

Simulação Híbrida para análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção de uma empresa industrial

DIOGO ALEXANDRE RODRIGUES VELHO
julho de 2026

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Simulação Híbrida para análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção de uma empresa industrial

Diogo Velho

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Junho, 2026

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial.

Candidato: Diogo Velho, Nº 1201410, 1201410@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Professor Doutor Luis Pinto Ferreira,
lpf@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Professor Doutor Paulo Ávila, psa@isep.ipp.pt

Empresa: Sacoimagem

Orientador: Fernando Melo, contabilidade@sacoimagem.com

ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Junho, 2026

Agradecimentos

Não poderia deixar de expressar a minha gratidão a todos os que me apoiaram durante esta caminhada, que me levou até este momento. Primeiramente e acima de tudo, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela sua orientação, a sua paciência, mas principalmente pelo seu cuidado e apoio constante. Um obrigado também ao Professor Doutor Paulo Ávila por todo o apoio ao longo deste processo. Sem estes, a conclusão deste trabalho com sucesso não teria sido possível. Um grande agradecimento também para a minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda a jornada. Fica também um agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram o culminar deste projeto. Agradeço à Sacoimagem, particularmente ao Sr. Fernando Melo pela disponibilidade para abrirem as suas portas e me receberem.

Resumo

A crescente complexidade dos sistemas produtivos e a necessidade de maior eficiência operacional tornam fundamental a utilização de ferramentas de apoio à decisão capazes de analisar o comportamento dos sistemas industriais. Assim, a simulação surge como uma abordagem relevante, que permite estudar diferentes soluções e avaliar alterações ao sistema sem necessidade de intervenção direta no ambiente produtivo real. O presente trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão baseado em simulação híbrida para análise e melhoria de uma linha de produção industrial. Para tal, foi desenvolvido um modelo recorrendo ao *software Anylogic*, integrando tanto simulação de eventos discretos e simulação baseada em agentes. Primeiramente, foi realizada uma revisão da literatura sobre simulação industrial, paradigmas de simulação e simulação híbrida, incluindo uma análise bibliométrica da evolução da investigação nesta área. Posteriormente, foi desenvolvido o modelo de simulação da linha de produção em estudo, incluindo a representação dos postos de trabalho, recursos humanos e fluxo de materiais. De forma a validar o modelo desenvolvido, foram comparados os comportamentos e resultados observados na simulação com o funcionamento esperado da linha de produção, verificando-se a coerência do fluxo produtivo, da utilização de recursos e da dinâmica operacional implementada. Após a validação, foram realizados cenários experimentais de forma a avaliar o impacto de diferentes estratégias de melhoria no desempenho global do sistema. Os cenários analisados incluíram alterações relacionadas com a experiência e motivação das operadoras, políticas de pausas, reorganização de recursos humanos, cobertura de pausas no gargalo e aumento de capacidade através da duplicação de postos críticos. Os resultados obtidos demonstraram que fatores associados à organização do fluxo produtivo e à gestão de recursos humanos possuem um impacto significativo na produtividade da linha. Conclui-se que a utilização de simulação híbrida constitui uma ferramenta eficaz para análise e melhoria de sistemas produtivos, permitindo identificar oportunidades de melhoria, apoiar decisões de forma fundamentada e reduzir riscos associados à implementação de alterações em ambiente industrial real.

Palavras-Chave: Simulação híbrida, simulação discreta, simulação baseada em agentes, apoio à decisão, linha de produção, Indústria 4.0.

Abstract

The increasing complexity of production systems and the need for greater operational efficiency make the use of decision support tools capable of analyzing industrial system behavior increasingly important. In this context, simulation emerges as a relevant approach, allowing the study of different solutions and the evaluation of system modifications without the need for direct intervention in the real production environment. The main objective of this work was the development of a decision support system based on hybrid simulation for the analysis and optimization of an industrial production line. For this purpose, a model was developed using the AnyLogic software, integrating both discrete-event simulation and agent-based simulation. In an initial phase, a literature review was carried out on industrial simulation, simulation paradigms and hybrid simulation, including a bibliometric analysis of the evolution of research in this area. Subsequently, the simulation model of the production line under study was developed, including the representation of workstations, human resources and material flow. In order to validate the developed model, the behaviors and results observed in the simulation were compared with the expected operation of the production line, confirming the coherence of the production flow, resource utilization and implemented operational dynamics. After validation, several experimental scenarios were carried out with the objective of evaluating the impact of different improvement strategies on the overall system performance. The analyzed scenarios included changes related to operator experience and motivation, break policies, human resource reorganization, bottleneck break coverage and capacity increase through the duplication of critical workstations. The obtained results demonstrated that factors associated with production flow organization and human resource management have a significant impact on production line productivity. It was concluded that the use of hybrid simulation constitutes an effective tool for the analysis and optimization of production systems, allowing the identification of improvement opportunities, supporting informed decision-making and reducing risks associated with the implementation of changes in real industrial environments.

Keywords: Hybrid simulation, discrete simulation, agent-based simulation, decision support, production line, Industry 4.0.

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Apresentação da Empresa	3
1.4 Conteúdo e Organização da Dissertação	3
2 Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica	5
2.1 A Simulação Como Ferramenta de Apoio à Decisão	5
2.2 Simulação no Contexto Indústria 4.0	7
2.3 Paradigmas de Simulação	7
2.3.1 Simulação Discreta	7
2.3.2 Simulação Baseada em Agentes	8
2.3.3 Dinâmica de Sistemas	8
2.4 Simulação Híbrida	9
2.5 Casos de Estudo	11
2.6 O Futuro da Simulação	14
2.7 Revisão Bibliométrica	16
2.7.1 Metodologia de Investigação	16
2.7.2 Discussão	17
3 Sistema de Apoio à Decisão Desenvolvido	21
3.1 Descrição da Linha de Produção	21
3.2 Modelo de Simulação Híbrido Desenvolvido	23
3.3 Validação do Modelo de Simulação	35
3.4 Análise de Cenários	36
3.4.1 Cenário 1 - Influência da Experiência das Operadoras	36
3.4.2 Cenário 2 - Operadora Dedicada ao Posto 7	37
3.4.3 Cenário 3 - Operadora Vem Cobrir as Pausas do Gargalo	39
3.4.4 Cenário 4 - Duplicar Posto 5	40
3.4.5 Cenário 5 - Variação na Frequência de Pausas	40

3.4.6	Cenário 6 - Influência da Motivação	41
3.5	Análise de Resultados	43
4	Conclusões	45
4.1	Conclusões Finais	45
4.2	Principais Dificuldades	46
4.3	Trabalho Futuro	47
	Referências	48

Lista de Figuras

2.1	Documentos por ano [50].	17
2.2	Documentos por país [50].	18
2.3	Documentos por instituição [50].	18
2.4	Documentos por autor [50].	19
2.5	Documentos por área [50].	19
2.6	Documentos por tipo [50].	20
3.1	Layout da Linha Analisada.	22
3.2	Representação do modelo desenvolvido	23
3.3	Gráfico da evolução da fadiga (<i>index</i> da fadiga em função do tempo).	25
3.4	Gráfico da evolução da motivação (<i>index</i> da motivação em função do tempo).	26
3.5	Gráfico do <i>buffer</i> de cada posto (unidades em espera em função do tempo).	27
3.6	Gráfico da utilização das operadoras (<i>index</i> da utilização em função do tempo).	28
3.7	Gráfico da comparação entre simulações (produção em função do tempo).	29
3.8	Representação tridimensional da linha de produção (ângulo 1). . . .	30
3.9	Representação tridimensional da linha de produção (ângulo 2). . . .	30
3.10	Diagrama de estados da população de operadoras	33

Lista de Tabelas

2.1	Casos de estudo sobre a utilização de simulação híbrida em linhas de produção.	11
3.1	Registos das simulações	36
3.2	Registos das simulações - Influência da Experiência	37
3.3	Registos das simulações - Operadora Dedicada ao Posto 7	38
3.4	Registos das simulações - Operadora Cobre Pausas no Gargalo	39
3.5	Registos das simulações - Posto do Gargalo Duplicado	40
3.6	Registos das simulações - Influência da Política de Pausas	41
3.7	Registos das simulações - Influência da Motivação	42
3.8	Produção média diária de cada cenário	43

Capítulo 1

Introdução

No presente capítulo é feita a introdução da dissertação, analisando a problemática e tendo presente a contextualização do tema. São ainda abordados os objetivos e as metodologias usadas.

1.1 Contextualização

O ambiente industrial tem vindo a passar por várias evoluções e mudanças ao longo das últimas décadas, com influência do avanço tecnológico e pelo aumento da complexidade dos sistemas empresariais. Atualmente, as empresas enfrentam um cenário cada vez mais dinâmico e precisam de soluções para garantir uma resposta eficiente [1].

Assim, tem-se vindo a fazer uma procura por novas metodologias e ferramentas capazes de apoiar os gestores, por exemplo, na tomada de decisão. As empresas industriais precisam de soluções para reduzir custos e tempos de produção, mas que também assegurem a qualidade e capacidade de resposta esperadas mediante a procura[1].

Entre essas soluções, a simulação tem assumido um papel de destaque. Esta solução permite recriar digitalmente sistemas complexos, analisar cenários alternativos e antecipar resultados. A simulação representa uma ferramenta poderosa para compreender e melhorar processos produtivos[2]. Entretanto, os métodos tradicionais de simulação apresentam algumas limitações quando aplicados a realidades dinâmicas, onde existem fluxos físicos e digitais, exigindo uma abordagem mais integrada[3].

É com base nesta problemática que aparece a simulação híbrida, que é uma combinação de diferentes técnicas de simulação (como simulação de eventos discretos, baseada em agentes ou dinâmica de sistemas), que oferece uma visão mais completa do funcionamento de uma linha de produção. Esta abordagem permite representar com maior realismo as interações entre máquinas, pessoas, fluxos de materiais e informação e que ajuda assim a resolver melhor os desafios do dia a dia nas empresas industriais[4].

Desta forma, esta dissertação está enquadrada na necessidade de explorar e aplicar a simulação híbrida para analisar e propor melhorias ao funcionamento de uma linha de produção de uma empresa industrial. O objetivo passa não apenas por identificar gargalos e ineficiências, mas também por avaliar cenários alternativos e propor soluções que contribuam para o aumento da produtividade, redução de desperdícios e maior flexibilidade operacional[4].

Para além disto, é pretendido evidenciar o valor da simulação híbrida como ferramenta de apoio à decisão estratégica e operacional e mostrar que o seu uso pode constituir uma vantagem competitiva num setor cada vez mais exigente e orientado para a excelência[5].

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é analisar e propor melhorias no funcionamento de uma linha de produção de uma empresa industrial, através da aplicação de simulação híbrida como ferramenta de apoio à decisão. O pretendido é, então, conseguir identificar se é possível aumentar a eficiência, identificar gargalos e desperdícios presentes no processo produtivo, melhorar a utilização dos recursos e melhorar a capacidade de resposta da empresa face às exigências atuais e futuras do mercado.

Para alcançar este objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a linha de produção que se está a estudar, através da identificação dos fluxos de materiais, recursos utilizados e quais são os principais constrangimentos do processo;
- Desenvolver um modelo de simulação híbrida que seja capaz de representar de forma realista o funcionamento da linha, combinando diferentes abordagens de modelação;
- Testar alguns cenários diferentes de possível melhoria, a título de exemplo, alterações no layout, redistribuição de recursos, ajustes de capacidade ou aplicação de princípios Lean;
- Propor soluções reais que possam ser implementadas pela empresa, sustentadas, naturalmente, pelos resultados da simulação.

Com este conjunto de etapas, entre outras, pretende-se demonstrar o potencial da simulação híbrida como sendo uma abordagem eficaz para apoiar a tomada de decisão em ambientes industriais, que possa contribuir para uma gestão mais eficiente, flexível e sustentável das operações.

1.3 Apresentação da Empresa

A organização na qual foi aplicada a metodologia descrita nesta dissertação é uma empresa industrial dedicada à produção e opera num setor caracterizado por elevados níveis de competitividade, exigência e pressão constante para melhoria dos processos produtivos. A empresa possui uma estrutura fabril que integra diferentes áreas, desde a receção de matérias-primas até à saída do produto final, passando por processos intermédios de transformação, montagem e controlo de qualidade.

Fundada com o objetivo de responder às necessidades de um mercado em crescimento, a empresa consolidou ao longo dos anos uma posição relevante no setor industrial, sustentada por uma estratégia orientada para a eficiência operacional, inovação e cumprimento rigoroso dos padrões de qualidade. Embora opere num ambiente dinâmico e sujeito a procura variável, têm procurado adaptar-se através de novas tecnologias e metodologias de apoio à gestão.

Apesar dos esforços contínuos, a variabilidade dos sistemas produtivos e a complexidade das operações tornam difícil antecipar os impactos de mudanças no processo apenas através de métodos tradicionais de planeamento.

Neste contexto, a simulação surge como uma ferramenta essencial para apoiar a tomada de decisão, permitindo avaliar, testar e comparar cenários alternativos sem interferir diretamente na operação real. A aplicação da simulação híbrida nesta empresa tem como objetivo compreender de forma mais profunda o comportamento da sua linha de produção, identificar eventuais gargalos, avaliar oportunidades de melhoria e propor soluções que aumentem a eficiência global do sistema.

A escolha desta empresa para o presente estudo justifica-se pela sua representatividade no setor industrial, pela relevância da sua linha de produção e pela necessidade crescente de ferramentas que possibilitem uma análise integrada dos seus processos. Assim, a empresa constitui um caso de estudo adequado para demonstrar o potencial da simulação híbrida como instrumento de suporte estratégico e operacional.

1.4 Conteúdo e Organização da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em quatro capítulos principais.

O primeiro capítulo corresponde à introdução. Aqui é feito o enquadramento do tema abordado, a motivação, ou a razão, que justifica a realização do estudo,

bem como os objetivos a atingir. Este capítulo inclui ainda uma breve descrição da empresa onde o caso de estudo foi conduzido e uma explicação sobre os métodos usados para chegar aos resultados pretendidos.

O segundo capítulo dedica-se à revisão da literatura e fundamentação teórica, onde são abordados conceitos importantes da simulação enquanto ferramenta de apoio à decisão. Neste capítulo procura-se abordar os diferentes paradigmas de simulação, bem como analisar o estado da arte da simulação híbrida. São também analisados alguns casos de estudo e faz-se uma análise sobre o futuro da simulação.

