks*, que estão relacionados ao tempo, em minutos, entre a ocorrência de uma parada e sua ocorrência subsequente. A determinação dos tempos entre paradas foi feita calculando-se a diferença entre os dias e horas do início de um apontamento e os dias e horas do fim do apontamento anterior (Figura 10).

Figura 10 - Demonstração do cálculo para determinação dos tempos entre paradas

	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	COD_BOLETIM	ZEQUIPAMENTO	PARADA	DAT_INI	HOR_INI	DAT_FIM	HOR_FIM	Tempo entre ocorrências	Tempo entre ocorrências (min)
2	7272053	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	02/01/2022	17:00:00	02/01/2022	17:30:00		
3	7275747	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	05/01/2022	05:50:00	05/01/2022	06:16:00	=(D3+E3)-(F2+G2)	3620,00
4	7277797	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	05/01/2022	21:13:51	05/01/2022	21:41:02	14:57:51	897,85
5	7279717	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	06/01/2022	21:47:25	06/01/2022	22:02:22	24:06:23	1446,38
6	7283327	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	07/01/2022	21:24:48	07/01/2022	21:39:44	23:22:26	1402,43
7	7283327	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	07/01/2022	21:39:44	07/01/2022	21:40:27	00:00:00	0,00
8	7283798	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	08/01/2022	13:31:47	08/01/2022	13:52:21	15:51:20	951,33
9	7284389	9FG33	Abastecimento/Lubrificação	09/01/2022	17:22:27	09/01/2022	17:51:10	27:30:06	1650,10

FONTE: A autora.

De posse dos tempos entre paradas das três máquinas estudadas, foi realizada análise estatística para determinar o tipo de distribuição desses dados e os parâmetros estatísticos envolvidos nas distribuições. Para configuração dos *Times Between Breaks*, foram escolhidas as distribuições dentre as opções oferecidas pelo software Simul8. A determinação dos tipos de distribuição estatística e dos parâmetros envolvidos nessas distribuições foi realizada através da versão trial do software EasyFit. Com base no resultado do teste de aderência de Komolgorov-Smirnov, foi escolhida a melhor função para cada variável.

As configurações de rota de saída ou *routing out* determinaram quais os caminhos foram seguidos pelos insumos após a conclusão da atividade. Nas extrações configuradas no modelo, as rotas de saída levam a madeira até o destino final, que é o ponto de saída do modelo de simulação.

Tanto nos *building blocks* das atividades de extração quanto nos blocos das atividades referentes às paradas mecânicas e às decisões, os turnos foram configurados de modo a garantir que a atividade seguiria sem interrupções durante todas as horas do dia e todos os dias da semana.

3.3.5. Fila (*Queue*)

Em um modelo de simulação, são adicionadas filas (ou *queues*) nas quais os insumos ficam aguardando algum tipo de processamento ou atividade. Essas filas acontecem quando a procura por uma determinada atividade supera a capacidade de processamento da mesma (Rodrigues, 2014). As configurações envolvidas nessa etapa correspondem apenas à inserção e nomeação das filas no modelo de simulação.

Na modelagem desenvolvida neste trabalho, foram adicionadas filas antecedendo todas as atividades existentes. Essas filas tem como função tanto abrigar os recursos que aguardam o início de atividades específicas quanto os que competem por atividades. Assim, nesse cenário em que as máquinas utilizam recursos ou participam de atividades comuns, as filas irão abrigá-las enquanto aguardam a liberação de uma atividade para serem atendidas.

3.3.6. Setas de Rotas (*Routing arrows*)

As *routing arrows*, na simulação, são as setas que interligam os blocos de construção do modelo, indicando os caminhos pelos quais os insumos poderão percorrer desde sua entrada até o destino final. No modelo de GD desenvolvido neste trabalho, as setas interligaram os inícios das atividades às filas. Das filas, os insumos foram conduzidos às próximas atividades que envolviam tanto a tomada de decisão quanto as paradas mecânicas.

As *routing arrows* também conduziram os carregamentos de madeira até as atividades de extração propriamente ditas e, em seguida, levaram os insumos ao ponto final da atividade. Uma vez que os tempos e distâncias de deslocamento não fazem partes dos dados utilizados na modelagem do GD, esses parâmetros foram

desconsiderados atribuindo-se zero a todos os tempos de deslocamento de todas as setas do modelo.

3.3.7. Fim (*End*)

Como o próprio nome sugere, esse *building block* representa a etapa final da modelagem do gêmeo digital. Ele é quem recebe todos os insumos que conseguiram entrar no modelo e foram processados de maneira satisfatória. Aqui, serão considerados processados e, conseqüentemente, participantes do bloco de saída todos os carregamentos de madeira que passaram pelas atividades de extração e, caso necessário, pelas atividades de paradas mecânicas.

3.4. Teste e validação do modelo

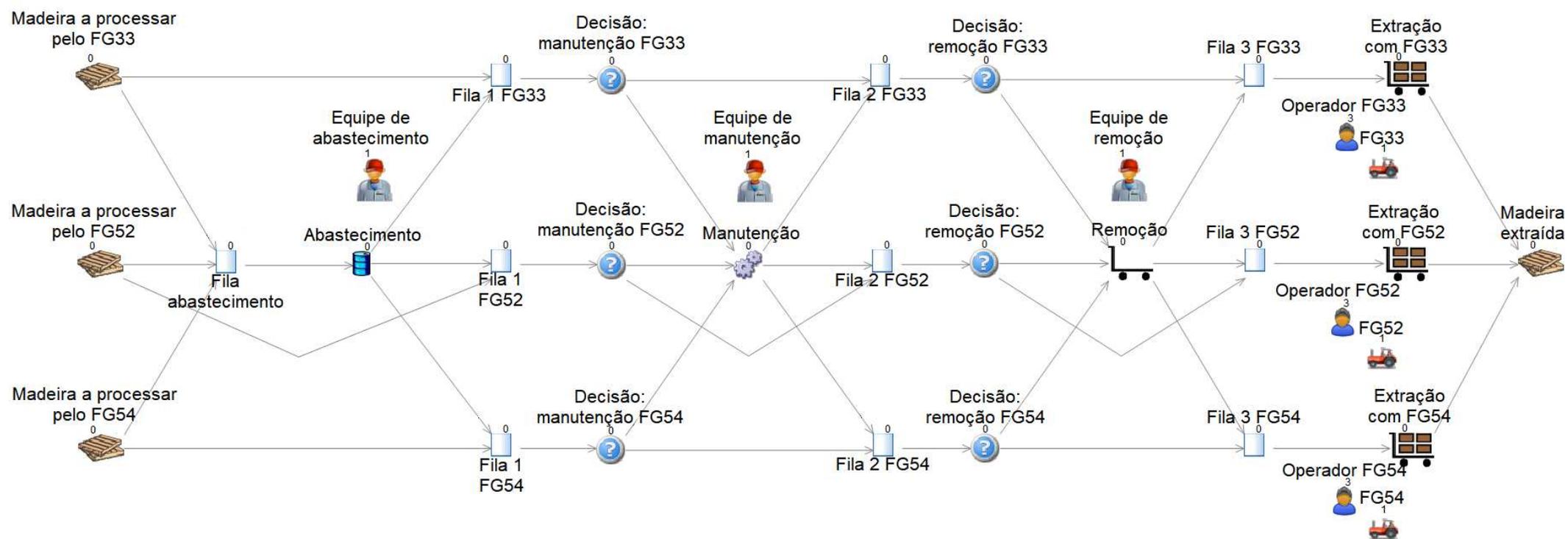
Após a definição de todos os parâmetros participantes do modelo, é necessário testá-lo no próprio software de simulação. É nesta etapa que os resultados numéricos das operações são obtidos, permitindo a análise e a validação do mesmo. Assim, após a estruturação de todos os blocos e do ajuste de todas as suas configurações, foi ajustado o tempo de simulação para 1 dia e acionado o botão *Run* do Simul8.

Finalizado o tempo de simulação, foram obtidos todos os dados relacionados tanto aos tempos de produção quanto às quantidades de itens processados em todos os *building blocks* do modelo. A validação do modelo de GD foi realizada de duas maneiras: através da análise visual de sua dinâmica e da comparação dos resultados obtidos no modelo com os dados originais da atividade de extração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse de todas as variáveis e parâmetros necessários e influentes na modelagem do gêmeo digital utilizando o Simul8, foi desenvolvido o modelo representando a operação de extração florestal com três *forwarders*. O modelo contendo os *building blocks* e sua dinâmica de distribuição está representado na Figura 11.