No terceiro capítulo é apresentado o caso prático em estudo. São descritos em detalhe os processos que compõem a linha de produção, os recursos envolvidos e os principais problemas identificados. Neste ponto é ainda desenvolvido o modelo de simulação híbrida, explica-se os métodos utilizados e a forma como o sistema produtivo foi representado. É também dada uma explicação sobre como o modelo foi validado. Neste capítulo são explicados os cenários sugeridos e desenvolvidos e faz-se uma análise dos resultados dos vários cenários. É feita uma discussão tanto sobre os indicadores quantitativos como as implicações qualitativas das propostas de melhoria. Esta discussão procura evidenciar as melhorias no desempenho, mas também as limitações encontradas no processo.

Por fim, o quarto capítulo reúne as conclusões mais relevantes do trabalho. Aqui faz-se uma reflexão sobre o contributo da simulação híbrida para a melhoria da linha de produção estudada. São ainda apresentadas as principais dificuldades enfrentadas durante a investigação e sugeridas possíveis linhas de investigação futura que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica

2.1 A Simulação Como Ferramenta de Apoio à Decisão

A competitividade industrial cada vez maior tem feito com que as empresas procurem ferramentas que permitam ajudar a tomar decisões de forma mais ágil, segura e fundamentada. Assim, a simulação tem ganho relevância como um dos instrumentos mais usados na Indústria 4.0. Funciona como uma ponte entre a análise de sistemas complexos e a definição de estratégias de melhoria.

A simulação apresenta-se como uma metodologia flexível e eficaz para o planejamento e controle das operações internas de uma organização, sobretudo no que respeita às atividades logísticas e de produção. A título de exemplo, é muitas vezes destacado que falhas no fluxo de materiais podem originar paragens e perdas financeiras significativas, pelo que se torna muito importante ter ferramentas que permitam aos gestores analisar cenários alternativos antes de tomar decisões críticas. Neste sentido, a simulação funciona como parte de um sistema de suporte à decisão, permitindo, por um lado, representar o sistema real, mas por outro projetar cenários futuros de forma segura[6].

O uso destes métodos é uma abordagem que reduz significativamente os riscos e custos associados a decisões precipitadas, uma vez que erros ou falhas podem ser identificados e algumas decisões complexas podem ser simuladas, antes da implementação real [7].

A simulação tem, então, vindo a reforçar-se como capaz de transformar o processo de tomada de decisão, ao substituir abordagens intuitivas por processos baseados em evidências quantitativas. Num estudo aplicado a um ambiente *Engineer-to-Order*, que é um tipo de sistema produtivo em que os produtos não são fabricados antes de receber uma encomenda, sendo que cada encomenda normalmente envolve projeto e engenharia personalizados para o cliente e é caracterizado por elevada variabilidade e ausência de dados normalizados, os autores verificaram que a simulação não só revelou lacunas de informação, como também permitiu identificar gargalos produtivos e avaliar estratégias alternativas de melhoria. Desta forma, os resultados da simulação tornam-se numa fonte de conhecimento que possibilita um planeamento mais rigoroso e um controlo mais eficiente dos processos industriais[8].

Outro aspeto a ter em conta quando se fala em simulação como ferramenta de apoio à decisão é a integração entre simulação e métodos matemáticos para melhoria, em que se cria uma abordagem híbrida para suporte ao planeamento da produção. Enquanto a matemática gera soluções ideais em termos teóricos, a simulação permite verificar a sua viabilidade prática, ao ter em conta a variabilidade e complexidade dos sistemas reais. Como se pode verificar numa cadeia de abastecimento híbrida (com processos discretos e contínuos), em que a simulação acrescenta robustez ao processo de decisão, uma vez que permite validar e ajustar as soluções propostas em contextos industriais complexos. Ou seja, esta integração melhora a visualização e facilita a compreensão de sistemas complexos, difíceis de analisar apenas por métodos matemáticos[9].

Outro fator importante desta ferramenta é a sua versatilidade, que tem levado a que seja aplicada em diversos setores. Para além do setor industrial, a simulação também tem sido explorada em áreas como a saúde (gestão hospitalar), a logística, os transportes, a defesa e até mesmo na investigação militar. Nestes diferentes contextos, a simulação desempenha um papel essencial no desenvolvimento de soluções mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis[2].

É importante, contudo, referir que a eficácia da simulação depende diretamente da qualidade e da fidelidade do modelo desenvolvido. Se o modelo não for corretamente construído e não representar de forma adequada o sistema estudado, os resultados podem não ser confiáveis ou fidedignos. Neste caso, as conclusões tiradas da simulação podem levar a más decisões, ou levar a interpretações equivocadas dos sistemas analisados [10]. Além disso, é importante considerar que, apesar do seu potencial, os projetos de simulação ocorrem num contexto de crescente complexidade tecnológica, pelo que, para uma implementação eficaz a empresa já deve ter uma boa maturidade digital e disponibilidade de recursos [11].

2.2 Simulação no Contexto Indústria 4.0

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração entre sistemas ciberfísicos (sistema composto por elementos computacionais colaborativos), *Industrial Internet of Things*, análise de dados em tempo real e capacidade de reconfiguração automática das linhas de produção. Neste contexto, a simulação torna-se uma ferramenta estratégica importante para validar opções, melhorar as operações, testar as suas políticas de controlo e manutenção e apoiar cada decisão[12]. A simulação sempre esteve "próxima" da indústria desde a 3ª revolução industrial e com a indústria 4.0 surgiu uma nova fase onde a simulação se tornou uma estratégia para permitir a digitalização completa da manufatura e dos negócios. Por outras palavras, a simulação fornece as bases para que conceitos como fábricas inteligentes, integração de sistemas, melhoria e flexibilidade dinâmica se materializem[13]. A indústria 4.0 tem influenciado o desenvolvimento de técnicas que não sejam apenas um artefacto de planeamento ou estudo e que passem a ser parte de sistemas industriais com modelos que representam a realidade física de forma dinâmica e integrada. Atualmente, a falta de ferramentas úteis neste campo já não constitui um problema, uma vez que a geração atual de ferramentas de simulação de uso geral oferece opções de integração adequadas[14]. Em todo o mundo, diversos ambientes de produção estão a transformar-se para tirar o melhor proveito das diretrizes da Indústria 4.0. Neste sentido, ganham força metodologias que combinem este modelo de maturidade da indústria 4.0 com paradigmas de simulação, por exemplo, para ajudar a considerar forças e fraquezas de possíveis alterações nos processos. [15].

2.3 Paradigmas de Simulação

Existem vários paradigmas de simulação que se distinguem pelo modo como representam a evolução no tempo e os estados do sistema. Podemos considerar, neste âmbito, a simulação discreta, simulação baseada em agentes, e dinâmica de sistemas.

2.3.1 Simulação Discreta

Num sistema discreto, as variáveis mudam apenas num conjunto discreto de pontos no tempo. Exemplificando, uma analogia seria comparar com um banco, em que o número de clientes representa a variável de estado, que muda quando um cliente chega ou quando o atendimento a um cliente é concluído[16]. Este tipo de simulação avança em incrementos discretos, ou seja, numa sequência de eventos que ocorrem em pontos específicos no tempo. Cada evento assinala uma mudança de estado do sistema[17]. Algumas limitações do paradigma passam por situações em que se pretende modelar sistemas com dinâmica contínua, fenómenos físicos contínuos, variabilidade entre entidades, detalhe individual ou comportamentos adaptativos

de agentes. Nessas situações, a agregação de eventos discretos pode não refletir adequadamente o detalhe do sistema, o que explica a importância de abordagens híbridas[18]. Este é um método amplamente utilizado em diversas áreas de atuação. Entre elas, pode-se dar o exemplo de gestão de filas no setor de serviços, gestão de inventário, prospecção de terminais de carga, gestão operacional de comércios, entre muitos outros variados[19].

2.3.2 Simulação Baseada em Agentes

Um modelo baseado em agentes, de forma mais geral, é um modelo no qual os agentes interagem repetidamente. Exemplificando, quando os agentes melhoram o seu comportamento coletivo através de trocas de informação, como é feito em colônias de formigas ou enxames de partículas, o objetivo é atingir um estado final desejado, ou seja, um sistema melhorado[20]. Um agente é uma entidade computacional autônoma, reativa e pró-ativa, capaz de perceber o ambiente, tomar decisões locais e interagir com outros agentes para atingir os seus objetivos. Esta definição confere ao paradigma uma capacidade de representar heterogeneidade individual, autonomia, tomada de decisão descentralizada e interações sociais ou estruturadas, características cada vez mais comuns em sistemas industriais modernos e ciber-físicos [21]. O Comportamento humano pode ser replicado recorrendo à utilização de agentes e sistemas multi-agentes. Desta forma, e considerando os comportamentos individuais de cada elemento humano, a simulação baseada em agentes é uma excelente ferramenta de modelação de sistemas do mundo real, aos quais se aplicam, os sistemas de produtivos[22]. Por outro lado, estes modelos baseados em agentes permitem a identificação de particularidades de um ambiente e possibilitam interações entre agentes, bem como a escolha de um caminho para uma determinada ação. Devido ao facto de permitir uma grande individualização, autonomia e interatividade aos agentes observados no sistema modelado, este paradigma de modelação é muito usado em projetos de sistemas de manufatura[20]. Para desenvolver este tipo de modelos de forma útil, é necessário Identificar os agentes, especificar com precisão quais os seus comportamentos e representar adequadamente as interações entre agentes[20].

2.3.3 Dinâmica de Sistemas

A dinâmica de sistema é uma técnica cujo objetivo é analisar, modelar e identificar comportamentos implícitos em sistemas dinâmicos complexos ao longo do tempo. Serve para criar modelos que representam sistemas ou estruturas existentes. Com esta técnica é possível compreender a natureza dinâmica de um sistema, entender e aperfeiçoar seu desempenho. Trata-se de uma modelação matemática capaz de obter a resposta de um sistema dinâmico[23]. Olhando de forma isolada para as palavras sistema e dinâmica, de forma a ficar mais claro o conceito de dinâmica de sistemas,

um sistema é um conjunto de componentes interdependentes, inter-relacionados e organizados, as relações entre os componentes são sempre iguais, podendo gerar outros sistemas. Estes sistemas não possuem limitação de tamanho e não existe limite no número de componentes[24]. É muito importante definir de forma clara as fronteiras de aplicação do sistema. Já a dinâmica estuda o comportamento de variáveis em função do tempo, independentemente de esta variável ser uma constante que não se altera em função do tempo[25]. Esta abordagem tem alguns limites. Quando o nível de detalhe preciso de elementos discretos é importante, como eventos pontuais, filas, interações individuais ou agentes individuais, este método pode não capturar esse detalhe e pode ser melhor fazer uma simulação discreta ou baseada em agentes. Essa lacuna é muitas vezes a motivação para abordagens híbridas. Este paradigma, eventualmente, tende a gerar previsões determinísticas e menos variabilidade inerente a sistemas estocásticos ou baseados em agentes[26]. De forma geral conclui-se que a dinâmica de sistema estuda o comportamento de sistemas em função do tempo, podendo este sistema ter vários elementos inter-relacionados e interdependentes.

2.4 Simulação Híbrida

A simulação híbrida refere-se ao uso de duas ou mais técnicas de simulação em simultâneo dentro de um único estudo ou plataforma, para tirar partido das forças de cada paradigma. A simulação híbrida tem crescido e tem sido cada vez mais usada em áreas como a saúde, cadeias de abastecimento, produção/manufatura e planeamento urbano, porque permite modelar simultaneamente transmissão/interacções individuais, processos logísticos discretos, entre outros, com maior fiabilidade do que utilizando um único método isolado e aumentando assim a capacidade de representar e analisar sistemas complexos em várias escalas e domínios[27]. Alguns tipos de métodos frequentemente usados são híbrido vertical/funcional e híbrido temporal/nível. Por híbrido vertical/funcional entende-se o uso de técnicas diferentes para simular diferentes partes funcionalmente separadas do sistema. Exemplificando, simulação discreta para políticas macro e simulação baseada em agentes para micro-interacções[5]. Já por híbrido temporal/nível entende-se técnicas que coexistem para representar escalas temporais diferentes, como é o caso de usar simulação discreta e dinâmica de sistemas[28]. É bastante comum ser usada a técnica de simulação baseada em agentes junto com a dinâmica de sistemas para simular agentes heterogêneos cujos comportamentos "micro"geram efeitos "macro". Esta combinação traz muitas vantagens pois, enquanto a dinâmica de sistemas se foca em fluxos agregados e comportamento dinâmico de sistemas complexos a nível macro, a simulação baseada em agentes foca-se em representar o comportamento individual e as interações dos agentes autónomos a nível micro. A combinação destes dois métodos permite

que sejam contemplados simultaneamente diferentes níveis de complexidade, bem como diferentes perspectivas temporais e operacionais, o que ajuda a ter uma visão mais realista e completa dos sistemas complexos. Com o uso destas duas técnicas, podem ser usados alguns tipos diferentes de combinações. No tipo de combinação paralelo, os dois modelos são independentes e são usados para estudar diferentes aspectos do mesmo problema ou comparar resultados. No tipo sequencial, um modelo gera resultados que servem de input para o outro. No tipo interativo, ambos os modelos interagem ciclicamente e trocam dados em tempo de execução da simulação. No tipo dinâmico, o modelo alterna dinamicamente entre as duas técnicas consoante o contexto. No tipo enriquecimento, um método é o principal e é complementado por elementos do outro, sem criar um modelo separado. No tipo integração, há uma combinação total e contínua dos dois métodos num único modelo indistinguível. Esta combinação tem ainda algumas limitações, como é o caso de ter um foco limitado em domínios específicos e a maioria dos estudos aplica-se a casos particulares, como redes organizacionais ou cadeias de abastecimento. Não há diretrizes gerais sobre quando, porque e como combinar as duas técnicas[29].

Outra combinação muito usada é simulação baseada em agentes junto com simulação de eventos discretos. Por um lado, pode ser feita a simulação de eventos discretos para simular processos ou filas, como em fluxos ou logística, enquanto que a simulação baseada em agentes pode ser usada para a componente de simular comportamentos individuais que afetam o fluxo, tal como decisões de procura ou movimentos. Esta combinação permite ter uma boa eficiência computacional, uma vez que algumas partes do processo podem usar a simulação de eventos discretos para que se possa "gastar" CPU apenas em eventos. Por outro lado, torna a simulação flexível, pois fica mais fácil representar, por exemplo, disrupções, políticas locais da unidade de fabrico, ou estratégias individuais simultaneamente. Um dos principais desafios desta combinação é coordenar o tempo entre agentes e eventos. Algumas formas de contornar este problema é usar um *shared scheduler*, que funciona como um relógio partilhado, ou *Lookahead/conservative co-sim*, em que cada subsistema só avança até um tempo certo[30]. É também comum ser usado o método simulação de eventos discretos em conjunto com dinâmica de sistemas. A dinâmica de sistemas pode ser usada aqui para dar a visão estratégica, ou seja, como as políticas e decisões de longo prazo afetam o sistema de uma forma geral, enquanto que a simulação de eventos discretos mostra o que acontece na prática no nível operacional, de forma detalhada. A título de exemplo, o método dinâmica de sistemas pode ser usado para simular a evolução da procura de clientes, enquanto que a simulação de eventos discretos poderá ser usada para detalhar o funcionamento diário da unidade de produção, da linha e do pessoal da fábrica. Existem ainda várias formas de conjugar os dois métodos. Uma delas é o modelo de dinâmica de sistemas fornecer resultados como procura ou taxas, que servem depois de entrada para o modelo de

simulação de eventos discretos. Outra forma é os dois modelos trocarem informações dinamicamente durante a simulação. Este método é muito usado porque melhora a tomada de decisão a curto e longo prazo, mas também permite testar políticas globais e ver como elas afetam ou se refletem nas operações reais[27]. Algumas ferramentas usadas neste contexto são o *AnyLogic*, *GAMA*, *Repast* e *NetLogo*[27]. É importante salientar que será sempre uma boa prática validar cada submodelo, que usa cada uma das técnicas faladas, isoladamente e depois validar a integração das mesmas[28].

2.5 Casos de Estudo

Na tabela seguinte são identificados e descritos diversos casos de estudo em que foi utilizada a simulação híbrida, ou seja, com pelo menos 2 métodos de simulação.

Tabela 2.1: Casos de estudo sobre a utilização de simulação híbrida em linhas de produção.

Referência	Descrição
(Antonelli et al., 2018)[31]	O estudo analisa a combinação de dos métodos dinâmica de sistemas e simulação de eventos discretos, para avaliar o desempenho de um processo produtivo industrial. O modelo de dinâmica de sistemas representou o comportamento dinâmico do trabalho manual e dos operadores, enquanto a simulação de eventos discretos modelou a operação das máquinas automatizadas. Com o uso dos softwares Vensim e FlexSim, foi possível visualizar e testar vários cenários melhorados, o que permitiu identificar estratégias eficazes de balanceamento e planejamento do trabalho.
(Md Fauadi et al., 2022)[32]	Foi proposta uma abordagem híbrida que combina simulação DES com simulação baseada em agentes (ABS) e SD para melhorar a produção considerando a manutenção. O objetivo foi representar trabalhos, máquinas e ordens. Resultou num aumento de 17% na produção e uma redução de 14% nos atrasos

(continuação)

Referência	Descrição
(Helal et al., 2008)[4]	Apresentaram um modelo híbrido de DES e SD numa empresa de manufatura para representar comportamentos contínuos como gestão, finanças ou agregados, bem como discretos tal como eventos, tarefas e máquinas, de forma a criar cenários de decisão estratégica com impacto operacional, sem a necessidade de diferentes modelos isolados. Esta foi uma abordagem pioneira e mostrou que é possível manter integridade dos dois paradigmas, proporcionando uma troca de dados sincronizada e em tempo correto entre os módulos. Fundamentou teoricamente a vantagem da simulação híbrida em sistemas industriais.
(Oleghe et al., 2018)[33]	Investigaram uma fábrica de ração através de uma simulação híbrida que combinou SD e DES para avaliar a introdução de rotação de trabalho, a sua frequência ideal, o impacto da fadiga dos trabalhadores, a produtividade e a produção em geral. Este estudo permitiu prever impactos sobre a produtividade e evitou testes reais com possíveis consequências operacionais ou de saúde.
(Yang et al., 2021)[34]	Usaram simulação híbrida para um estudo hipotético de uma atividade de construção. O objetivo central foi integrar explicitamente o comportamento de segurança no planeamento da construção, algo que os autores identificaram como ausente nas ferramentas tradicionais. Aqui foram usados os três paradigmas, DES para fluxo operacional, ABS para comportamento dos trabalhadores e SD para fadiga, atitude e processos cognitivos. O estudo veio mostrar que a simulação híbrida permite representar comportamentos humanos adaptativos e que é possível avaliar intervenções de segurança antes da execução real.
(Barbosa et al., 2023)[35]	Este estudo usou dinâmica de sistemas, simulação de eventos discretos e simulação baseada em agentes para avaliar o desempenho de sustentabilidade numa cadeia de produção de uma empresa de aviação. Incluiu análise de recursos, produção, tempos, impactos ambientais etc.

(continuação)

Referência	Descrição
(McConville et al., 2023)[36]	Desenvolveram um modelo que combina DES e ABS para analisar diferentes políticas de recondicionamento e redistribuição de recursos, considerando incertezas como retornos de produtos, estado dos retornados, quantidade, variabilidade, entre outros. A simulação permitiu mostrar que a empresa, ao alterar seu esquema de turnos de dois turnos para um único turno, com realocação de recursos, poderia economizar consideravelmente por trimestre. Por outro lado, revelou que seria importante valorizar a reorganização de recursos e turnos, não necessariamente maximização de produção, como forma de reduzir os custos e melhorar a eficiência do processo de recondicionamento
(Wasesa et al., 2022)[37]	Este estudo desenvolveu um modelo híbrido para sistemas de reciclagem de baterias de íons de lítio, combinando simulação baseada em agentes e dinâmica de sistemas. Segundo os autores, a abordagem híbrida permitiu realizar análises microscópicas e macroscópicas do sistema integrado de reciclagem, possibilitando simultaneamente a avaliação operacional, económica e ambiental do sistema.
(Farsi et al., 2019)[38]	Propuseram uma abordagem híbrida combinando simulação baseada em agentes e simulação de eventos discretos para o desenho de sistemas de manufatura complexos. O modelo integra vários níveis de representação, incluindo comportamentos dos agentes e processos a nível operacional, o que permitiu capturar a complexidade dinâmica e estrutural dos sistemas produtivos. O modelo foi validado através de um caso de estudo na indústria de terapia celular e genética, demonstrando elevada precisão na representação do desempenho do sistema, tendo registado uma margem de erro de 1,038%.

(continuação)

Referência	Descrição
(Viana et al., 2018)[39]	Neste caso desenvolveram um modelo híbrido com simulação baseada em agentes e simulação de eventos discretos para uma clínica ambulatoria de gravidez prolongada na Noruega. A componente de simulação baseada em agentes foi utilizada para representar pacientes e profissionais de saúde, enquanto a outra vertente simulou os processos operacionais da clínica. O estudo demonstrou que a integração entre paradigmas permite melhorar o planeamento de recursos e a análise do fluxo de pacientes em ambientes hospitalares complexos.
(Camur et al., 2023)[40]	Neste estudo apresentou-se uma combinação de dinâmica de sistemas e simulação de eventos discretos no contexto da cadeia de abastecimento de equipamentos médicos em cenários de alta procura como foi o caso da pandemia. O Objetivo foi testar políticas de produção e distribuição para resistir aos picos da procura. A dinâmica de sistemas representou a dinâmica da procura enquanto a simulação de eventos discretos simulou a cadeia de abastecimento para responder a essa procura. Este modelo permitiu gerar políticas robustas de resposta rápida a uma procura extrema, avaliando as relações entre velocidade, custo e capacidade de resposta. Isto ofereceu recomendações quantitativas e cenários diferentes a ter em conta.

Ao analisar todos estes casos de estudo, é possível perceber que, de facto, a simulação é uma ferramenta importantíssima e com cada vez mais utilização no contexto industrial.

2.6 O Futuro da Simulação

A simulação está, cada vez mais, a evoluir de modelos isolados e de investigação para ecossistemas integrados, em que modelos heterogéneos são combinados com dados em tempo-real, inteligência artificial e infraestruturas em nuvem para produzir plataformas de decisões de operações e *digital twins*. *Digital twin* nada mais é do que uma réplica virtual dinâmica de um sistema que combina modelos de simulação com fluxos de dados reais como sensores, para criar réplicas dinâmicas de ativos, processos ou sistemas. Os *Digital twins* podem ser aplicados em diferentes níveis, desde máquinas individuais até linhas de produção completas e sistemas empresariais, por exemplo [41]. Com este tipo de ferramentas, a integração de IoT, *big data*,

IA, entre outros, permite que o modelo seja atualizado em tempo real, refletindo o estado atual do sistema físico, o que permite previsões e simulações contínuas, tornando mais fácil a previsão de falhas, ou melhorar intervenções de manutenção, reduzindo tempos de indisponibilidade e custos operacionais. [42]. Em contexto industrial, os gêmeos digitais permitem, por um lado, monitorizar o estado das máquinas ou das linhas de produção, mas por outro simular cenários futuros como cargas, picos de operação, falhas e planejar ações de controlo. Tudo isto contribui para uma manufatura mais resiliente, eficiente e adaptativa [43]. Além da indústria, as aplicações dos *Digital Twins* expandem-se a sistemas complexos, exemplificando, cadeias logísticas, *supply chain*, infraestruturas críticas e redes de energia. A adoção crescente dessas tecnologias demonstra que estão a tornar-se um componente essencial da infraestrutura digital de muitos setores [44]. Toda esta transição transforma a simulação numa ferramenta de suporte à decisão em tempo real e num componente básico da transformação digital na indústria[45]. Prevê-se também que esta evolução avance no sentido de oferecer ferramentas para manutenção preditiva[46]. É também possível prever que o futuro da simulação passe por uma evolução que permita uma visualização avançada, seja realidade virtual ou imagem tridimensional (3D), para interpretar resultados complexos, treinar humanos com simulações híbridas e suportar decisões. Já se veem, inclusive, provas de conceito em treinos clínicos e planeamento urbano[47]. A tendência mostra que no contexto industrial, a simulação irá evoluir de réplicas digitais para sistemas inteligentes, adaptativos e autónomos. A convergência entre simulação, inteligência artificial (IA) e *digital twins* permite que os modelos por um lado reflitam o estado atual do sistema físico, mas sejam também capazes de monitorização em tempo real, manutenção preditiva, tomada de decisão automática e adaptação dinâmica a variações e perturbações no sistema. Isto faz com que a simulação deixa de ser uma ferramenta passiva de planeamento ou estudo para se tornar uma infraestrutura ativa de operação contínua, inserida diretamente no ciclo produtivo e de controlo, o que representaria uma mudança de paradigma.[48]. Outro caminho aparentemente promissor é a simulação distribuída combinada com arquitetura de computação híbrida (edge/cloud), cuja ideia é dar suporte a *Digital Twins* com requisitos de latência baixa, grande volume de dados e segurança robusta. Este tipo de arquitetura poderá ser essencial para dar suporte a estes gêmeos digitais industriais que operem em tempo real e integrem dados de sensores, IoT e sistemas ciber-físicos. A sincronização com a Cloud facilitaria a supervisão e o controlo distribuído [49]. É possível concluir que a evolução tecnológica recente (e previsível para um futuro a curto e médio prazo) tem tido um papel fundamental no desenvolvimento de todas as ferramentas e métodos de simulação.

2.7 Revisão Bibliométrica

2.7.1 Metodologia de Investigação

Este estudo tem como principal objetivo analisar o papel da simulação híbrida como ferramenta de apoio à decisão no contexto industrial e logístico (naturalmente, aplicado a uma linha de produção de uma empresa industrial), com particular foco na combinação de pelo menos duas de três abordagens fundamentais, a simulação discreta, a simulação de sistemas e a simulação baseada em agentes. Esta metodologia permite explorar tanto o comportamento global dos processos, como o impacto das interações dinâmicas entre agentes e eventos individuais dentro do sistema em causa. A investigação desenvolvida neste trabalho foi estruturada em duas fases que se complementam. A primeira consiste na realização de uma revisão da literatura, com o intuito de identificar os contributos académicos ou científicos mais relevantes, as principais aplicações práticas e as vantagens da utilização de simulação híbrida em comparação com abordagens isoladas de simulação. Para isto, foi efetuada uma pesquisa na base de dados Scopus, selecionada pela sua credibilidade reconhecida na comunidade académica. A pesquisa incidiu sobre palavras-chave relacionadas com *Hybrid simulation*, *Manufacturing* e *production lines*, ou seja, o filtro, na prática, foi "*Hybrid simulation*" AND ("*Manufacturing*" OR "*production lines*"), de forma a que os resultados incluam sempre *Hybrid simulation* e também uma de duas hipóteses, sendo elas *Manufacturing* ou então *production lines*. Foram aplicados filtros de idioma, área científica e tipo de documento de forma a garantir a relevância e rigor dos trabalhos analisados.

A segunda fase passou pela análise dos estudos identificados, estruturada segundo alguns critérios como, por exemplo, metodologia utilizada, combinações de técnicas de simulação adotadas, quais os setores de aplicação e os resultados obtidos. Esta análise permitiu compreender a evolução do interesse científico pela simulação híbrida. Adicionalmente, fez-se uma avaliação da distribuição geográfica das publicações, com o objetivo de identificar os países e regiões com maior produção científica na área, o que permite observar possíveis correlações entre intensidade de investigação, desenvolvimento industrial e adoção de tecnologias de simulação avançadas.

Ao usar esta abordagem, o estudo procura fundamentar a relevância da simulação híbrida como uma evolução dos métodos tradicionais de simulação, ao mostrar o seu potencial para capturar a complexidade dos sistemas modernos e para apoiar decisões estratégicas e operacionais em ambientes industriais. A análise crítica dos trabalhos permite, ainda, identificar oportunidades futuras de investigação, nomeadamente no desenvolvimento com maior integração com tecnologias digitais emergentes (como *Digital Twins* e *IoT*) e a necessidade de ferramentas que facilitem a adoção prática desta abordagem pelas organizações/empresas industriais.

2.7.2 Discussão

No seguimento da metodologia de investigação abordada anteriormente, foi usado o seguinte critério na pesquisa:

Data da pesquisa: 22 de Novembro de 2025

Campos da pesquisa: *Article title*, *Abstract* e *Keywords*

Período de tempo: 2010 até 2024

Linguagem: Inglês

Tipo de documento: *Conference paper*, *Article* e *Book Chapter*

Pode-se então fazer uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados desta pesquisa feita. Desta forma, pode-se verificar a evolução, no período de tempo analisado, do número de publicações feitas por ano na figura 2.1.