Figura 11 - Modelo do gêmeo digital da extração florestal com *forwarder* desenvolvido no Simul8



FONTE: A autora

4.1. Construção do modelo

A modelagem envolveu o estudo da dinâmica da atividade de extração no ambiente real e os conhecimentos das equipes de colheita florestal da empresa. O primeiro parâmetro alocado foi aquele relacionado ao início das atividades. Foi necessário calcular a produção média por boletim, a capacidade média das máquinas e o número de carregamentos por boletim para determinar o tempo entre chegadas dos inputs no modelo de simulação. É importante lembrar que foi considerado input um carregamento de madeira a ser extraído pelo *forwarder* na atividade de extração. Os resultados desses tempos estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Produção média por boletim, capacidade média das máquinas, número de carregamentos por boletim e tempo entre chegadas dos carregamentos

Máquina	Produção média por boletim (m ³)	Capacidade média das máquinas (m ³ /carregamento)	Número de carregamentos por boletim	Tempo entre chegadas dos carregamentos (min)
FG33	121,91		11,63	41,28
FG52	80,22	10,48	7,65	62,73
FG54	79,76		7,61	63,09

A estrutura do modelo de simulação é iniciada por três *start points*, cada um deles representando a madeira a ser extraída pelas máquinas estudadas. Foram configurados os tempos entre chegadas dos carregamentos em todos os blocos iniciais com os resultados descritos na Tabela 5, além da alocação da disponibilidade dos turnos de forma a garantir a semelhança do modelo com o ambiente real da extração.

Para a realização dos cálculos da produção média por boletim e dos demais parâmetros necessários à caracterização dos pontos iniciais somente foram utilizados os dados cuja produção apresentou produção maior que um metro cúbico.

Essa filtragem foi realizada de modo a garantir que possíveis erros na transmissão de dados pudessem ser transmitidos para o modelo de simulação. Além disso, a exclusão dos valores nulos de produção também garantiu que, durante a rotação do modelo, não houvessem interrupções causadas pela falta de madeira.

Malinovski *et al.* (2006), em seu trabalho, demonstram a forte correlação entre as atividades desenvolvidas pelo *harvester* e sua influência na atividade de extração com o *forwarder*. Assim, dada a influência que as atividades de corte e extração sofrem umas às outras, é recomendável associar a modelagem GD desenvolvida neste estudo à um GD da operação de corte utilizando o *harvester*. A associação dos gêmeos digitais dessas duas operações permite que o dado da quantidade de madeira, que é de fato o início da atividade de extração, possa ser fornecido de forma automática e como consequência da operação de corte.

O planejamento da colheita florestal tem como objetivo reunir pontos fundamentais dos aspectos socioeconômicos da atividade e garantir melhor aproveitamento dos recursos florestais (Augustynczyk, Arce e Silva, 2015). Segundo Fidelis & Reis (2019), o planejamento é também o grande responsável pela regulação dos fluxos de madeira.

Entretanto, ainda que o planejamento da colheita vise garantir o fluxo contínuo de matéria prima, situações adversas em campo podem ocorrer e afetar a disponibilidade de madeira para execução da atividade de extração. Por isso, escolheu-se inserir um *start point* para cada máquina disponível para estudo ao invés de um único início por onde entraria toda a informação sobre a madeira disponível. Essa escolha permite que, em caso de falta de madeira para extração com uma das máquinas pertencentes ao modelo de gêmeo digital, nem as demais máquinas nem o restante da cadeia de extração sejam prejudicadas e interrompam suas atividades.

As configurações finais dos *start points* envolveram suas rotas de saída. Essa etapa foi realizada calculando-se quais os percentuais, em cada um dos blocos, de passagens por paradas mecânicas de abastecimento. Os insumos que não foram encaminhados para essa parada seguiram para as filas das próximas atividades. Os resultados dessa etapa estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Configurações das rotas de saída dos *start points*

<i>Start point</i>	Saída para fila de abastecimento e lubrificação (%)	Saída para fila alternativa (%)	Fila alternativa
Madeira a processar pelo FG33	41,17	58,83	Fila 1 FG33
Madeira a processar pelo FG52	69,79	30,21	Fila 1 FG52
Madeira a processar pelo FG54	71,97	28,03	Fila 1 FG54

Para o ajuste das atividades de decisão, foi necessário determinar os valores percentuais dos dados que passaram por paradas mecânicas de manutenção e remoção. Esses resultados, para cada uma das três máquinas estudadas, estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Determinação da ocorrência de paradas mecânicas dos tipos manutenção e remoção

Máquina	Parada	Boletins que contém a parada (%)
FG33	Manutenção	52,75
	Remoção	6,08
FG52	Manutenção	26,65
	Remoção	3,57
FG54	Manutenção	25,39
	Remoção	2,65

Essas atividades foram inseridas para garantir que o comportamento dos dados quanto à ocorrência de manutenções e remoções fosse descrito de maneira fiel no modelo. Todas as configurações das atividades são encontradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Configurações das atividades de decisão inseridas no modelo de simulação

Nome da atividade	Tempo de duração (min)	Saída para parada (%)	Saída para fila (%)
Decisão: manutenção FG33	0,1	52,75	47,25
Decisão: manutenção FG52	0,1	26,65	73,35
Decisão: manutenção FG54	0,1	25,39	74,61
Decisão: remoção FG33	0,1	6,08	93,92
Decisão: remoção FG52	0,1	3,57	96,43
Decisão: remoção FG54	0,1	2,65	97,35

É importante mencionar que os tempos de duração das atividades decisórias foram muito baixos para que não afetassem toda a dinâmica das atividades. Não foram alocados recursos a essas atividades e a eficiência da mesma também não foi abordada. Isso porque o objetivo da inclusão dessas atividades no modelo é exclusivamente direcionar de maneira fiel as extrações para as atividades de manutenção e remoção, evitando a passagem das mesmas pelas paradas sem que essas de fato ocorram no ambiente real.

Após adicionados os três *building blocks* das paradas mecânicas, esses foram nomeados e configurados quanto ao tempo médio de duração de cada uma das paradas. Os recursos alocados para as atividades de extração foram as equipes responsáveis pela realização de todas as ações necessárias (Tabela 9).

Tabela 9 - Nomes dos blocos das atividades de paradas mecânicas, tempos médios de duração e recursos atribuídos a essas atividades

Nome da atividade	Tempo médio de duração da atividade (min)	Recursos atribuídos
Abastecimento	11,65	Equipe de abastecimento
Manutenção	68,83	Equipe de manutenção
Remoção	70,3	Equipe de remoção

A esses recursos também foi atribuída a configuração de disponibilidade, indicando que as equipes estão disponíveis de maneira contínua em todos os turnos de trabalho. Em relação à eficiência dos *building blocks* representantes das paradas mecânicas, assumiu-se que a mesma seria 100% tanto no abastecimento, quanto na manutenção e remoção. Essa configuração baseia-se no pressuposto que, ao iniciar uma atividade de abastecimento, manutenção ou remoção, a atividade irá ocorrer de forma fluida e efetiva.

Outro parâmetro foi a configuração das rotas de saída dessas atividades. O cálculo foi feito com base na quantidade de inputs obtido pelo ensaio do modelo de simulação, que determinou a capacidade diária de processamento das atividades de extração em termos de carregamentos a processar. Todos os parâmetros referentes às *routing out* das atividades de paradas mecânicas estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Rotas de saída e suas configurações das atividades de abastecimento, manutenção e remoção

Parada	Nome da <i>routing out</i>	Número de carregamentos que entraram no sistema	Quantidade a abastecer (%)	Número de carregamentos a abastecer	% em relação ao total de abastecimentos
Abastecimento	Fila 1 FG33	33	41,17	14	29,79
	Fila 1 FG52	24	69,79	17	36,17
	Fila 1 FG54	22	71,97	16	34,04
	Totais			47	100
Manutenção	Fila 2 FG33	33	52,57	17	56,67
	Fila 2 FG52	24	26,65	7	23,33
	Fila 2 FG54	22	25,39	6	20
	Totais			30	100
Remoção	Fila 3 FG33	33	6,08	2	50
	Fila 3 FG52	24	3,57	1	25
	Fila 3 FG54	22	2,65	1	25
	Totais			4	100

Também foram adicionados os três *Building blocks* representantes das atividades de extração florestal. Esses blocos foram nomeados e configurados quanto ao tempo médio de duração de cada uma das atividades de extração realizadas pelas três máquinas estudadas (Tabela 11).

Tabela 11 - Nomes atribuídos aos blocos das atividades de extração, e tempos médios de duração das atividades realizadas pelas máquinas FG33, FG52 e FG54

Nome da atividade	Tempo médio de duração da atividade de extração (min)
Extração com FG33	30,0
Extração com FG52	30,0
Extração com FG54	30,0

Os recursos alocados para as atividades de extração foram as máquinas e os operadores. Os nomes e quantidades de cada recurso estão descritos na Tabela 12. Para que o modelo de gêmeo digital represente a operação de maneira fiel, foi ajustada a configuração relacionada à alocação dos operadores de acordo com os turnos de trabalho.