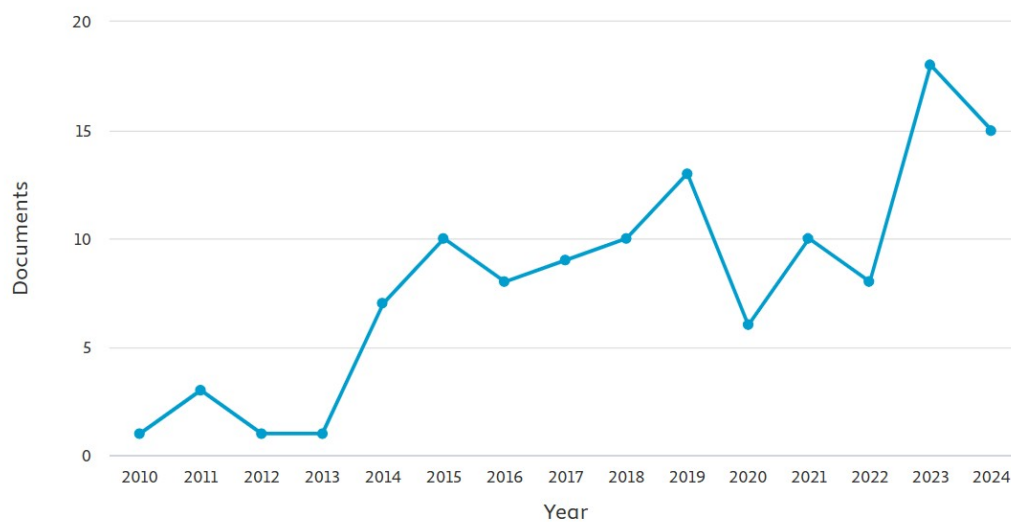


Figura 2.1: Documentos por ano [50].

Fica aqui bem visível que é uma área/assunto que tem vindo a ser cada vez mais estudada e posta em prática, sendo uma tendência cada vez maior nos últimos anos.

Por outro lado, pode-se também colocar em perspectiva o número de documentos por país, no período definido, como mostra a figura 2.2.

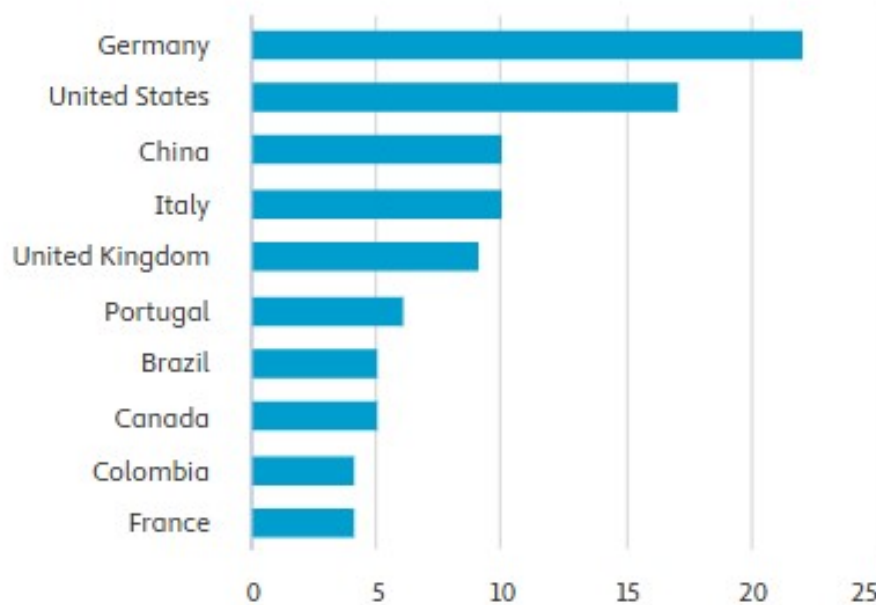


Figura 2.2: Documentos por país [50].

Verifica-se aqui que a Alemanha e os Estados Unidos da América lideram, fazendo a maior aposta na investigação e desenvolvimento da temática, estando Portugal, à data da pesquisa, no sexto lugar.

Para além do país, tem todo o interesse analisar os documentos publicados por instituição, evidenciados na figura 2.3.

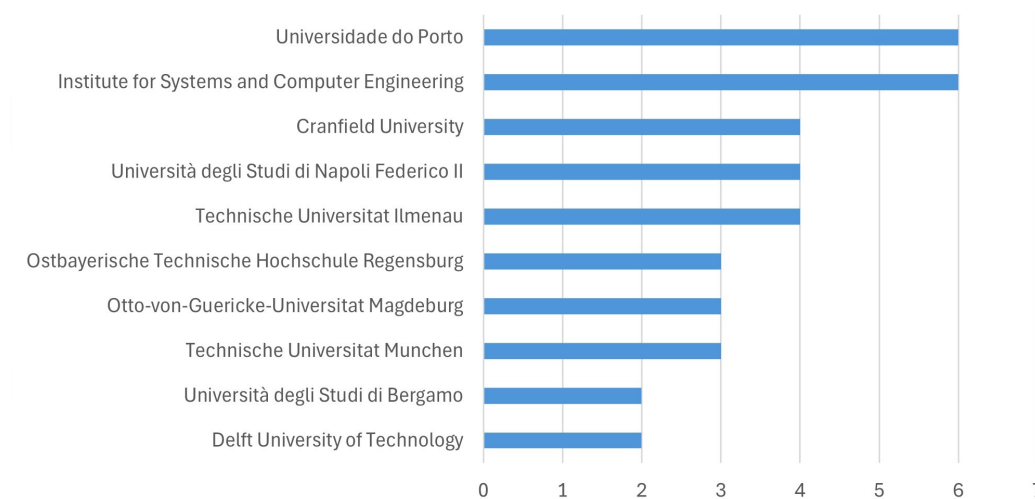


Figura 2.3: Documentos por instituição [50].

Quando o contexto é, então, o número de documentos publicados por instituição, verifica-se que a Universidade do Porto lidera.

Já a figura 2.4 inclui os autores com maior número de publicações feitas.

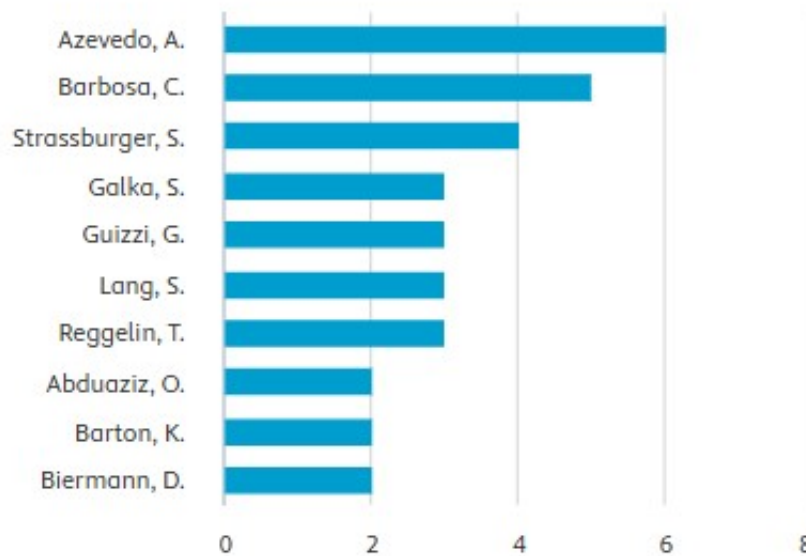


Figura 2.4: Documentos por autor [50].

É também importante, no contexto, verificar qual a área em causa nestes documentos publicados, como mostra a figura 2.5.

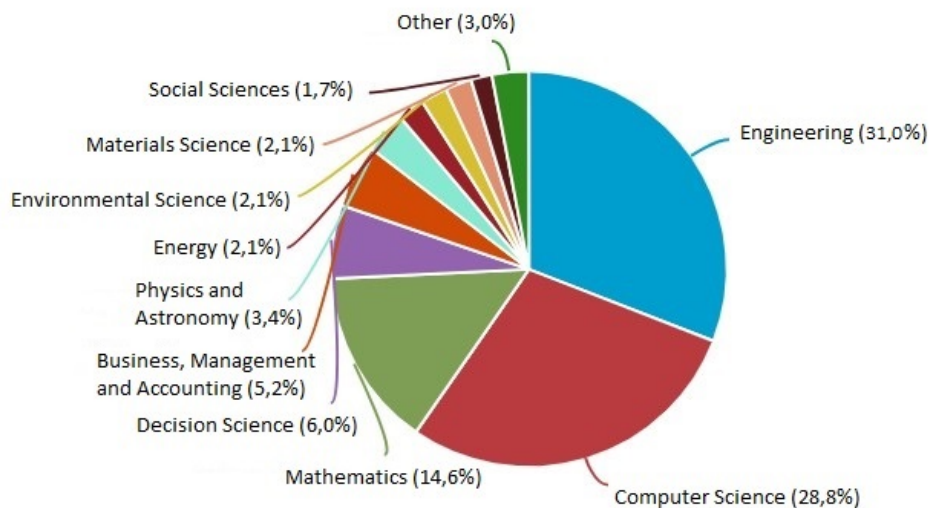


Figura 2.5: Documentos por área [50].

Como seria de esperar, Engenharia e Ciência de Computação são as áreas que, à data da pesquisa, apresentam maior preponderância na temática.

Mediante a pesquisa efetuada, a figura 2.6 mostra o tipo de documentos encontrados, na devida proporção.

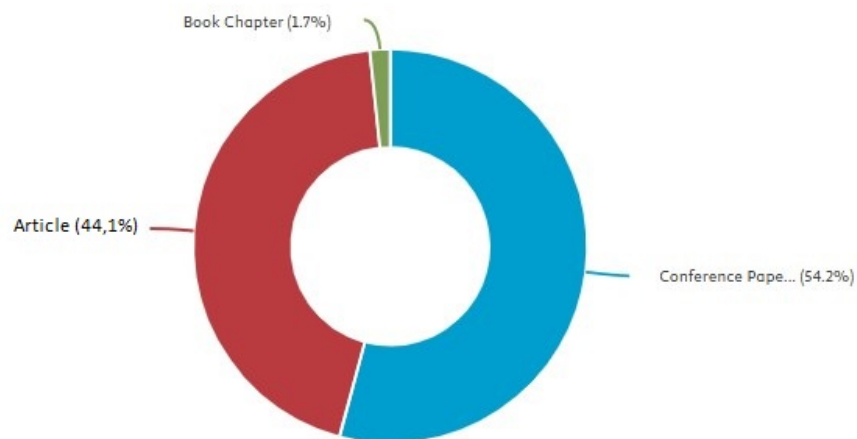


Figura 2.6: Documentos por tipo [50].

Capítulo 3

Sistema de Apoio à Decisão Desenvolvido

3.1 Descrição da Linha de Produção

A linha de produção estudada tem a forma de um sistema sequencial composto por vários postos de trabalho, nos quais são realizadas operações específicas sobre os produtos (sacos). Os sacos são recebidos num formato de cartolina já com todos os vincos necessários resultantes do molde específico encomendado e depois de terem sido impressas todas as imagens e elementos gráficos. O fluxo do processo em análise inicia-se com a receção destes sacos, sendo posteriormente encaminhados ao longo da linha através de diferentes etapas de processamento até à sua conclusão.

A linha é constituída por um conjunto de postos de trabalho numerados de forma sequencial, cada um associado a uma operação específica. Em cada posto, o saco é processado por uma operadora, sendo que, em 4 dos 7 postos, a operadora faz uso de uma máquina para o efeito, enquanto que nos restantes não é necessário o uso de maquinaria.

O fluxo de produtos entre postos é feito de forma contínua, ou seja, os produtos são encaminhados de um posto para o seguinte após a conclusão da operação anterior. Entre os postos podem formar-se filas de espera, dependendo da capacidade e disponibilidade das operadoras.

Na figura 3.1 é possível verificar a distribuição dos postos e a sua posição relativa, bem como analisar quais são os postos em que apenas há intervenção da operadora

e quais os que recorrem ao uso de maquinaria.

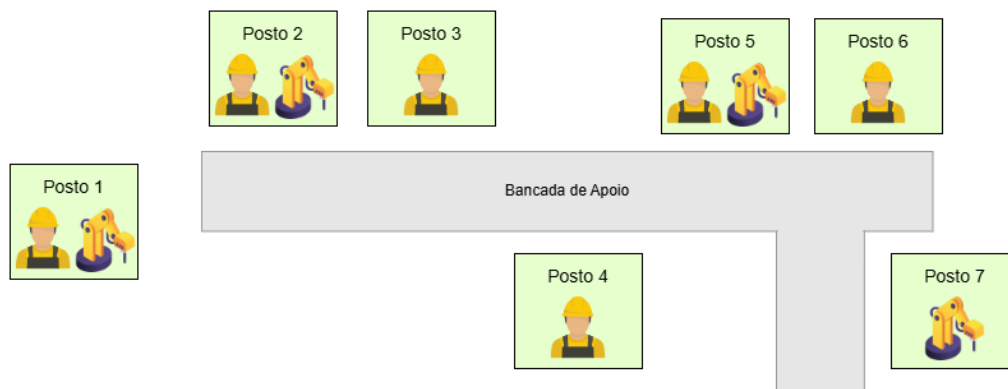


Figura 3.1: Layout da Linha Analisada.

No posto 1 é feita uma primeira colagem de pequenas cartolinas que vão servir para dar robustez a determinadas partes do saco. A operadora do posto desliza a cartolina para a sua frente e faz uso de uma máquina em que ao pressionar um pedal é dispensado um fio de cola, e tendo a cola na cartolina, são então coladas essas cartolinas pequenas nos sítios devidos. No posto 2 é colocada cola nos sítios onde duas partes do saco serão unidas uma à outra. A operadora deste posto faz passar o saco entre duas superfícies giratórias de forma a colocar a cola ao longo do saco. O 3º posto é responsável por fazer essa união, descrita para o posto anterior, e dobrar os primeiros vincos. No posto 4 são feitas dobras diferentes e aqui o saco começa a ganhar forma de paralelepípedo. No posto 5 é colada e dobrada a parte de baixo do saco. Também pisando um pedal é dispensada cola para as primeiras dobras, é colocado mais um reforço para que a parte inferior do saco fique resistente e é dispensada cola mais uma vez para as últimas colagens. No posto 6 são feitas as últimas dobras que dão ao saco a sua forma final. Aqui os sacos são colocados de forma a dar para "empilhar" e são colocados 10 num sentido e os 10 seguintes no sentido oposto, ficando prontos para o posto seguinte. No posto 7 são feitos dois furos onde irão depois entrar os cordões que servem de "pegas" para o saco, sendo que esses cordões já são colocados pelo cliente, não sendo parte do processo produtivo. Aqui os sacos são processados em grupos de 10, ou seja, de uma vez, são furados 10 sacos, com recurso a uma máquina que está calibrada desde o início do turno para que as furações fiquem uniformes em todos os sacos e no sítio devido para o efeito. Um dos elementos relevantes da linha é a existência do posto 7, uma vez que apenas são consideradas 6 operadoras e a operadora responsável pelo posto 6 irá, dinamicamente, alternar entre o posto 6 e o posto 7 mediante uma lógica predefinida. Por isso, na figura anterior, o posto aparece representado apenas com o símbolo usado para máquinas.

3.2 Modelo de Simulação Híbrido Desenvolvido

A função da linha simulada é receber os sacos que entram no fluxo pelo posto 1 e processar cada saco ao longo da linha passando pelas várias etapas até que no último posto são colocados em caixas, até que alguém externo à linha (pessoa que não é operadora) recolhe estas caixas e as fecha, estando prontas para ser expedidas. Na figura 3.2 é possível ver uma representação geral do modelo desenvolvido, tendo em evidência alguns dos parâmetros usados para cada técnica de simulação, bem como um exemplo dos indicadores-chave de desempenho.



Figura 3.2: Representação do modelo desenvolvido

Como mencionado anteriormente, o modelo conta com o uso de dois métodos de simulação. O fluxo dos produtos pela linha de produção representa a vertente de simulação discreta, em que cada posto foi implementado recorrendo aos elementos do software *Anylogic*: *seize*, *delay* e *release*. O *seize* é responsável por reunir e garantir que estão presentes os recursos necessários para a execução da tarefa (saco e a operadora que a vai executar). O *delay* serve para modular dinamicamente o tempo que leva a executar a tarefa. Já o *release* liberta os recursos, ou seja, o saco pode passar para o próximo posto e a operadora pode processar o próximo saco. De forma a implementar toda a lógica da linha foram usados outros elementos como é o exemplo de *queue* que representam *buffers* de cada posto, ou também *hold* que condicionam o fluxo dos produtos ao longo da linha. A vertente de simulação

baseada em agentes foi implementada com recurso a um conjunto de parâmetros, através dos quais se consegue atribuir variabilidade e que influenciam o trabalho de cada operadora, a forma como o exercem e, naturalmente, afetam o fluxo da linha de produção e a capacidade produtiva da mesma. Os parâmetros usados foram:

- Experiência - cada operadora tem uma determinada experiência na sua função. Uma operadora mais experiente é mais eficiente e mais rápida do que uma operadora menos experiente.
- Motivação - da mesma forma, uma operadora mais motivada, é, também ela, mais eficiente. A motivação de cada operadora varia ao longo do dia de trabalho.
- Pausas - cada operadora faz diversas pausas ao longo do dia de trabalho, sendo que o tempo que a operadora está em pausa não é sempre o mesmo.
- Fadiga - à medida que a operadora vai processando os produtos, um por um, a sua fadiga vai aumentando e só retrocede quando faz uma pausa. A acumulação de fadiga é determinante para a eficiência e rapidez na execução das suas tarefas e, consequentemente, influencia diretamente o fluxo e capacidade produtiva.

De forma a ser possível acompanhar o estado do fluxo de produção e de todas as variantes consideradas, foram colocados vários gráficos que podem ser visualizados em "*runtime*". Um deles foi um gráfico da figura 3.3 para acompanhar a evolução da fadiga de cada operadora ao longo do tempo, como é visível no exemplo, que demonstra os valores tomados por esse parâmetro durante um período do dia.

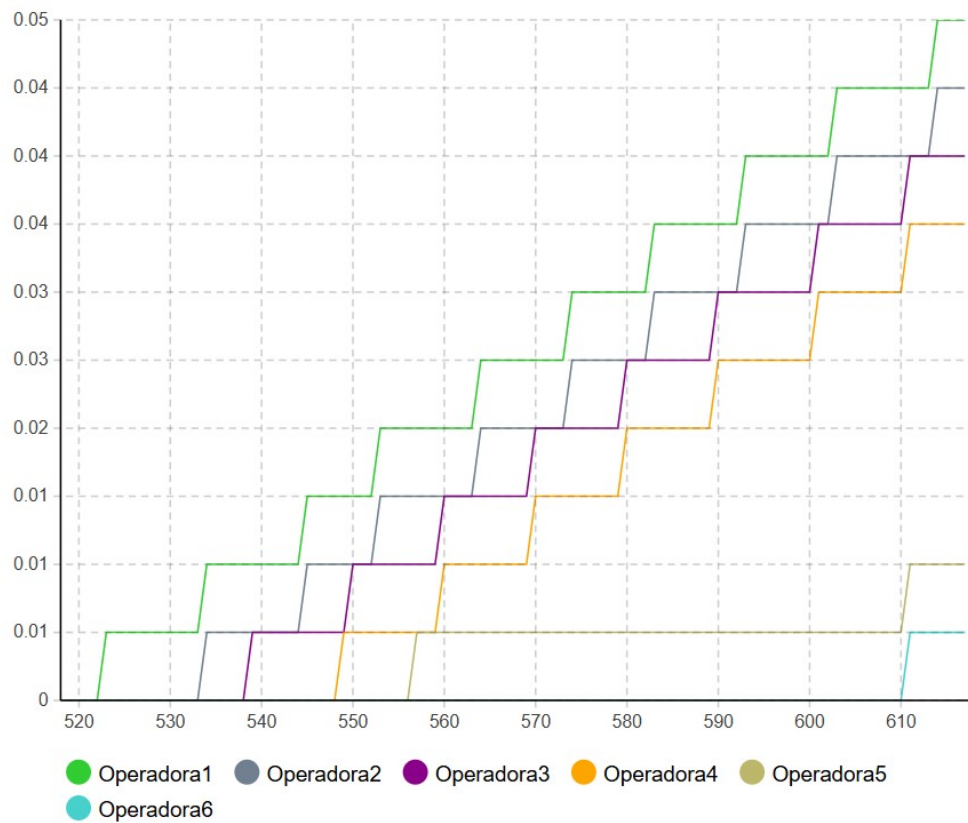


Figura 3.3: Gráfico da evolução da fadiga (*index* da fadiga em função do tempo).

De igual forma, a motivação de cada operadora também varia e um exemplo do seu gráfico é mostrado na figura 3.4.

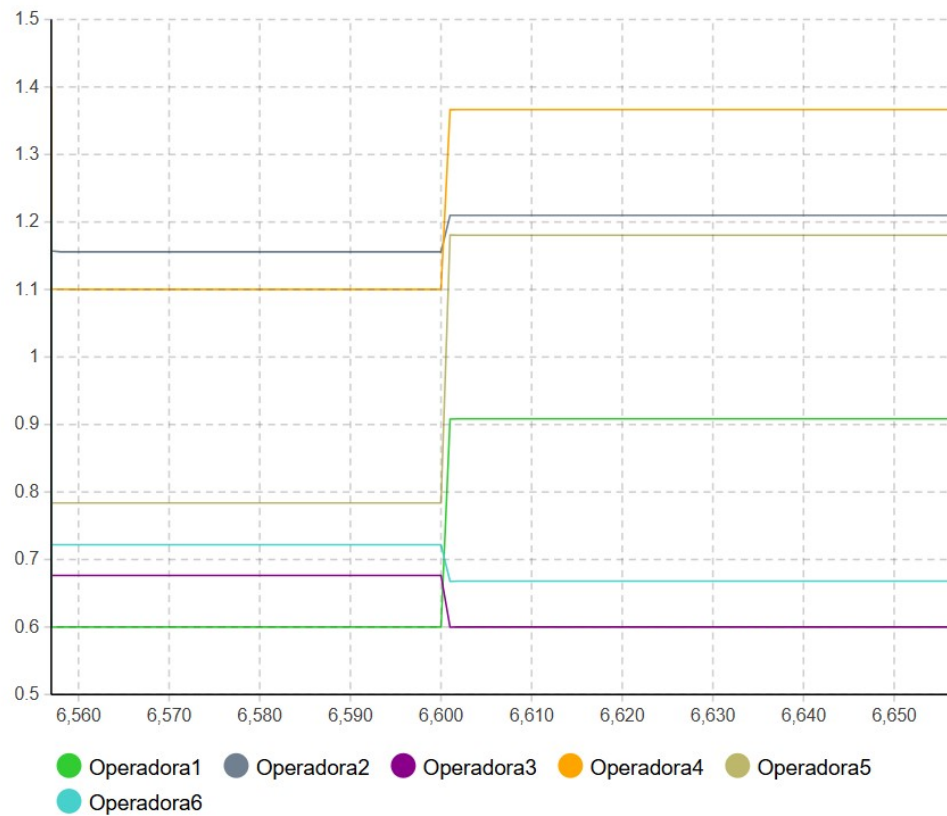


Figura 3.4: Gráfico da evolução da motivação (*index* da motivação em função do tempo).

Foi também colocado um gráfico de modo a acompanhar a quantidade de sacos acumulados em cada posto que estão à espera de ser processados. Um exemplo deste gráfico é ilustrado na figura 3.5.

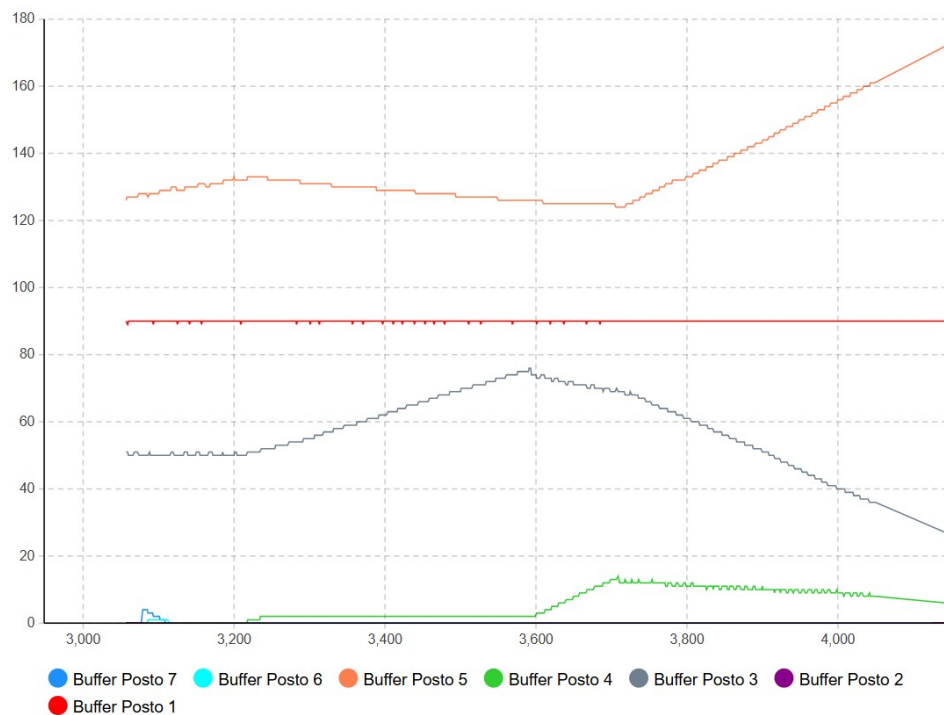


Figura 3.5: Gráfico do *buffer* de cada posto (unidades em espera em função do tempo).

Foi também considerada a métrica da utilização das operadoras, ou seja, em cada instante, quantas das seis operadoras estão ativas nas suas respectivas tarefas, de forma a que, se todas estiverem ocupadas, a curva deverá estar em 1, e de igual forma, se nenhuma estiver ocupada, a curva deverá estar em 0. Um exemplo do gráfico é exibido na figura 3.6.

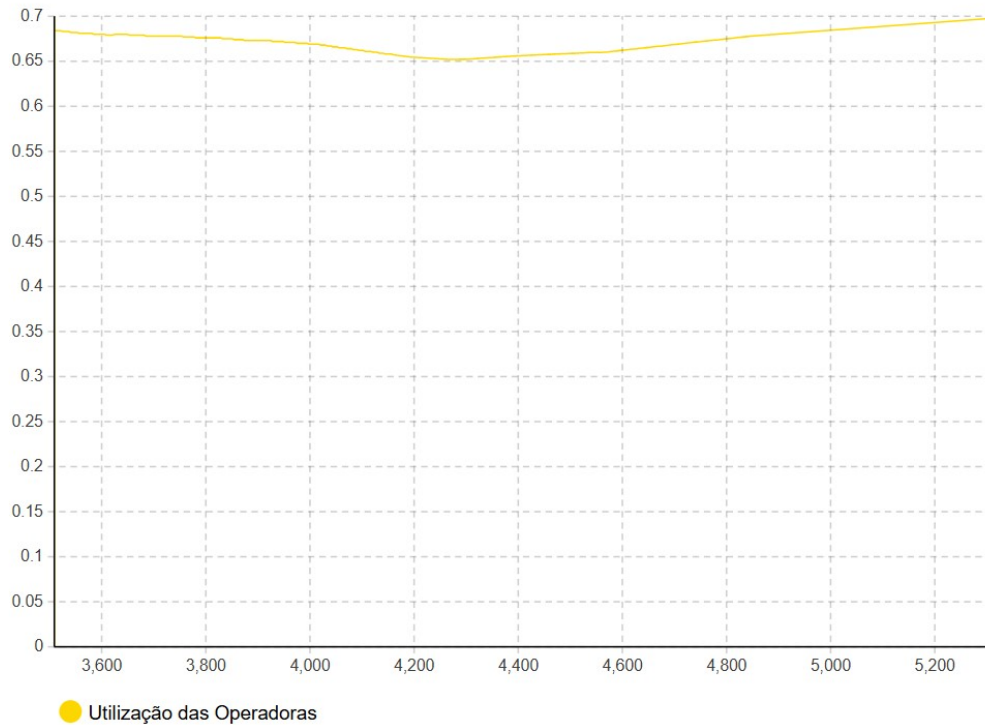


Figura 3.6: Gráfico da utilização das operadoras (*index* da utilização em função do tempo).

Foram ainda considerados vários indicadores durante a simulação recorrendo a elementos simples como campos de texto onde apareceriam, por exemplo, *throughput*, o total de sacos atualmente na linha, o gargalo em cada momento e o total produzido a cada momento.