Tabela 12 - Recursos alocados às atividades de extração

Atividade	Recursos de máquina		Recursos de operador	
	Nome	Quantidade	Nome	Quantidade
Extração com 9FG33	FG33	1	Operador FG33	3
Extração com 9FG52	FG52	1	Operador FG52	3
Extração com 9FG54	FG54	1	Operador FG54	3

Dos três operadores adicionados como recursos necessários às atividades de extração, cada um deles foi atribuído a um turno de trabalho. A extração florestal da empresa cujos dados foram coletados de fato acontece com a utilização de uma máquina sendo manuseada por um único operador durante um turno de 8 horas de duração. Assim, essa configuração de alocação de operadores aos turnos torna o modelo ainda mais compatível com a realidade da operação.

A atividade de extração florestal necessita de uma grande diversidade de recursos, que vão muito além de operadores e máquinas. Esses recursos envolvem desde água potável e alimentação adequada até alojamentos e equipamentos de proteção individual (Yamashita, 2002; Canto *et al.*, 2007). Entretanto, esses recursos são tratados no modelo de maneira indireta inseridos na eficiência das atividades, que é calculada com base nas atividades operacionais. Esses recursos também não são inseridos de forma individual no modelo pelo fato de que não há na base de dados informações sobre eles para que possam ser configurados *building blocks* específicos para os mesmos.

Ainda sobre as configurações das atividades de extração, foram calculados os tempos entre a ocorrência de todas as paradas realizadas pelas máquinas, com

exceção das paradas de abastecimento, manutenção e remoção, já que estas são tratadas em atividades específicas. Determinados esses tempos entre paradas, foram obtidos as distribuições e parâmetros estatísticos dos tempos entre as paradas (Tabela 13) e inseridos no parâmetro *Eficiency* das configurações das atividades de extração (Figura 12).

Tabela 13 - Distribuição e parâmetros estatísticos dos tempos entre ocorrências de paradas das máquinas

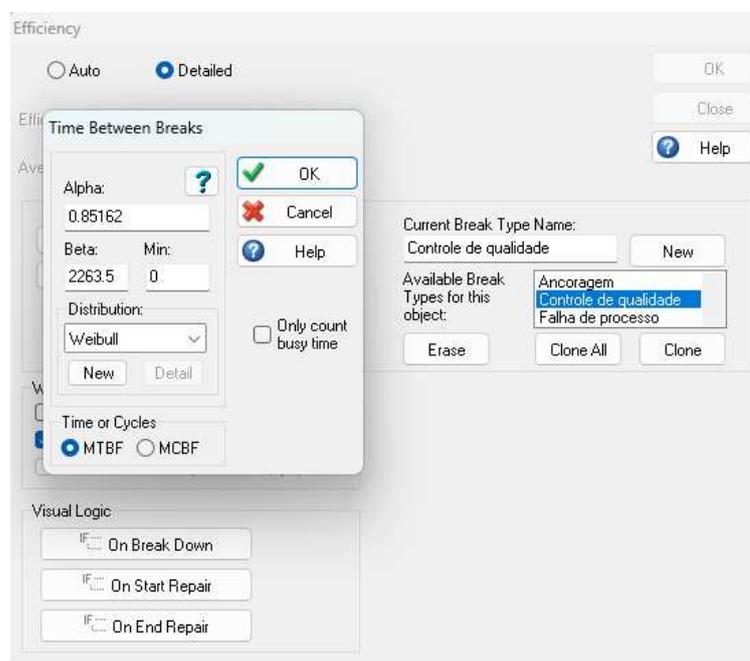
Código da parada	Distribuição	Parâmetros		
33P1	Weibull	$\alpha=0.60386$	$\beta=848.11$	min=0.04532
33P2	Weibull	$\alpha=0.659138$	$\beta=88091.0$	min=0
33P3	Weibull	$\alpha=0.5096$	$\beta=412.76$	min=0
33P4	Weibull	$\alpha=0.85162$	$\beta=2263.5$	min=0
33P5	Gamma	$\alpha=0.64794$	$\beta=22269.0$	
33P6	Uniform	$\alpha=123.67$	$\beta=123.67$	
33P7	Weibull	$\alpha=0.71686$	$\beta=6439.0$	min=0
33P8	Exponential	$\lambda=0.00264$		
33P9	Normal	$\mu=9369.8$	$\delta=6747.4$	
33P10	Weibull	$\alpha=1.6188$	$\beta=677.43$	min=0
33P11	Weibull	$\alpha=0.04772$	$\beta=3.332$	min=0
33P12	Weibull	$\alpha=0.15514$	$\beta=6.193$	min=0
33P13	Weibull	$\alpha=0.36033$	$\beta=3795.8$	min=0
33P14	Weibull	$\alpha=0.39765$	$\beta=1209.8$	min=0
33P15	Weibull	$\alpha=1.3063$	$\beta=548.0$	min=0
33P16	-	-		
33P27	Weibull	$\alpha=0.85185$	$\beta=856.52$	min=0
33P18	Uniform	$\alpha=483249.33$	$\beta=483249.33$	
33P19	Weibull	$\alpha=0.39959$	$\beta=21289.0$	min=0
33P20	Gamma	$\alpha=0.3631$	$\beta=42457.0$	
33P21	Weibull	$\alpha=0.3974$	$\beta=1817.9$	min=0
52P1	Gamma	$\alpha=0.35534$	$\beta=4030.1$	
52P2	Weibull	$\alpha=0.11806$	$\beta=5372.0$	min=0
52P3	Weibull	$\alpha=0.43412$	$\beta=168.71$	min=0

Código da parada	Distribuição	Parâmetros		
52P4	Weibull	$\alpha=1.3479$	$\beta=1056.9$	min=0
52P5	Gamma	$\alpha=0.36296$	$\beta=45752.0$	
52P6	Average	$\mu=46.94$		
52P7	Gamma	$\alpha=0.72705$	$\beta=6950.7$	
52P8	Weibull	$\alpha=0.05998$	$\beta=1.4305$	min=0
52P9	Normal	$\mu=9488.6$	$\delta=4505.4$	
52P10	Weibull	$\alpha=1.6188$	$\beta=677.43$	min=0
52P11	Weibull	$\alpha=0.31447$	$\beta=7614.5$	min=0
52P12	Gamma	$\alpha=0.33285$	$\beta=21865$	
52P13	Gamma	$\alpha=0.94187$	$\beta=2339.0$	
52P14	Weibull	$\alpha=0.4002$	$\beta=143.72$	min=0
52P15	Weibull	$\alpha=1.6817$	$\beta=509.39$	min=0
52P16	Uniform	$\alpha=260479.98$	$\beta=260479.98$	
52P17	Gamma	$\alpha=0.4681$	$\beta=1275.5$	
52P18	Weibull	$\alpha=0.68705$	$\beta=52414.0$	min=0
52P19	Weibull	$\alpha=0.62004$	$\beta=16696.0$	min=0
52P20	Weibull	$\alpha=0.14596$	$\beta=2130.8$	min=0
52P21	Weibull	$\alpha=1.6805$	$\beta=635.23$	min=0
54P1	Gamma	$\alpha=0.45229$	$\beta=3126.0$	
54P2	Weibull	$\alpha=0.23104$	$\beta=14995.0$	$\gamma=0$
54P3	Weibull	$\alpha=0.51542$	$\beta=219.89$	$\gamma=0$
54P4	Weibull	$\alpha=2.2344$	$\beta=4580.9$	$\gamma=0$
54P5	Weibull	$\alpha=0.53448$	$\beta=9492.0$	$\gamma=0$
54P6	Gamma	$\alpha=0.16536$	$\beta=187690.0$	
54P7	Gamma	$\alpha=0.39399$	$\beta=14689.0$	
54P8	Weibull	$\alpha=0.06076$	$\beta=1.4402$	$\gamma=0$
54P9	Normal	$\mu=4113.7$	$\delta=9604.4$	
54P10	Weibull	$\alpha=5.1119$	$\beta=1751.2$	$\gamma=0$
54P11	Weibull	$\alpha=0.31858$	$\beta=7507.1$	$\gamma=0$
54P12	Weibull	$\alpha=0.04784$	$\beta=502.76$	$\gamma=0$
54P13	Gamma	$\alpha=0.71398$	$\beta=4884.3$	
54P14	Weibull	$\alpha=0.32519$	$\beta=226.59$	$\gamma=0$
54P15	Gamma	$\alpha=50.756$	$\beta=33.55$	
54P16	-			

Código da parada	Distribuição	Parâmetros		
54P17	Gamma	$\alpha=0.54648$	$\beta=1189.5$	
54P18	-	-		
54P19	Weibull	$\alpha=0.58053$	$\beta=33704.0$	$\gamma=0$
54P20	Gamma	$\alpha=0.25018$	$\beta=31891.0$	
54P21	Weibull	$\alpha=0.1405$	$\beta=14195.0$	$\gamma=0$

Em que: os códigos iniciados em 33 correspondem às paradas da máquina FG33; os códigos iniciados em 52 correspondem às paradas da máquina FG52; os códigos iniciados em 54 correspondem às paradas da máquina FG54; P1: Aguardando manutenção; P2: Aguardando remoção; P3: Ancoragem; P4: Controle de qualidade; P5: Falha de processo; P6: Falha operacional; P7: Fim de turno em manutenção; P8: Inspeção visual; P9: Lavagem; P10: Limpeza; P11: Mau tempo; P12: Operador ausente; P13: Pausa pessoal; P14: Pré-ancoragem; P15: Refeição; P16: Reunião operacional/de segurança; P17: Trânsito; P18: Trânsito para manutenção; P19: Trânsito para abastecimento; P20: Treinamento; P21: Troca de turno.