De forma a proceder a uma comparação de resultados, recorrendo a gráficos, mediante as variações consideradas, como será falado mais à frente, utilizou-se a componente *Experiment*, mais precisamente *Compare Runs* onde se consegue definir dinamicamente os parâmetros a ser considerados em cada simulação e, de seguida, é possível executar essas simulações, uma após a outra, visualizando depois as curvas resultantes de cada simulação. Um exemplo é ilustrado na figura 3.7, onde é possível avaliar a quantidade produzida em 8 horas de trabalho. Neste gráfico, a primeira simulação efetuada é identificada como *Run 0*, seguindo-se das outras 2 simulações uma após a outra. os resultados apresentados são meramente ilustrativos de forma a representar uma possível comparação entre simulações

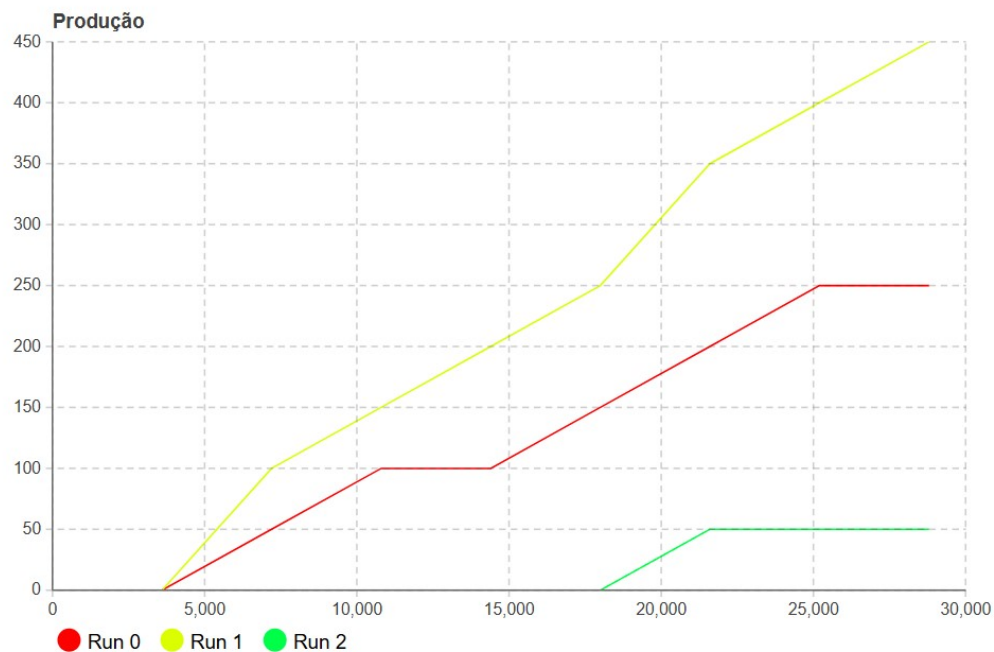


Figura 3.7: Gráfico da comparação entre simulações (produção em função do tempo).

Procurando acompanhar o movimento das operadoras nas suas pausas e no decorrer das suas tarefas, bem como outros elementos considerados, desenvolveu-se uma área em que, durante a simulação, se consegue ter uma visão tridimensional da linha de produção. Procurou-se tornar a representação o mais fiel possível considerando o *layout* real da fábrica e da linha de produção em si, com os respectivos postos de trabalho. A figura 3.8 mostra um dos ângulos em que foi observada a simulação e a figura 3.9 mostra um outro ângulo, do lado oposto da linha simulada.

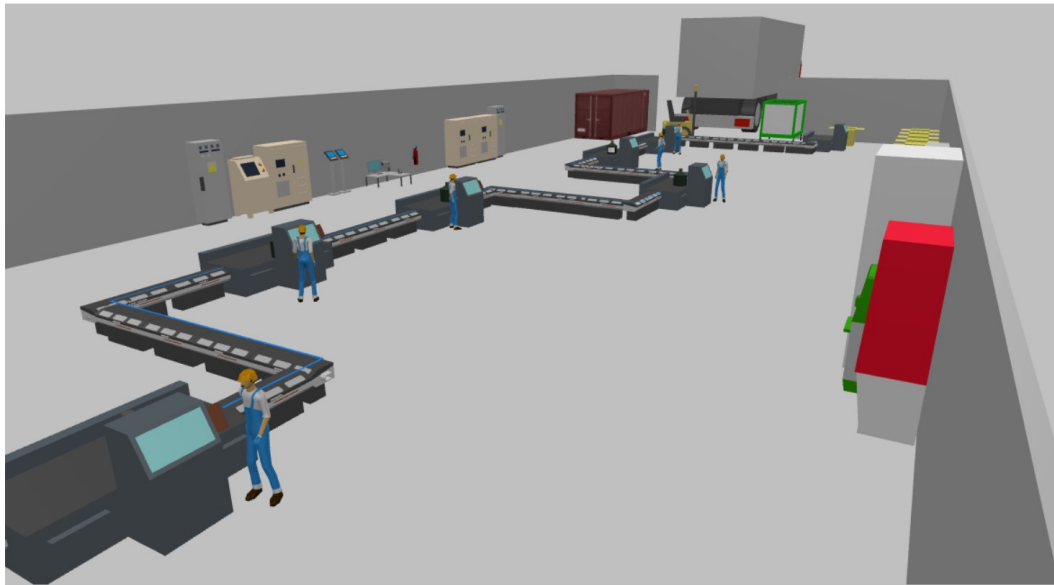


Figura 3.8: Representação tridimensional da linha de produção (ângulo 1).



Figura 3.9: Representação tridimensional da linha de produção (ângulo 2).

Para implementar toda a lógica necessária, desenvolveram-se vários trechos de código. A linguagem utilizada foi *java*. De seguida, são explicados alguns exemplos de código desenvolvido.

A seguir mostra-se o trecho necessário para acompanhar, a cada momento, qual o gargalo da linha (posto com mais sacos em espera).

```

1  {
2      int max = queue1.size();
3      int posto = 1;
4      if (queue2.size() > max) {
5          max = queue2.size();
6          posto = 2;
7      }
8      if (queue3.size() > max) {
9          max = queue3.size();
10         posto = 3;
11     }
12     if (queue4.size() > max) {
13         max = queue4.size();
14         posto = 4;
15     }
16     if (queue5.size() > max) {
17         max = queue5.size();
18         posto = 5;
19     }
20     if (queue6.size() > max) {
21         max = queue6.size();
22         posto = 6;
23     }
24     if (AlocarOp7.queue.size() > max) {
25         max = AlocarOp7.queue.size();
26         posto = 7;
27     }
28     return "Gargalo: Posto " + posto + " (fila = " + max + ")";
29 }

```

Sempre que esta função é chamada, retorna o gargalo daquele momento.

Para definir o tempo que cada operação demora para ser executada foi efetuado o seguinte cálculo:

```

1  triangular(5, 6.3, 8) * (1 + agent.op.fadiga) / (agent.op.
    experiencia * agent.op.motivacao)

```

Sendo que a função triangular gera um valor aleatório entre 5 e 8 segundos, que são o mínimo e o máximo, com maior probabilidade perto de 6,3 segundos, que corresponde à moda. Fica também visível como a fadiga, a motivação e a experiência da operadora influenciam o tempo que leva a concluir a tarefa.

Para além disto, sempre que um saco é processado, é necessário lidar com a fadiga, que vai incrementando, mas sem passar de um limite definido:

```

1  agent.op.fadiga += IncrementoFadiga;

```

```
2 agent.op.fadiga = Math.min(agent.op.fadiga, FadigaMax);
```

Já a motivação varia periodicamente em intervalos de tempo predefinidos segundo a lógica:

```
1 double variacao = uniform(-0.4, 0.4);
2 motivacao += variacao;
3 // limitar valores
4 motivacao = min(main.MotivacaoMax, max(main.MotivacaoMin,
    motivacao));
```

Ou seja, a cada período de tempo, cada operadora vê a sua motivação aumentar ou diminuir de forma aleatória dentro de um limite definido, neste caso, a título de exemplo, pode variar no máximo 0,4 unidades de cada vez.

Como mencionado anteriormente, apenas existem 6 operadoras na linha para operar em 7 postos, sendo a operadora do posto 6 quem opera o posto 7. Esta troca de posto dá-se quando, na saída do posto 6, estão 50 sacos que são lá colocados em grupos de 10 dentro de uma caixa. Depois de processar os 50 sacos no posto 7 a operadora volta ao posto 6. Esta lógica foi implementada da seguinte forma:

```
1 // ATIVAR
2 if (queue7.size() >= 5 && !op7Ativo) {
3     op7Ativo = true;
4     hold6.block();
5     println("OP7 ATIVADO");
6
7     // escolher operadora (do posto 6)
8     for (Operadoras o : operadoras) {
9         if (o.postoAtual == 6) {
10             operadoras.get(5).postoAtual = 7;
11             o.Estado.fireEvent("irParaPosto");
12             println("Operadora " + o + " foi para OP7");
13             break;
14         }
15     }
16 }
17
18 // DESATIVAR
19 if (AlocarOp7.queue.size() == 0 && op7Ativo && queue7.size() == 0)
20 {
21     op7Ativo = false;
22     hold7.block();
23     println("OP7 DESATIVADO");
24
25     for (Operadoras o : operadoras) {
```

```

25         if (o.postoAtual == 7) {
26             operadoras.get(5).postoAtual = 6;
27             o.Estado.fireEvent("irParaPosto");
28             traceln("Operadora " + o + " voltou de OP7");
29         }
30     }
31 }

```

Foi criado um diagrama de estados que reflete e dita o comportamento de cada operadora no que diz respeito aos estados pelos quais cada uma passa ao longo do dia de trabalho, como é visível na figura 3.10.

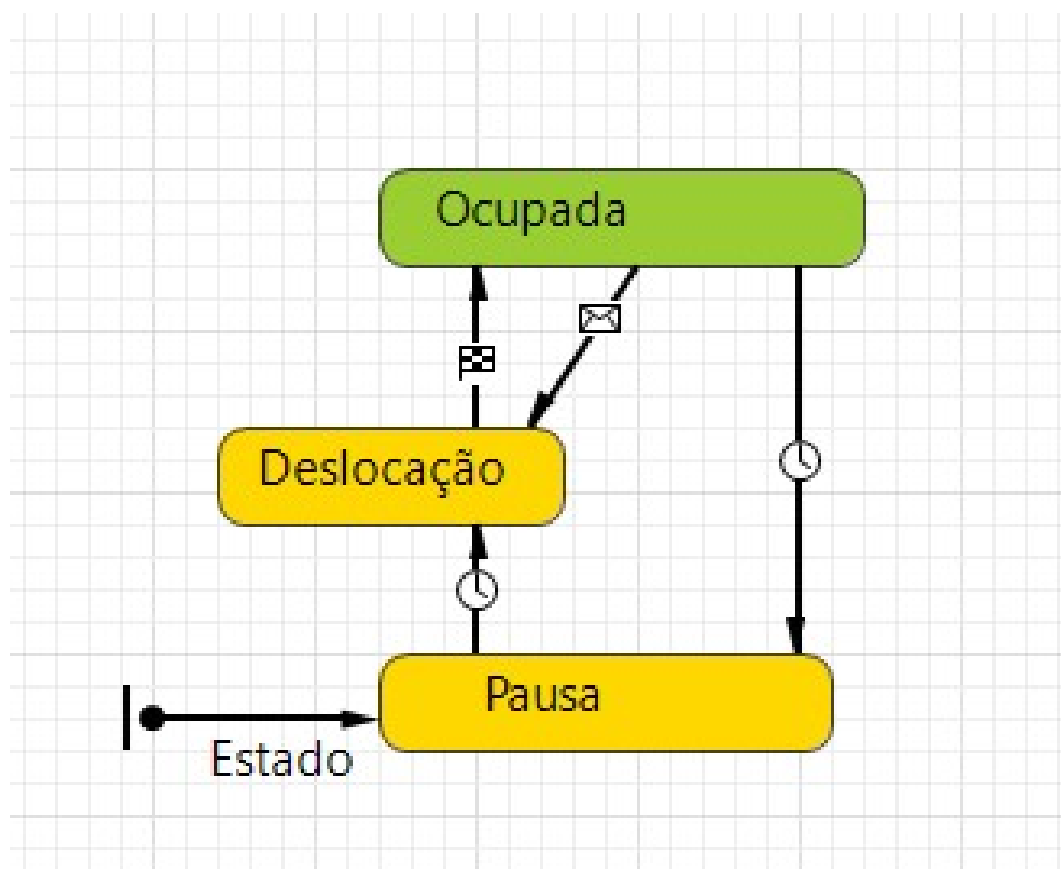


Figura 3.10: Diagrama de estados da população de operadoras

É possível verificar que o estado inicial é a pausa, de forma a simular a chegada das operadoras à fábrica, depois de "picarem o ponto", uma vez que ainda têm de se preparar para começar as tarefas respetivas. A transição deste estado para o próximo é despoletada por *timeout* sendo este:

```

1 triangular(main.TempoPausaMin, main.TempoPausaMed, main.
    TempoPausaMax)

```

Quando acabam a pausa, deslocam-se para o seu posto de trabalho (estado "Deslocação").

```
1 emPausa = false;
2 println("Operadora " + getName() + " (ID=" + getIndex() + ") a
   voltar");
3 moverParaPosto(postoAtual);
```

Sendo a função moverParaPosto a seguinte:

```
1 switch(posto) {
2     case 1: moveTo(mainRef.Posto1); break;
3     case 2: moveTo(mainRef.Posto2); break;
4     case 3: moveTo(mainRef.Posto3); break;
5     case 4: moveTo(mainRef.Posto4); break;
6     case 5: moveTo(mainRef.Posto5); break;
7     case 6: moveTo(mainRef.Posto6); break;
8     case 7: moveTo(mainRef.Posto7); break;
9 }
```

Quando a operadora chega ao seu posto, entra no estado "Ocupada" e é chamada a função atualizarEstadoPausa().

```
1 fadiga = 0;
2 println("Operadora " + getName() + " (ID=" + getIndex() + ")
   voltou da pausa");
3 atualizarEstadoPausa();
```

Esta função é responsável por bloquear ou desbloquear a entrada de sacos no posto da operadora em questão, como é visível abaixo:

```
1 if (emPausa) {
2     mainRef.bloquearPosto(postoAtual);
3 } else {
4     mainRef.desbloquearPosto(postoAtual);
5 }
```

Aqui é feita menção das funções bloquearPosto() e desbloquearPosto(), cujo código é mostrado de seguida:

```
1 switch(posto) {
2     case 1: hold1.block(); break;
3     case 2: hold2.block(); break;
```

```

4         case 3: hold3.block(); break;
5         case 4: hold4.block(); break;
6         case 5: hold5.block(); break;
7         case 6: hold6.block(); break;
8         case 7: hold7.block(); break;
9     }

```

```

1  switch(posto) {
2      case 1: hold1.unblock(); break;
3      case 2: hold2.unblock(); break;
4      case 3: hold3.unblock(); break;
5      case 4: hold4.unblock(); break;
6      case 5: hold5.unblock(); break;
7      case 6: hold6.unblock(); break;
8      case 7: hold7.unblock(); break;
9  }

```

Dentro do estado "Ocupada", cada operadora da população de operadoras pode transitar para outro estado mediante uma de duas situações:

- Ocorrência de *timeout*, sendo este um valor aleatório dentro de um intervalo predefinido:

```

1  uniform(main.TempoEntrePausasMin, main.TempoEntrePausasMax)

```

Sendo que, se isto acontecer, é executado o seguinte trecho:

```

1  emPausa = true;
2  println("Operadora " + getName() + " (ID=" + getIndex() + ")
   entrou em pausa");
3  atualizarEstadoPausa();
4  moveTo(mainRef.OperadorasPool);

```

- Receção da mensagem "irParaPosto", mencionada anteriormente.