Figura 12 - Exemplo de configuração dos parâmetros estatísticos de cada uma das paradas realizadas pelas máquinas na atividade de extração



FONTE: A autora.

Finalizando as configurações das atividades de extração, as rotas de saída conduziram a madeira do sistema para o ponto final da atividade. Quanto às *routing arrows*, estas foram inseridas e ajustadas conforme a realidade da operação e o

comportamento dos dados utilizados na modelagem do gêmeo digital. As primeiras setas adicionadas são aquelas entre os *start points* e as filas das atividades de paradas mecânicas. Estas indicam que a madeira disponível nos talhões começa a participar efetivamente da operação.

Em seguida, foram adicionadas as setas interligando as filas a suas respectivas atividades, sejam elas de paradas mecânicas propriamente ou de tomadas de decisão. Essa configuração reflete a realidade de que todo carregamento de madeira está sujeito à necessidade de abastecimento, manutenção e remoção. A maneira como os blocos e setas foram dispostos no modelo permite que diversas situações sejam retratadas, como as que não apresentem ocorrências de abastecimento, manutenção ou remoção, mas que a extração irá ocorrer ainda assim.

4.2. Validação e análise do modelo

De acordo com Chwif e Medina (2015), a validação de um modelo tem como objetivo avaliar se o mesmo foi desenvolvido corretamente, ou seja, se ele representa a realidade e o quão fiel ele é. Dada a escassez de trabalhos que envolvem modelos de simulação da atividade de extração e a subjetividade característica da operação, as técnicas de validação utilizadas nesse trabalho envolveram inicialmente a validação visual.

A análise visual é uma técnica de validação proposta por Sargent (2011) que implica em avaliar visualmente o comportamento das variáveis enquanto participantes de um modelo cujo funcionamento é interligado e dependente de diversas atividades. Esse tipo de validação conta com o conhecimento dos profissionais envolvidos na modelagem e é recomendada em qualquer tipo de simulação.

Um dos grandes desafios de se representar uma atividade complexa como a extração florestal em um modelo digital é conseguir correlacionar todas as

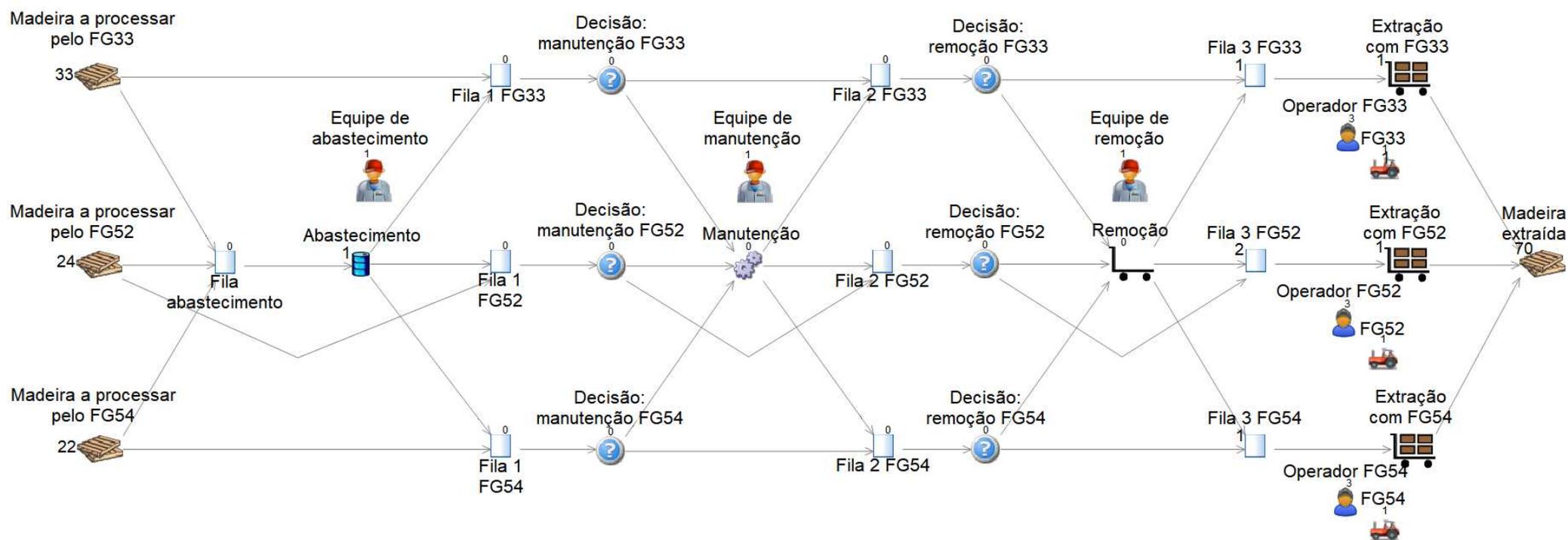
peculiaridades do campo com as ferramentas disponíveis nos softwares de simulação. Muitas vezes, a operação e a alocação dos recursos exigem configurações que limitam a representação extremamente fiel da realidade.

Entretanto, utilizando-se das combinações de recursos e ferramentas disponíveis no Simul8, foi possível desenvolver um modelo de gêmeo digital que, de maneira coerente, representa a extração de madeira com as principais características da operação disponíveis no banco de dados. Assim, do critério visual, entendeu-se que o modelo conseguiu representar de modo satisfatório a atividade de extração, associando as condições de campo às ferramentas disponíveis no software de simulação.

O modelo de GD desenvolvido neste trabalho também foi validado através da comparação entre os resultados obtidos pela simulação e os dados reais obtidos da operação de extração. Kleijnen (1995) aponta que esse tipo de validação ocorre, dentre diversas formas, através da obtenção de grandes volumes de dados para servirem de objeto de comparação. Segundo o autor, validar modelos de simulação por esse método implica que os pesquisadores envolvidos devem decidir de maneira subjetiva quais os limites aceitáveis de divergências entre os dados reais e os obtidos por meio da simulação.

O modelo de gêmeo digital após a simulação de um dia de trabalho está ilustrado na Figura 13. Quanto aos *start point* do modelo do GD, esses forneceram ao final da simulação os valores das quantidades de carregamentos que conseguiram chegar ao sistema para extração. Esses valores, bem como os valores reais e a diferença percentual entre eles, estão descritos na Tabela 14.

Figura 13 - Modelo de gêmeo digital após a simulação de um dia de extração



FONTE: A autora.

Tabela 14 - Carregamentos reais e resultantes do modelo de simulação e sua diferença percentual

Atividade	Carregamentos do modelo	Carregamentos reais	Diferença (%)
FG33	33	35	- 5,7
FG52	24	23	+ 4,3
FG52	22	23	- 4,5
TOTAIS	79	81	+ 2,4

As diferenças percentuais entre os cenários reais e o virtual, nessa situação, foram pequenos e satisfatórios. Esse fato corrobora com a ideia de que o modelo conseguiu representar de maneira fiel a entrada de madeira na extração florestal utilizando-se, para tal, das configurações inseridas nos *start points*. Esses resultados iniciais também informaram que todos os carregamentos de madeira que entraram no sistema permaneceram nele no início das operações, resultando em uma etapa sem perdas.

Como consequência de um início sem perdas, os resultados das filas de abastecimento apontaram que os 47 carregamentos que deveriam entrar nessa atividade de parada mecânica de fato aconteceram. Tratando-se de uma atividade de alta demanda, em que grande parte dos boletins continham registros de abastecimento, houveram filas em que as máquinas aguardaram para abastecer. Entretanto, considerando-se que a eficiência da atividade de abastecimento era máxima, as filas tiveram, em média, curto tempo de espera – 2 minutos.

Quanto às filas 1 das atividades com FG33, FG52 e FG54, estas receberam no total 78 carregamentos em 24 horas. Observa-se que o carregamento restante para completar o valor total recebido na simulação ficou preso na atividade de abastecimento. Assim como no ambiente real, uma atividade pode não ser encerrada ao fim de um turno de trabalho, fazendo com que sua conclusão seja registrada em dia posterior.

Já em relação às filas que antecedem as atividades relacionadas à tomada de decisão, foi possível observar através dos resultados fornecidos pelo software que

praticamente não houveram acúmulos de carregamentos (Tabela 15). Isso ocorre principalmente porque a estas atividades decisórias foi atribuído um tempo baixíssimo de duração, justamente para que não prejudicassem o andamento das demais ações do modelo.

Tabela 15 - Tempos mínimos, médios e máximos de duração da espera nas filas 1 e 2, que antecedem as atividades de tomada de decisão

Fila	Tempo mínimo de permanência na fila (min)	Tempo médio de permanência na fila (min)	Tempo máximo de permanência na fila (min)
Fila 1 FG33	0,00	0,00	0,09
Fila 1 FG52	0,00	0,00	0,00
Fila 1 FG54	0,00	0,00	0,00
Fila 2 FG33	0,00	0,00	0,00
Fila 2 FG52	0,00	0,00	0,00
Fila 2 FG54	0,00	0,00	0,07

Quanto às atividades de abastecimento, manutenção e remoção, o programa de simulação forneceu, dentro do período simulado, os percentuais de tempo em que a atividade estava ocorrendo ou em *standby*. Os gráficos contendo esses perfis de desempenho das atividades estão demonstrados na Figura 14.

Figura 14 - Gráficos de desempenho das atividades de abastecimento, manutenção e remoção



FONTE: A autora.

Observa-se que, para as três atividades representadas na Figura 14, a maior parte do tempo é constituída pela espera para realizar as atividades. Essa ociosidade relaciona-se com o fato de que, tratando-se de ações que ocorrem somente por demanda e não durante todo o boletim, é comum que as mesmas ocorram de maneira esporádica, e não contínua. Além disso, as equipes de abastecimento, manutenção e remoção podem atender, em campo, mais do que apenas três máquinas, justificando assim a ociosidade obtida pelos resultados do software de simulação.

Ainda com o objetivo de validar o modelo, foram compilados na Tabela 16 as porcentagens de tempo em que de fato ocorreram as atividades de abastecimento, manutenção e remoção na realidade da operação, e os resultados das atividades disponibilizados pelo modelo de simulação.

Tabela 16 - Tempos de ocorrência das atividades de abastecimento, manutenção e remoção nos ambientes real e simulado

Atividade	Atividade real (%)	Atividade simulada (%)	Diferença (%)
Abastecimento	31,25	38,44	23,01
Manutenção	45,63	44,97	-1,45
Remoção	28,13	18,13	-35,55

Pelas diferenças entre o real e o simulado dispostas na Tabela 16, observa-se que a atividade de manutenção no modelo representou a realidade com diferenças mínimas. Já as atividades de abastecimento e remoção apresentaram margens de diferença um pouco maiores. Essas discrepâncias se devem ao fato de que as flutuações dos dados sobre abastecimentos são grandes, havendo inclusive ocorrências de início de abastecimento em um turno, e finalização do mesmo somente em outro turno.

Também são grandes as flutuações quanto à duração das remoções no ambiente real. Uma vez que essa atividade contempla tanto a retirada da máquina para pátios de manutenção quanto para mudança de projetos, os tempos entre esses

deslocamentos, que fazem com que a máquina fique inoperante, também apresentam grandes variações.

Já as em relação às filas que antecedem as atividades de extração, também foram compilados os tempos mínimos, médios e máximos de permanência dos carregamentos enquanto aguardavam a extração (Tabela 17).

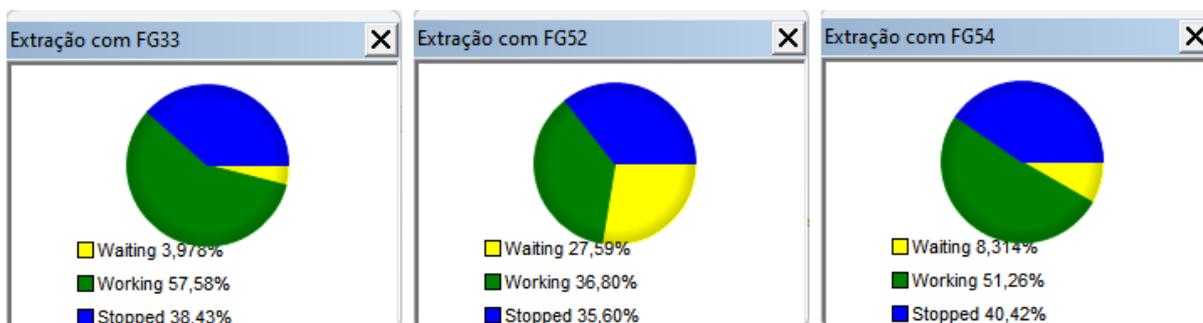
Tabela 17 - Tempos mínimos, médios e máximos de duração da espera nas filas que antecedem as atividades de extração

Fila	Tempo mínimo de permanência na fila (min)	Tempo médio de permanência na fila (min)	Tempo máximo de permanência na fila (min)
Fila 3 FG33	1,88	161,84	377,91
Fila 3 FG52	0,00	18,83	59,17
Fila 3 FG54	0,00	69,86	156,55

Após um ciclo de 24 horas de trabalho das máquinas, percebe-se que essas filas anteriores à atividade de extração representaram os maiores gargalos do sistema. Isso porque elas é quem comportam os inputs que irão passar pela única atividade obrigatória de qualquer carregamento de madeira: a extração. Essa atividade, que tem em média duração semelhante à manutenção e remoção e superior ao abastecimento, ainda conta com as limitações quanto à sua eficiência devido às paradas.

Em relação às atividades de extração, também foram compilados na Figura 15 os percentuais de tempo em que a atividade estava ocorrendo, aguardando e em pausa.

Figura 15 - Percentuais de tempos ativos (*working*), parados (*stopped*) e aguardando (*waiting*) do modelo de simulação



FONTE: A autora.

Considerando-se os tempos de duração dos turnos e das 21 paradas que não as de abastecimento, manutenção e remoção, a atividade de extração ocorre efetivamente em aproximadamente 60% do horizonte de tempo de um turno. Assim, somente a extração com a FG52 teve desempenho inferior ao tempo efetivo de extração do ambiente real.

Entretanto, ao se observar o tempo em que a extração da FG52 ficou parada, o valor é condizente com a média real em que aproximadamente 40% do tempo a máquina fica de fato sem operar devido a todas as paradas mencionadas na metodologia deste trabalho. Assim, o desempenho dessa máquina está associado ao alto tempo de espera, que reflete as altas demandas por abastecimento dessa máquina durante o horizonte de estudo, por exemplo.

Por fim, são analisados os dados de saída do modelo. Dos 79 carregamentos de madeira que entraram no modelo, 70 deles completaram todas as atividades pelas quais passaram. Os carregamentos remanescentes ficaram retidos no modelo, seja no abastecimento, nas filas ou nas atividades de extração. Assim, o sistema conseguiu processar de maneira eficiente e completa 88,61% dos carregamentos.

Se assumida a capacidade média das máquinas como 11m^3 , o volume de madeira processado nos ambientes real e virtual em um dia é, em média, 845m^3 e 770m^3 , respectivamente. Esses valores retomam entre esses dois ambientes a similaridade de 91,12%. Considerando-se que a maioria dos parâmetros foi

configurado com base em valores médios, esse valor de similaridade assegura que o ambiente real está representado de maneira eficiente no meio virtual.

É importante mencionar que todos os parâmetros calculados neste trabalho tiveram como base as características do banco de dados utilizados. Esses dados foram necessários para determinar os parâmetros configuráveis de todos os *building blocks*. Assim, o modelo aqui desenvolvido traz consigo as características desses dados e, conseqüentemente, da operação que eles ilustram. Por isso, ao ser aplicado de fato o modelo para a produção de um gêmeo digital, cujos dados são transmitidos via telemetria em tempo real, este será capaz de reproduzir as realidades trazidas com esses novos dados recebidos pela operação.

A partir da estruturação adequada de um modelo de gêmeo digital, é possível avaliar o comportamento da extração florestal por meio de diversos cenários. Como mencionado na metodologia deste trabalho, os dados utilizados como base carregam uma diversidade de características que englobam formas de extração, experiência dos operadores e regiões. Dessa forma, a combinação de cenários que envolvem essas características permite a verificação e o estudo de diversas possibilidades.

Essa combinação de cenários a partir de um cenário-base, utilizando modelos de gêmeos digitais, foi realizada por Rodrigues (2014) na avaliação do tráfego de passageiros de um aeroporto. Mendonça (2015) e Mambo (2017) também utilizaram essa dinâmica na indústria aeronáutica e em minas de carvão, respectivamente. Em todos esses trabalhos, os cenários permitiram a avaliação de diversas possibilidades das operações sem que houvesse a necessidade de coletar dados específicos de cada uma delas. Os autores também apontaram como benefício a identificação de gargalos nas operações devido a esse tipo de análise.