3.3 Validação do Modelo de Simulação

Uma etapa determinante para verificar se o modelo está apto e adequado para a simulação da linha de produção é a validação do modelo desenvolvido. Desta forma, realizou-se uma comparação entre a produção normal da fábrica durante um dia de trabalho (8 horas) e a produção obtida através do software para o mesmo tempo decorrido. Mediante o tipo de saco (características e dimensões) é sabido que um dia

de produção normal na fábrica (8 horas) deverá resultar em cerca 400 a 500 sacos produzidos. Tendo isto em conta, foram realizadas várias simulações e registado o número de sacos produzidos em cada uma delas. Estes registos são apresentados na tabela 3.1.

Simulação	Quantidade Produzida
1	435
2	447
3	460
4	496
5	469
6	398
7	430
8	445
9	436
10	468

Tabela 3.1: Registos das simulações

Após executar várias simulações independentes, obteve-se um conjunto de valores de produção diária compreendidos entre 398 e 496 unidades, com um valor médio de aproximadamente 448,4 (448) unidades por dia. Comparando estes resultados com os dados reais disponibilizados, que, como mencionado anteriormente, indicam uma produção diária entre 400 e 500 unidades, verifica-se que no geral os valores simulados encontram-se dentro do intervalo observado no sistema real, sendo o desvio no valor mínimo registado pouco significativo (398 unidades). Adicionalmente, a média das simulações apresenta um desvio reduzido face ao valor central do intervalo real (450 unidades), correspondendo a um erro relativo inferior a 1%, o que mostra uma grande concordância entre o modelo e o comportamento do sistema real. Desta maneira, conclui-se que o modelo desenvolvido apresenta uma boa capacidade de representação da realidade, podendo ser considerado válido para efeitos de análise e apoio à decisão.

3.4 Análise de Cenários

3.4.1 Cenário 1 - Influência da Experiência das Operadoras

O objetivo deste cenário é analisar o impacto da experiência das operadoras no desempenho global da linha de produção ao nível da produtividade e eficiência do sistema, tendo em conta que operadoras mais experientes executam tarefas com maior rapidez. Desta forma, este cenário está associado à vertente de simulação baseada em agentes. A experiência é um fator que influencia diretamente o tempo de processamento das tarefas e representa a capacidade das operadoras executarem operações de forma mais rápida e eficiente. No modelo base, a experiência das

operadoras é representada por uma variável aleatória com distribuição uniforme no intervalo de 0.5 a 1.1. Este intervalo representa uma equipa heterogénea, composta por operadoras com diferentes níveis de experiência, desde iniciantes até operadoras mais experientes (representando o que foi visto na linha real). Para o cenário em análise, idealiza-se uma melhoria do nível mínimo de experiência, alterando o intervalo para 1.0 até 1.1 de forma a ter-se uma situação em que todas as operadoras possuem um nível de experiência elevado, resultado de formação adicional, aquisição de novas competências e principalmente retenção de operadoras mais experientes. Procurando então analisar o impacto da uniformização da experiência das operadoras no desempenho global do sistema este cenário procura testar uma situação em que todas as operadoras são tão experientes na sua tarefa quanto a operadora mais experiente atualmente na unidade produtiva. Os resultados obtidos mostram uma produção relativamente estável entre as várias simulações, registando-se valores entre aproximadamente 500 e 600 unidades produzidas. Verifica-se que o aumento da experiência contribuiu para uma melhoria moderada do desempenho global, reduziu os tempos médios de execução das operações e permitiu um fluxo produtivo mais eficiente. Os resultados de cada simulação para um dia de trabalho (8 horas) são listados na tabela 3.2.

Simulação	Quantidade Produzida
1	586
2	593
3	499
4	498
5	600
6	554
7	574
8	560
9	547
10	571

Tabela 3.2: Registos das simulações - Influência da Experiência

3.4.2 Cenário 2 - Operadora Dedicada ao Posto 7

No cenário inicial, o funcionamento do posto 7 era baseado numa lógica de processamento por lotes. Os sacos provenientes do posto 6 eram acumulados até atingir uma determinada quantidade, sendo depois processados em grupos de 10 pela própria operadora do posto 6. Apesar de a operação realizada no posto 7 apresentar um tempo de processamento relativamente reduzido, esta abordagem introduzia períodos de espera significativos antes do início efetivo do processamento. Para além disso, a utilização da mesma operadora para executar operações em dois postos

distintos introduzia interrupções frequentes no fluxo produtivo, uma vez que a operadora tinha de alternar entre as tarefas do posto 6 e do posto 7. Esta partilha de recursos originava variabilidade adicional no sistema e reduzia a continuidade do fluxo de produção. Desta forma, pretende-se neste cenário introduzir uma operadora exclusivamente dedicada ao posto 7, e o foco do cenário está na reorganização do fluxo produtivo e alocação de recursos ao longo da linha, sendo que o cenário está ligado à vertente da simulação discreta. Assim, os sacos passam a ser processados individualmente e logo após a chegada ao posto, o que elimina a necessidade de acumulação de lotes antes de serem processados tornando o fluxo mais uniforme. O objetivo passa por aumentar a continuidade operacional, reduzir interrupções e melhorar a estabilidade do fluxo ao longo da linha. Isto porque, em sistemas produtivos, a eficiência global não depende só dos tempos de processamento em cada posto, mas também da forma como o fluxo de materiais e os recursos humanos são organizados. Com a introdução desta operadora, o posto passou a operar de forma contínua, o que permitiu o processamento imediato dos sacos mal chegam ao posto. Os resultados mostram uma melhoria muito significativa da produção relativamente ao cenário inicial, com produções superiores a 700 unidades em várias simulações. Este comportamento indica um impacto grande da organização do fluxo produtivo e da gestão de recursos humanos no desempenho global do sistema. Apesar de o posto 7 não ser um gargalo da linha, a política anterior de processamento neste posto introduzia períodos significativos de espera e interrupções frequentes na operação do posto 6. A eliminação dessas interrupções permitiu melhorar bastante a continuidade do fluxo produtivo e aumentar a eficiência global da linha, como é visível nos resultados para um dia de trabalho (8 horas), na tabela 3.3.

Simulação	Quantidade Produzida
1	602
2	689
3	677
4	755
5	684
6	702
7	721
8	698
9	651
10	683

Tabela 3.3: Registos das simulações - Operadora Dedicada ao Posto

3.4.3 Cenário 3 - Operadora Vem Cobrir as Pausas do Gargalo

Com recurso às ferramentas descritas anteriormente para o período de simulação, chegou-se à conclusão que o posto 5 é o gargalo da linha de produção. Posto isto, este cenário propõe que uma operadora que está, normalmente, noutra tipo de funções da fábrica, venha cobrir as pausas da operadora deste posto 5 de forma a que este posto raramente pare a sua operação e esteja de forma contínua a processar sacos. Assim, sempre que a operadora afeta ao posto 5 entra em pausa, a operadora "extra" é alocada a esse posto, deslocando-se até à sua posição e assumindo temporariamente as suas funções. Esta operadora permanece no posto apenas durante o período de pausa da operadora principal, regressando posteriormente à sua posição inicial assim que esta retoma a sua atividade de novo. Este cenário apresenta uma estratégia baseada na flexibilidade da alocação de recursos e comportamento dinâmico de uma operadora que se desloca e reage a estados do sistema, e então, a principal vertente deste cenário é simulação baseada em agentes. O objetivo desta é reduzir os períodos de inatividade do posto que é mais crítico, de forma a levar a uma continuidade das operações do posto mesmo durante a indisponibilidade da operadora principal. Os resultados mostram uma melhoria moderada da produção relativamente ao cenário base. Embora o impacto positivo seja visível, os ganhos obtidos foram inferiores aos observados noutros cenários. Este comportamento sugere que, apesar de as pausas influenciarem o desempenho do posto, o sistema continua condicionado por outros fatores operacionais e pela própria capacidade instalada da linha. Este cenário mostrou também a importância da flexibilidade na alocação de recursos humanos para evitar ou diminuir as perdas de produtividade. Os resultados de um dia de trabalho (8 horas) são listados na tabela 3.4.

Simulação	Quantidade Produzida
1	527
2	508
3	546
4	501
5	558
6	627
7	645
8	515
9	644
10	545

Tabela 3.4: Registos das simulações - Operadora Cobre Pausas no Gargalo

3.4.4 Cenário 4 - Duplicar Posto 5

Como mencionado no cenário anterior, determinou-se que o gargalo da linha é o posto 5. No cenário inicial, o posto 5 apresentava grandes níveis de utilização e acumulação de entidades em fila, ou seja, tratava-se do principal elemento que limitava o desempenho global do sistema. Este cenário propõe um investimento de forma a poder duplicar este posto e, desta maneira, possa ter-se dois postos em paralelo a fazer esta parte do processo. Visto que o foco é principalmente aumentar a capacidade produtiva da linha e reduzir o impacto do posto identificado como gargalo, então, tal como no cenário 2, a principal vertente deste cenário é simulação discreta. Pretende-se ter uma estrutura que permita um balanceamento eficiente da carga de trabalho entre estes dois postos em paralelo. Naturalmente, esta duplicação representa também a necessidade de investimento em maquinaria do posto e recursos humanos adicionais, na forma de uma nova operadora para executar estas funções. Os resultados obtidos mostram uma melhoria significativa da produção relativamente ao cenário inicial. A execução paralela permitiu reduzir os tempos de espera e aumentar a capacidade efetiva do sistema. No entanto, verificou-se também uma dispersão um pouco maior dos resultados entre as várias simulações, o que sugere que, após a redução da limitação inicial, outros postos da linha passaram a influenciar mais o desempenho global do sistema. Na tabela 3.5 é possível verificar quais foram os resultados da produção de um dia de trabalho (8 horas).

Simulação	Quantidade Produzida
1	513
2	620
3	678
4	663
5	613
6	569
7	561
8	647
9	651
10	637

Tabela 3.5: Registos das simulações - Posto do Gargalo Duplicado

3.4.5 Cenário 5 - Variação na Frequência de Pausas

Este cenário consiste na sugestão de aumento significativo no número de pausas, ou seja, o tempo entre cada pausa deve ser bastante menor, no entanto, cada pausa deve ter uma duração também menor. Desta forma, procura-se que as operadoras façam pausas com maior frequência para evitar o acumular de fadiga e o trabalho recorrente com fadiga, com a contrapartida de cada pausa ser de menor duração.

Ou seja, ao introduzir pausas mais frequentes, pretende-se promover uma recuperação mais regular do estado físico e operacional das operadoras, evitando longos períodos de trabalho sob elevados níveis de fadiga. Procura-se assim um equilíbrio mais eficiente entre tempo produtivo e recuperação, reduzindo os efeitos negativos da fadiga sem introduzir períodos prolongados de inatividade por meio de pequenas pausas distribuídas ao longo do turno que podem contribuir para a manutenção do desempenho, redução do desgaste físico e melhoria da estabilidade operacional. Mudando então o comportamento das operadoras (no que diz respeito às pausas), que por sua vez afeta outros parâmetros, fica claro que a vertente mais preponderante é a simulação baseada em agentes. Importa referir que a eficácia desta estratégia depende do equilíbrio entre a frequência e duração das pausas. Pausas demasiado frequentes poderiam introduzir um número excessivo de interrupções, enquanto pausas demasiado longas poderiam reduzir muito o tempo produtivo disponível. Assim, neste cenário, o intervalo entre pausas foi reduzido, passando a ser mais frequentes, enquanto que a duração individual de cada pausa foi significativamente diminuída. O principal objetivo desta estratégia foi reduzir a acumulação de fadiga ao longo do tempo, existindo recuperações mais frequentes sem que hajam grandes períodos de inatividade. Os resultados mostram uma melhoria moderada do desempenho relativamente ao cenário base. A redução da fadiga permitiu melhorar o desempenho médio das operadoras e reduzir o impacto negativo do trabalho prolongado por grandes períodos de tempo. No entanto, os ganhos obtidos não foram tão elevados quanto os observados em cenários associados à reorganização da estrutura da linha ou aumento de capacidade. Os resultados da produção num dia de trabalho (8 horas) aparecem listados na tabela 3.6.

Simulação	Quantidade Produzida
1	565
2	494
3	591
4	546
5	644
6	538
7	511
8	640
9	581
10	590

Tabela 3.6: Registos das simulações - Influência da Política de Pausas

3.4.6 Cenário 6 - Influência da Motivação

Para verificar que impacto da motivação, a sugestão deste cenário passa por simular uma situação em que as operadoras se mantêm com níveis altos de motivação ao

longo do dia. Isto porque, obviamente, uma operadora com níveis altos de motivação apresenta-se mais concentrada e efetua as suas tarefas com mais perfeição e principalmente rapidez reduzindo os tempos de execução das tarefas. Desta forma, tal como no cenário 5, a principal vertente estudada é a simulação baseada em agentes. Algumas melhorias que poderiam ser colocadas em prática para atingir estes níveis de motivação passariam por exemplo, por:

- Melhoria nas condições de trabalho. Ao nível da ergonomia e redução do esforço físico, uma vez que parte das operadoras fazem o seu trabalho de pé. O conforto térmico também poderia ser tido em conta.
- Políticas de incentivos. Nomeadamente ao nível de prémios de desempenho, bónus por produtividade e reconhecimento interno.
- Ambiente organizacional. Algo menos valorizado mas de importância elevada, incluindo o ambiente de trabalho, a comunicação e a liderança ou qualidade da supervisão.

Recapitulando, o objetivo principal é avaliar o impacto da motivação das operadoras no desempenho da linha. Para isto, os níveis de motivação foram ajustados para valores mais elevados e estáveis, representando condições de trabalho mais favoráveis e um maior envolvimento das operadoras com as tarefas realizadas. O aumento da motivação influenciou diretamente os tempos de execução das operações, o que permitiu reduzir os tempos médios de processamento e melhorar a eficiência das operadoras. Os resultados demonstram uma melhoria significativa da produção relativamente ao cenário inicial, tendo sido obtidos valores elevados e relativamente consistentes entre as várias simulações. A seguir, é possível verificar os resultados obtidos na tabela 3.7, referentes à produção num dia de trabalho (8 horas). Este

Simulação	Quantidade Produzida
1	604
2	630
3	606
4	680
5	688
6	702
7	596
8	716
9	666
10	675

Tabela 3.7: Registos das simulações - Influência da Motivação

comportamento coloca evidência a importância dos fatores humanos no desempenho de sistemas produtivos e que aspetos comportamentais e organizacionais podem influenciar diretamente a produtividade.