Ainda, um gêmeo digital pode servir como ferramenta de avaliação de características que ainda possuem grande potencial de exploração. Segundo Canto *et al.* (2011), a produtividade dos operadores é dependente de diversos fatores, mesmo quando submetidos a condições semelhantes de trabalho. Assim, o modelo de GD pode servir como ferramenta de testagem e avaliação da produção variando-se os inputs em função de variáveis referentes aos operadores, por exemplo.

Outro aspecto de grande importância na modelagem e aplicação de um gêmeo digital é a consistência dos dados utilizados. Para garantir que a operação seja bem

descrita e todos os parâmetros do modelo sejam calculados de maneira fiel à realidade, os dados precisam estar bem estruturados e sem erros ou *outliers* que comprometam as estatísticas e dimensionamentos.

Por fim, a aplicação desse modelo de gêmeo digital deve vir acompanhado da observação das características de cada operação. Uma vez que foram utilizados dados específicos de uma empresa específica, a operação aqui descrita segue as características desse local estudado. Ainda que tenha havido a busca por uma modelagem completa e bem estruturada, a utilização da mesma deve vir acompanhada de adaptações nos casos em que a dinâmica de extração florestal ocorra de maneira diferente da descrita neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Após a finalização da pesquisa, conclui-se que:

- A elaboração desse modelo envolveu a união ferramentas de simulação com o conhecimento da operação, representando o cenário real, com todas as suas interrelações e complexidade;
- As máquinas realizam diversas paradas ao longo de seu ciclo produtivo. As paradas de abastecimento, manutenção e remoção dependem de recursos comuns a diversas máquinas e, por isso, devem ser tratadas na modelagem de maneira diferenciada em relação às demais;
- Foi possível desenvolver um modelo completo que representa a realidade de modo eficiente;
- Dos critérios visual e comparativo, entendeu-se que o modelo representa a atividade de extração de maneira fiel e satisfatória, unindo as peculiaridades da operação com as ferramentas disponíveis no software de simulação;
- O modelo permite a testagem de diversos cenários encontrados na atividade;

- O modelo representa uma grande inovação quanto ao emprego das tecnologias 4.0 no setor florestal.

6. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos pelo modelo de simulação e pelos desafios enfrentados durante sua construção, recomenda-se que:

- Sejam simulados e validados cenários que envolvam combinações de tipos de manejo de extração, regiões e experiência dos operadores, como forma de avaliar a sensibilidade da simulação em diferentes realidades operacionais;
- Seja incluída a distância de extração nos parâmetros, para que esse fator de influência na produtividade do *forwarder* possa também ser avaliado no modelo de simulação;
- Sejam conduzidos casos de uso do GD em pesquisas que muitas vezes não são conduzidas pela dificuldade na obtenção de dados, seja por limitações de tempo ou de custos;
- Sejam conduzidos estudos de avaliação da produtividade da extração florestal com *forwarder* utilizando como base o modelo de GD desenvolvido neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. D. de; LANA, J. A. S. de; RIBEIRO, R. N. Aplicação dos conceitos de Floresta 4.0 com a utilização de projeto de telemetria nas atividades de colheita florestal da CENIBRA. **Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistemas e Automação**, 2019.

ADAMENKO, D.; KUNNEN, S.; NAGARAJAH, A. Comparative analysis of platforms for designing a digital twin. In: **Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange**. Springer, Cham, 2020. p. 3-12.

ALHAMED, F. *et al.* P4 Telemetry collector. **Computer Networks**, v. 227, p. 109727, 2023.

ALLEVATO, H. L. **Padrões espaciais e uso do habitat pelo quati *Nasua nasua* (Carnivora; Procyonidae), em um fragmento de floresta atlântica urbana sob influência de recursos antropogênicos**. Orientador: Fernando A. S. Fernandez. 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ecologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, G. M. **Códigos corretores de erros em hardware para sistemas de telecomando e telemetria em aplicações espaciais**. Orientador: Dr. Eduardo Augusto Bezerra. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciência da Computação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2007.

AMARANTE, J. B. G. *et al.* Dimensionamento da movimentação interna de uma fábrica de embalagens de papel por meio da simulação de eventos discretos. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 18, n. 50, p. 298-321, 2022.

ARAÚJO, L. C. **Modelagem da produtividade e da velocidade do *forwarder* em áreas inclinadas**. 2019. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

ARRIVABENI, B. S. **Análise técnica, econômica e socioambiental da manutenção de estradas não pavimentadas utilizando o Digital Twin**. Orientador: Carlos Cardoso Machado. 2021. 110 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2021.

ASHTON, K. J. The Internet of Things. 2009. Disponível em: <http://kevinjashton.com/2009/06/22/the-internet-of-things/>. Acesso em: 19 mai. 2023.

ATTARAN, M.; CELIK, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. **Decision Analytics Journal**, p. 100165, 2023.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, p. 649-656, 2015.

AZEVEDO, C. P. de *et al.* Simulação de estratégias de manejo florestal na Amazônia com o uso do modelo SYMFOR. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 51-70, 2008.

BAKKARI, M.; KHATORY, A. Industry 4.0: strategy for more sustainable industrial development in SMEs. In: **Proceedings of the IEOM 7th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Rabat, Morocco**. 2017. p. 11-13.

BARTH, L. *et al.* Systematization of digital twins: ontology and conceptual framework. In: **Proceedings of the 2020 The 3rd International Conference on Information Science and System**. 2020. p. 13-23.

BARTHELMEY, A. *et al.* Dynamic digital twin for predictive maintenance in flexible production systems. In: **IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2019. p. 4209-4214.

BASS, C M.; FRIDLEY, J.L.; LEE, F E Methods of interactive control and simulation of forest machinery. **Paper American Society of Agricultural – Engineers**, n. 91-7507, p. 1-8, 1991.

BASSOLI, H. M. *et al.* Custo anual uniforme equivalente de máquinas de colheita de madeira: uma abordagem estocástica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

BAYNE, K.; DAMESIN, S.; EVANS, M., The internet of things - wireless sensor networks and their application to forestry. **New Zealand J. Forest.**, v. 61, p. 37–41, 2017.

BONT, L. G. *et al.* Improving forest management by implementing best suitable timber harvesting methods. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 114099, 2022.

BORDELEAU, F.; MOSCONI, E.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Business intelligence and analytics value creation in Industry 4.0: a multiple case study in

manufacturing medium enterprises. **Production Planning & Control**, v. 31, n. 2-3, p. 173-185, 2020.

BUONOCORE, L.; YATES, J.; VALENTINI, R. A proposal for a forest digital twin framework and its perspectives. **Forests**, v. 13, n. 4, p. 498, 2022.

BURGER, D. **Análise de custos de máquinas com auxílio do computador**. II Curso de Atualização sobre Sistemas de Exploração e Transporte Florestal, Anais... Curitiba: FUPEF do Paraná, 1978. p. 15 - 29.

CANTO, J. L. do *et al.* Avaliação das condições de segurança do trabalho na colheita e transporte florestal em propriedades rurais fomentadas no Estado do Espírito Santo. **Revista Árvore**, v. 31, p. 513-520, 2007.

CANTO, J. L. do *et al.* Avaliação de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto para aproveitamento energético. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1327-1334, 2011.

CARMO, F. C. de A. do *et al.* OTIMIZAÇÃO DO USO DO TRATOR FLORESTAL *Forwarder* EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE, CUSTOS E CAPACIDADE DE CARGA. **Revista Árvore**, v. 39, n. 3, p. 561-566, 2015.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. 2022. **Mercado de Trabalho do Agronegócio**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/mercado-de-trabalho-do-agronegocio>. Acesso em 19 mai. 2023.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. Introdução ao software de simulação Simul8. **Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2006.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e Simulação a eventos Discretos: Teoria e Aplicações*. São Paulo: Elsevier, 2015.

CULOT, G. *et al.* Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, p. 107617, 2020.

DANTAS, M. B.; ANDREOLI, C. V. **Código Florestal Anotado: Observações de ordem técnica e judicial**. Editora Lumen Juris, 2017.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. **Ann. Forest Sci.**, v. 68, p. 959–974, 2011.

DE MATTOS, A. N. **Telemetria e conceitos relacionados**. Alessandro Nicoli de Mattos, 2004.

DIMOPOULOU, M.; GIANNIKOS, I. Towards an integrated framework for forest fire control. **European journal of operational research**, v. 152, n. 2, p. 476-486, 2004.

DRUMOND, M. A. A importância e contribuições do setor florestal para o desenvolvimento do semi-árido. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS NO SEMI-ÁRIDO MINEIRO, 1., 2007, Janaúba. Desenvolvimento sustentável regional: anais. Janaúba: UNIMONTES: UFMG: UFVJM, 2007., 2007.

DUMAN, M. C.; AKDEMIR, B. A study to determine the effects of industry 4.0 technology components on organizational performance. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 167, set. 2020/jan. 2021.

ERRANDONEA, I.; BELTRÁN, S.; ARRIZABALAGA, S. Digital Twin for maintenance: A literature review. **Computers in Industry**, v. 123, p. 103316, 2020.

FERREIRA, W. de P.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, p. 106868, 2020.

FIDELIS, A. C.; REIS, R. P. Decisão no planejamento bianual da colheita florestal: o uso da programação inteira mista. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 39, n. 2, p. 9-26, 2019.

FIGUEIREDO, E. O. *et al.* Manejo florestal 4.0: calendário preliminar de inventário florestal com aeronaves remotamente pilotadas. Embrapa Acre- Documentos (INFOTECA-E), 2018.

FRANSSON, P.; BRÄNNSTRÖM, Å.; FRANKLIN, O. A tree's quest for light—optimal height and diameter growth under a shading canopy. **Tree physiology**, v. 41, n. 1, p. 1-11, 2021.

FREITAS, L. C. de *et al.* Avaliação ambiental do processo de inovação tecnológica na colheita florestal. **Revista Árvore**, v. 35, p. 329-339, 2011.

GHOBAKHLOO, M. *et al.* Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. **Journal of Cleaner Production**, p. 127052, 2021.

GONÇALVES, J. C.; SCARPIN, C. T. Otimização do Planejamento da Colheita Florestal: comparações entre restrições ARM e URM. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 9, n. 1, 2022.

GOULART, R. S. **Proposta de um sistema de manutenção 4.0 para máquinas e equipamentos agroindustriais florestais**. Orientadora: Dra. Joseane Pontes. 2022. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2022.

GRIEPENTROG, H. W. Zukünftige Entwicklungen im Precision Farming. **TU München Agrarwissensch. Sympos. Hans Eisenmann-Zentrum**, v. 7, p. 33-36, 2016.

GRIEVES, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. **White paper**, v. 1, p. 1-7, 2014.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: **Transdisciplinary perspectives on complex systems**. Springer, Cham, 2017. p. 85-113.

GRIGOLATO, S.; PELLEGRINI, M.; CAVALLI, R. Evaluation of forest growing stock accessibility for harvesting systems using LiDAR data. In: Ackerman, P., Gleasure, E., Ham, H. (Eds.), **Proceedings of the 3rd Precision Forestry Symposium**. The anchor of your value chain, Stellenbosch, South Africa, p. 23–25, 2014.

GRUPO TIMBER. Elephant King – *Forwarder*. 2023. Disponível em: <https://www.grupotimber.com.br/produto/forwarder-elephant-king/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

HEINRICH, D. **Simulação da produção de madeira serrada**. Orientador: Dr. Antônio Carlos Gastaud Maçada. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HILDEBRAND, E. **Sistema de apropriação e análise de custos para a empresa florestal**. 1995. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 1995.

HOSOKAWA, R T. **Aplicação de computadores na estimativa dos custos de máquinas florestais**. Curso de Atualização sobre Sistemas de Exploração e Transporte Florestal, Anais... Curitiba: FUPEF do Paraná 1977. p. 14 – 20.

JIANG, Xuetao et al. Forestry digital twin with machine learning in Landsat 7 data. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 916900, 2022.

JOHN DEERE. 1910E *Forwarder*. 2023. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/forwarders/1910e/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

JUNIOR, S. C.; CARDOSO, L. E. Z.; VENDRAMETTO, L. L. ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO DE MADEIRAS COM AUXÍLIO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO. **Tekhne e Logos**, v. 7, n. 1, p. 47-56, 2016.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 408-425, 2018.

KEBANDE, V. R. Industrial internet of things (IIoT) forensics: The forgotten concept in the race towards industry 4.0. **Forensic Science International: Reports**, v. 5, p. 100257, 2022.

KHAJAVI, S. H. *et al.* Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. **IEEE access**, v. 7, p. 147406-147419, 2019.

KIM, K.; SHIN, B. Development of Easy-to-Use Crane-Tip Controller for Forestry Crane. **Journal of forest and environmental science**, v. 38, n. 4, p. 239-248, 2022.

KLEIJNEN, J. P. C. Verification and validation of simulation models. **European journal of operational research**, v. 82, n. 1, p. 145-162, 1995.

KNEBEL, F. P. *et al.* A study on cloud and edge computing for the implementation of digital twins in the oil & gas industries. **Computers & Industrial Engineering**, p. 109363, 2023.

KRITZINGER, W. *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018.

KWOK, P. K. *et al.* User acceptance of virtual reality technology for practicing digital twin-based crisis management. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 34, n. 7-8, p. 874-887, 2021.

LAREYRE, F. *et al.* Using digital twins for precision medicine in vascular surgery. **Annals of vascular surgery**, v. 67, p. e577-e578, 2020.

LEITE, E. da S. *et al.* Compactação do solo causada pelo *harvester* e intensidade de tráfego do *forwarder* na colheita florestal. **Scientia Florestalis**, v. 48, n. 126, e3075, 2020.

LEITE, E. da S. *et al.* Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo "forwarder". **Revista Árvore**, v. 38, p. 879-887, 2014.

LEITE, E. da S.; GUEDES, I. L.; DO AMARAL, E. J. Benefícios do desempenho da motopoda no desgalhamento da colheita florestal. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 1, p. 30-36, 2019.

LINHARES, M. *et al.* Eficiência e desempenho operacional de máquinas *harvester* e *forwarder* na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 212-219, 2012.

LIU, L. *et al.* The impact of the planting of forest biomass energy plants under the embedded Internet of Things technology on the biodiversity of the local environmental ecology. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 101894, 2021.

LIU, X. *et al.* A systematic review of digital twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications. **Advanced Engineering Informatics**, v. 55, p. 101876, 2023.

LONG, M.; JORDAAN, A.; CASTRO-SANTOS, T. Environmental factors influencing detection efficiency of an acoustic telemetry array and consequences for data interpretation. **Animal Biotelemetry**, v. 11, n. 1, p. 1-13, 2023.

LOPES, E. da S. *et al.* Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do *harvester* e do *forwarder* na Colheita de Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 223-230, 2015.

LOPES, P. F. **Autômato celular no planejamento da colheita florestal**. Orientador: Dr. Helio Garcia Leite. 2017. 83 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

MACHADO, C. C. Colheita Florestal. 3 ed. Viçosa - MG: UFV, 2014. 543 p.

MACHADO, C. C. O setor florestal brasileiro. In: MACHADO, C. C. (Ed.). *Colheita florestal*. Viçosa: UFV, 2008. p. 15-42.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. *Colheita florestal*. 3 ed. Viçosa: UFV, 2014.

MALINOVSKI, R. A. **Programa computacional de simulação para análise de sistemas de colheita de madeira**. Orientador: Dr. Jorge R. Malinovski. 1999. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade do Paraná, Curitiba, 1999.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 1-14, 2006.

MAMBO, I. F. **Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina a céu aberto de carvão**. Orientadores: Adilson Curi e Ivo Eyer Cabral. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Mineral, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2017.

MANTOVANI, J. E. **Telemetria convencional e via satélite na determinação da área de vida de três espécies de carnívoros da região nordeste do estado de São Paulo**. Orientador: Dr. José Eduardo dos Santos. 2001. 118 f. Tese (Doutorado)

– Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2001.

MARTINCOSKI, D. H. **Sistema de telemetria de eletrocardiograma utilizando tecnologia bluetooth**. Orientador: Dr. Raimes Moraes. 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2003.

MARUCCI, A. *et al.* Precision farming in hilly areas: The use of network RTK in GNSS technology. **Agriculture**, v. 7, n. 7, p. 60, 2017.

MCGREGOR, D. W.; CAIN, M. J. An introduction to SIMUL8. **School of Mathematics & Statistics, University of Plymouth**, 2004.

MCKINSEY Company. **Digital in industry: From buzzword to value creation**. Digital August 2016. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/businessfunctions/operations/our-insights/a-smarter-way-to-digitize-maintenance-andreliability/pt-BR>. Acesso em: 19 mai. 2023.

MENDONÇA, M. M. **Uso da Simulação Computacional e Delineamento de Experimentos no dimensionamento de um novo processo fabril e seu planejamento: Um caso prático na Indústria Aeronáutica**. Orientador: José Arnaldo Barra Montevechi. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2015.

MINETTE, L. J. *et al.* Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 28, p. 91-97, 2004.

MITTAL, H. 2020. DIGITAL TWIN: AN OVERVIEW. CSI Communications. 44.

MUCCELLINI, D. M. Desempenho de jovens no uso de simulador de realidade virtual de colheita florestal em cidades paranaenses. **Caminho Aberto: revista de extensão do IFSC**, p. 51-59, 2014.

MÜLLER, F.; JAEGER, D.; HANEWINKEL, M. Digitization in wood supply - A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 206-218, 2019.

NAKAGAWA, E. Y. *et al.* Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends. **Computers & Industrial Engineering**, p. 107241, 2021.

NAKAGAWA, E. Y. *et al.* Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends. **Computers & Industrial Engineering**, p. 107241, 2021.

NASCIMENTO, A. C. *et al.* Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com feller-buncher. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 9-15, 2011.

NAZARENKO, A. A. *et al.* Analysis of relevant standards for industrial systems to support zero defects manufacturing process. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 23, set. 2020/ mar. 2021.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 939-948, 2017.

NEMOTO, M. C. M. O.; SANTOS, G. Z. V.; PINOCHET, L. H. C. Adoção de inovação: Internet das Coisas para melhoria de desempenho de sustentabilidade na Klabin. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 18, n. 1, p. 197-224, 2018.

NIȚĂ, M. D. Testing forestry digital twinning workflow based on mobile lidar scanner and ai platform. **Forests**, v. 12, n. 11, p. 1576, 2021.

OLMOS, V. M. Forestry and the forest products sector: Production, income and employment, and international trade. **Forest Policy and Economics**, v. 135, p. 102648, 2022.

ONU, P.; MBOHWA, C. Reimagining the future: techno innovation advancement in manufacturing. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1953-1959, 2021.

ONU, P.; PRADHAN, A.; MBOHWA, C. Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. **Procedia Computer Science**, v. 217, p. 856-865, 2023.

PEREIRA, F. B. **Sensores IoT para pesquisa florestal**. Orientador: Dr. Rui Tadashi Yoshino. 2020. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Especialização em Indústria 4.0, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2020.

PEREIRA, R. **Conheça os principais sistemas e métodos de colheita florestal**. Aiko, 2022. Disponível em: <https://aiko.digital/sistemas-de-colheita-florestal/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PILATI, F. *et al.* Digital twin of COVID-19 mass vaccination centers. **Sustainability**, v. 13, n. 13, p. 7396, 2021.

PONTES, H. L. J.; DO AMARAL, B. H.; RODRIGUES, M. V. O ensino de Gestão da Produção utilizando a Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) e a Simulação de Eventos Discretos (SED). **Educitec-Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**, v. 6, p. e124420-e124420, 2020.

PURCELL, W.; NEUBAUER, T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. **Smart Agricultural Technology**, p. 100094, 2022.

RAMOS, W. F. *et al.* Geração de resíduos madeireiros do setor de base florestal na região metropolitana de Belém, Pará. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 1823-1830, 2018.

RANDHAWA, S. U.; SCOTT, T. M. Model generation for simulation analysis: an application to timber harvesting. **Computers & industrial engineering**, v. 30, n. 1, p. 51-60, 1996.

RANDHAWA, S.U.; OLSEN, E D. A tool for mechanized harvesting systems design and analysis. **Applied-Engineering-in-Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 231-237, 1990.

RAO, G. N. *et al.* Fire detection in Kambalakonda Reserved Forest, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India: An Internet of Things Approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 1162-1168, 2018.

RODRIGUES, C. K. *et al.* Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de *harvester* e *forwarder*. **Revista Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 387-394, 2015.

RODRIGUES, P. M. de S. **Análise de filas de espera através de simulação: caso de estudo pedagógico**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Gestão dos Serviços e da Tecnologia, Instituto Universitário de Lisboa, 2014.

RODRIGUES, P. M. de S. **Análise de filas de espera através de simulação: caso de estudo pedagógico**. Orientador: Abdul Suleman. 2014. 92 f. Dissertação

(Mestrado) – Mestrado em Gestão dos Serviços e da Tecnologia, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

ROSSIT, D. A. *et al.* A Big Data approach to forestry harvesting productivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 161, p. 29-52, 2019.

ROSSMANN, J.; SCHLUSE, M.; SCHLETTE, C. The virtual forest: robotics and simulation technology as the basis for new approaches to the biological and the technical production in the forest. **In: Proceedings of the 13th World Multi-Conference Conference on Systems, Cybernetics and Informatics**, WMSCI. 2009.

RÜßMANN, M. *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston Consulting Group**, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SACKS, R. *et al.* Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, v. 1, p. e14, 2020.

SALMIVAARA, A. *et al.* FOTETRAF Advanced computational methodologies on open big data for forest terrain trafficability monitoring and forecasting. 2016.

SANQUETTA, C. R. ARAUSIS: Sistema de simulação para manejo sustentável de florestas de Araucária. **Floresta**, v. 29, n. 1/2, 1999.

SANTOS, D. W. F. do N. Desempenho operacional de máquinas florestais em função do número de dias da escala de trabalho. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 64, 2021.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **In: Proceedings of the 2011 winter simulation conference**. IEEE, 2011, p. 166-183.

SCHETTINO, S. *et al.* Influência de fatores ergonômicos na produtividade do sistema homem-máquina na colheita florestal mecanizada. **Sci. For**, v. 50, p. e3779, 2022.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SOUZA A. P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.5, p.935-942, 2015.

SEMERARO, C. *et al.* Digital twin application in energy storage: Trends and challenges. **Journal of Energy Storage**, v. 58, p. 106347, 2023.

SHARMA, A. K. *et al.* A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

SILVA, A. A. **Tecnologias digitais aplicadas na gestão do corte florestal com harvester**. Orientador: Carlos Cardoso Machado. 2021. 80 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2021.

SILVA, F. Aplicação de redes neurais artificiais para estimar a produtividade do *Forwarder* na extração de madeira. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 63, 2015.

SILVA, N. R. G. da. **Análise e dimensionamento de frota de caminhões em circuito fechado para fornecimento de madeira**. Orientador: Dr. Rui Carlos Botter. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SINGH, S.; WEEBER, M.; BIRKE, K. Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation. **Procedia CIRP**, v. 99, p. 567-572, 2021.

STIAWAN, D. *et al.* Improvement of attack detection performance on the internet of things with PSO-search and random forest. **Journal of Computational Science**, v. 64, p. 101833, 2022.

TAO, F. *et al.* Digital twin in industry: State-of-the-art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405-2415, 2018.

TAO, F. *et al.* makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. **Chinese Journal of Aeronautics**, p. 1-17, 2023.

TIERNAN, D. *et al.* Effect of working conditions on forwarder productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest sites in Ireland. **Biosystems engineering**, v. 87, n. 2, p. 167-177, 2004.

TOP, G. Strategic Technology Trends for 2019. **David Cearley, Brian Burke**, 10.

TORABZADEH, H.; MORSDORF, F.; SCHAEPMAN, M. E. Fusion of imaging spectroscopy and airborne laser scanning data for characterization of forest

ecosystems – a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 97, p. 25-35, 2014.

TRIPATHY, P. K. *et al.* Policy conflict detection approach for decision-making in intelligent industrial Internet of Things. **Computers and Electrical Engineering**, v. 108, p. 108671, 2023.

UDALI, A. *et al.* Logging Residue Assessment in Salvage Logging Areas: a Case Study in the North-Eastern Italian Alps. **South-east European forestry**, v. 14, n. 1, p. 23-07, 2023.

VALBUENA, R. *et al.* Enhancing of accuracy assessment for forest above-ground biomass estimates obtained from remote sensing via hypothesis testing and overfitting evaluation. **Ecol. Model.**, v. 366, p. 15–26, 2017.

VANCLAY, J. K. Sustainable timber harvesting: Simulation studies in the tropical rainforests of north Queensland. **Forest ecology and management**, v. 69, n. 1-3, p. 299-320, 1994.

VOELL, C. *et al.* How digital twins enable the next level of PLM—A guide for the concept and the implementation in the Internet of Everything Era. In: **IFIP International Conference on Product Lifecycle Management**. Springer, Cham, 2018. p. 238-249.

VOGLIOTTI, A. **História natural de *Mazama bororo* (ARTIODACTYLA; CERVIDAE) através da etnozologia, monitoramento fotográfico e rádio-telemetria**. Orientador: Dr. José Maurício Barbanti Duarte. 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ecologia e Agrossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2013.

WACHELKE, J. *et al.* Caracterização e avaliação de um procedimento de coleta de dados online (CORP). **Avaliação Psicológica**, v. 13, n. 1, p. 143-146, 2014.

WEISS, G.; LUDVIG, A.; ŽIVOJINOVIĆ, I. Four decades of innovation research in forestry and the forest-based industries—A systematic literature review. **Forest Policy and Economics**, v. 120, p. 102288, 2020.

WHITE, J.C. *et al.* Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. **Canad. J. Remote Sens.** V. 42, p. 619–641, 2016.

YAKOVLEVA, E. A.; SUBHONBERDIEV, A. Sh. Implementation of “green” economy principles in the forest sector. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, 2019. p. 012016.

YAMASHITA, R. Y. **Avaliação das condições de trabalho e da exposição à vibração do operador de máquinas na colheita florestal**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, 2002.

YANG, Y. Business ecosystem model innovation based on Internet of Things big data. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 57, p. 103188, 2023.

YOON, S. Building digital twinning: Data, information, and models. **Journal of Building Engineering**, p. 107021, 2023.

ZAMBON, I. *et al.* Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. **Processes**, v. 7, n. 1, p. 36, 2019.

ZHANG, H. *et al.* An update method for digital twin multi-dimension models. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 80, p. 102481, 2023.