3.5 Análise de Resultados

De forma a ser possível avaliar o impacto das diferentes alterações introduzidas no modelo, foram testados vários cenários, sendo executadas diversas simulações independentes para cada cenário. A variável de desempenho analisada corresponde à quantidade total produzida durante o período temporal definido para a simulação, que, neste caso, foram 8 horas (um dia de trabalho). A realização de múltiplas replicações permitiu reduzir o impacto da variabilidade do sistema, uma vez que diversos elementos do modelo apresentam comportamento relativamente incerto, nomeadamente os níveis de fadiga, motivação e a ocorrência das pausas das operadoras, que por sua vez, tornam os tempos de processamento variáveis. Os cenários analisados têm como objetivo representar algumas diferentes estratégias de melhoria do sistema produtivo, incidindo principalmente sobre fatores humanos, organização do fluxo produtivo e aumento da capacidade de operação.

Na tabela 3.8 são apresentados os valores da produção obtidos, em média, da produção no período de um dia (8 horas) em cada cenário estudado.

Cenário	Produção Média Diária
1	558
2	686
3	561
4	615
5	570
6	656

Tabela 3.8: Produção média diária de cada cenário

Analisando os resultados, de uma forma global, verifica-se que os cenários relacionados com reorganização do fluxo e aumento da capacidade operacional apresentaram as melhores melhorias no desempenho. Em particular, o cenário da operadora dedicada ao posto 7 revelou um dos maiores aumentos de produção, mostrando o impacto significativo que retirar esperas e interrupções pode ter na eficiência global da linha. Os cenários ligados aos fatores humanos, como a experiência, a motivação e as pausas, apresentaram melhorias relevantes, mas mais moderadas. Estes resultados demonstram que o desempenho da linha depende não só da capacidade técnica do sistema, mas também das características comportamentais e operacionais dos recursos.

Capítulo 4

Conclusões

4.1 Conclusões Finais

A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão baseado em simulação híbrida para análise e melhoria de uma linha de produção industrial. Para isto, desenvolveu-se um modelo de simulação recorrendo ao *software Anylogic*, integrando simultaneamente paradigmas de simulação discreta e simulação baseada em agentes. Primeiramente, foi desenvolvido um modelo representativo da linha de produção estudada, incluindo o fluxo produtivo e os diferentes postos de trabalho, mas também fatores humanos associados às operadoras, tais como experiência, fadiga, motivação e pausas efetuadas ao longo do dia. A integração destes diferentes fatores permitiu obter uma representação mais realista do comportamento do sistema relativamente a abordagens puramente técnicas ou centradas apenas no fluxo dos materiais. O modelo desenvolvido incluiu uma análise do comportamento da linha de produção em diferentes condições, permitindo identificar gargalos, restrições de capacidade e oportunidades de melhoria. A validação do modelo demonstrou que este reproduzia de forma adequada o comportamento esperado do sistema, sendo então uma ferramenta credível para o apoio à análise que era pretendida. Através da análise de vários cenários diferentes, foi possível avaliar o impacto de diferentes estratégias de melhoria no desempenho global da linha. Os resultados mostraram que alterações relacionadas com a organização do fluxo produtivo, gestão de recursos humanos e aumento de capacidade podem produzir melhorias significativas na produtividade. Entre todos os cenários analisados,

verificou-se que a reorganização do funcionamento do posto 7, através da introdução de uma nova operadora dedicada, originou uma melhoria muito significativa da produção. Este resultado indicou um forte impacto da continuidade do fluxo produtivo e da organização dos recursos no desempenho do sistema. A duplicação do posto identificado como gargalo demonstrou igualmente resultados positivos, reduzindo filas e aumentando a capacidade produtiva da linha. Observou-se, no entanto, que a redução de um gargalo pode originar o aparecimento de novas restrições noutros pontos do sistema, o que mostrou a natureza dinâmica dos sistemas produtivos. Os cenários relacionados com fatores humanos, nomeadamente experiência, motivação, fadiga e políticas de pausas, permitiram concluir que o desempenho depende significativamente das condições de trabalho e do comportamento das operadoras. Em particular, verificou-se que níveis mais elevados de motivação e experiência contribuem para melhorias consistentes na produtividade, enquanto políticas de pausas mais equilibradas permitem limitar os efeitos negativos da fadiga. De forma global, o trabalho desenvolvido demonstrou a relevância da simulação híbrida como ferramenta de apoio à decisão em contexto industrial. A possibilidade de testar diferentes cenários sem ter de intervir diretamente no sistema real é uma vantagem significativa, permitindo reduzir custos, minimizar riscos operacionais e apoiar a tomada de decisão de forma mais fundamentada. Assim, conclui-se que a integração de paradigmas de simulação é uma abordagem relevante para a análise de sistemas produtivos modernos, onde flexibilidade, eficiência e adaptação contínua têm cada vez mais importância. Assinala-se ainda que o presente trabalho desenvolvido deu já origem a um artigo científico que foi aceite e será apresentado na *International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference*.

4.2 Principais Dificuldades

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram encontradas várias dificuldades, principalmente ao nível da implementação do modelo de simulação. Uma das principais dificuldades esteve relacionada com a modelação híbrida do sistema, nomeadamente na integração entre a simulação de eventos discretos e a simulação baseada em agentes. A implementação dos fatores humanos constituiu também um desafio. Variáveis como fadiga e experiência possuem natureza dinâmica e tornam os comportamentos difíceis de representar de forma totalmente realista. Foi necessário definir mecanismos simplificados mas que fossem suficientemente representativos para simular a influência destes fatores no desempenho das operadoras. Outra dificuldade relevante esteve relacionada com a definição dos tempos de operação. Nem todos os dados reais estavam disponíveis em quantidade suficiente para permitir a utilização de distribuições estatísticas rigorosamente ajustadas. Então, foi necessário recorrer a distribuições triangulares baseadas em observações e medições realizadas

na fábrica, tentando representar de forma adequada a variabilidade existente nas operações do dia a dia. A implementação da lógica de transição da operadora entre o posto 6 e o posto 7 foi uma das tarefas que levou mais tempo de desenvolvimento. Apesar das dificuldades encontradas, elas contribuíram para que se aprofunda-se os conhecimentos na área da simulação de sistemas produtivos.

4.3 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, poderão ser exploradas várias melhorias e extensões ao modelo que foi desenvolvido, tentando aumentar o nível de realismo e expandir as capacidades do sistema de apoio à decisão. Uma das principais seria a integração do modelo com dados reais provenientes da linha de produção, permitindo uma atualização dinâmica dos parâmetros do sistema e aproximando o modelo do conceito de gémeo digital (*Digital Twin*). Esta integração iria acompanhar o comportamento do sistema em tempo real e apoiar decisões operacionais de forma contínua. Poderão também ser desenvolvidos modelos mais avançados de comportamento humano, incluindo fatores adicionais como aprendizagem dinâmica, níveis de stress, adaptação ao trabalho ou interação social entre operadoras. Ao nível da produção, seria interessante ter elementos adicionais no modelo, como falhas de equipamentos, manutenção preventiva e corretiva e variabilidade na procura. Em suma, o trabalho desenvolvido constitui uma base sólida para futuras evoluções e mostra o potencial da simulação híbrida como ferramenta de análise, melhoria e apoio à decisão em sistemas industriais.

Referências

- [1] M. Jahangirian, S. Eldabi, A. Naseer, T. Young, and D. W. Stewart, “Simulation in manufacturing and business: A review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 203, no. 1, pp. 1–13, 2010. [Citado na página 1]
- [2] A. Negahban and J. S. Smith, “Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 241–261, 2014. [Citado nas páginas 1 e 6]
- [3] A. Borshchev and A. Filippov, “From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools,” *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, 2013. [Citado na página 1]
- [4] M. Helal, *A hybrid system dynamics-discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise*. University of Central Florida, 2008. [Citado nas páginas 2 e 12]
- [5] N. Mustafee, D. Reynolds, J. L. Darlington, and S. J. Brailsford, “Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review,” in *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1478–1492, 2017. [Citado nas páginas 2 e 9]
- [6] F. Coelho, C. Páscoa, R. Silva, T. Oliveira, A. Aguiar, and J. Vaisman, “Simulation-based decision support tool for in-house logistics,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 153, p. 107094, 2021. [Citado na página 5]
- [7] A. A. Tako and S. Robinson, “The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context,” *Decision support systems*, vol. 52, no. 4, pp. 802–815, 2012. [Citado na página 5]
- [8] R. Kumar and S. Shinde, “Simulation as decision support tool: A case study with data analysis, vsm and simulation applied to an eto system,” Master’s thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2019. [Citado na página 6]
- [9] S. Belil, N. Tchernev, and S. Kemmoé-Tchomté, “Simulation based optimization decision support tool for production planning,” in *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, pp. 1517–1522, 2019. [Citado na página 6]

-
- [10] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, 5th ed., 2019. [Citado na página 6]
- [11] Y. Lu, X. Xu, J. Xu, and L. Wang, “Smart manufacturing process and system automation – a critical review of the standards and envisioned scenarios,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 312–325, 2019. [Citado na página 6]
- [12] W. de Paula Ferreira, F. Armellini, and L. A. De Santa-Eulalia, “Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 149, p. 106868, 2020. [Citado na página 7]
- [13] M. M. Gunal, “Simulation for industry 4.0,” *Past, Present, and Future. Springer*, vol. 3, 2019. [Citado na página 7]
- [14] B. Rodič, “Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm,” *Organizacija*, vol. 50, no. 3, p. 193, 2017. [Citado na página 7]
- [15] B. Gajsek, J. Marolt, B. Rupnik, T. Lerher, and M. Sternad, “Using maturity model and discrete-event simulation for industry 4.0 implementation,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 18, no. 3, pp. 488–499, 2019. [Citado na página 7]
- [16] J. Banks, J. S. C. II, B. L. Nelson, and D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, 5th ed., 2010. [Citado na página 7]
- [17] J. Banks, J. S. C. II, B. L. Nelson, and D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*. Pearson Prentice Hall, 2005. [Citado na página 7]
- [18] M. R. CIAUŞU-SLIWA, D. CIAUŞU-SLIWA, and O. DODUN, “Discrete-event simulation for smart manufacturing: Assessing software, industry adoption, and future research challenges,” 2025. [Citado na página 8]
- [19] D. Goldsman and P. Goldsman, “Discrete-event simulation,” in *Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle: Core Concepts and Accompanying Lectures*, pp. 103–109, Springer, 2015. [Citado na página 8]
- [20] C. M. Macal and M. J. North, “Agent-based modeling and simulation,” in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, pp. 87–98, 2009. [Citado na página 8]
- [21] T. Pulikottil, L. A. Estrada-Jimenez, H. Ur Rehman, F. Mo, S. Nikghadam-Hojjati, and J. Barata, “Agent-based manufacturing—review and expert evaluation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, no. 5, pp. 2151–2180, 2023. [Citado na página 8]

-
- [22] P. O. Siebers, C. M. Macal, J. Garnett, D. Buxton, and M. Pidd, “Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!,” *Journal of Simulation*, vol. 4, p. 204–210, 2010. [Citado na página 8]
- [23] D. A. d. Matos, *Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da Dinâmica de Sistemas*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2012. [Citado na página 8]
- [24] E. R. d. Santos, “Guia para iniciantes na aplicação da técnica de dinâmica de sistemas,” 2019. [Citado na página 9]
- [25] L. C. Felício, “Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta,” 2007. [Citado na página 9]
- [26] A. Ahmed, J. Greensmith, and U. Aickelin, “Variance in system dynamics and agent based modelling using the sir model of infectious disease,” *arXiv preprint arXiv:1307.2001*, 2013. [Citado na página 9]
- [27] S. C. Brailsford, T. Eldabi, M. Kunc, N. Mustafee, and A. F. Osorio, “Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 278, no. 3, pp. 721–737, 2019. [Citado nas páginas 9 e 11]
- [28] A. Greasley, “Hybrid simulation design and implementation,” in *34th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2022*, p. 019, 2022. [Citado nas páginas 9 e 11]
- [29] S. Howick, I. Megiddo, *et al.*, “A hybrid simulation modelling framework for combining system dynamics and agent-based models,” in *Operational Research Society Simulation Workshop 2020*, 2020. [Citado na página 10]
- [30] G. D’Ambrosio and S. Luke, “Hybrid agent-based and discrete event simulation in mason.,” in *ANNSIM*, pp. 84–94, 2023. [Citado na página 10]
- [31] D. Antonelli, P. Litwin, and D. Stadnicka, “Multiple system dynamics and discrete event simulation for manufacturing system performance evaluation,” *Procedia CIRP*, vol. 78, pp. 178–183, 2018. [Citado na página 11]
- [32] M. M. Fauadi, A. M. Damanhuri, S. Yahaya, A. M. Noor, and X. Hao, “Agent-based discrete event simulation–system dynamics approach to optimize manufacturing system with maintenance activities,” *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, vol. 16, no. 2, 2022. [Citado na página 11]
- [33] O. Oleghe and K. Salonitis, “Application of hybrid simulation modelling for the implementation of job rotation in a feedmill,” in *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1394–1405, IEEE, 2018. [Citado na página 12]

- [34] Y. M. Goh and M. J. A. Ali, “A hybrid simulation approach for integrating safety behavior into construction planning: An earthmoving case study,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 93, pp. 310–318, 2016. [Citado na página 12]
- [35] C. Barbosa, C. Malarranha, A. Azevedo, A. Carvalho, and A. Barbosa-Póvoa, “A hybrid simulation approach applied in sustainability performance assessment in make-to-order supply chains: The case of a commercial aircraft manufacturer,” *Journal of Simulation*, vol. 17, no. 1, pp. 32–57, 2023. [Citado na página 12]
- [36] S. McConville, S. Niranjana, A. Narayanan, and J. Murray, “A hybrid simulation of product reconditioning: A case study,” in *2023 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1316–1326, IEEE, 2023. [Citado na página 13]
- [37] M. Wasesa, T. Hidayat, D. T. Andariesta, M. G. Natha, A. K. Attazahri, M. A. Afrianto, M. Z. Mubarak, Z. Zulhan, and U. S. Putro, “Economic and environmental assessments of an integrated lithium-ion battery waste recycling supply chain: A hybrid simulation approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, p. 134625, 2022. [Citado na página 13]
- [38] M. Farsi, J. A. Erkoyuncu, D. Steenstra, and R. Roy, “A modular hybrid simulation framework for complex manufacturing system design,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 94, pp. 14–30, 2019. [Citado na página 13]
- [39] J. Viana, T. B. Simonsen, F. A. Dahl, and K. Flo, “A hybrid discrete event agent based overdue pregnancy outpatient clinic simulation model,” in *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1488–1499, IEEE, 2018. [Citado na página 14]
- [40] M. C. Camur, A. E. Thanos, W. Yund, C.-Y. Tseng, C. C. White, and E. Iakovou, “An integrated system dynamics and discrete event supply chain simulation framework for supply chain resilience with non-stationary pandemic demand,” in *2023 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1617–1628, IEEE, 2023. [Citado na página 14]
- [41] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, “Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020. [Citado na página 14]
- [42] L. Ismail, A. Abdelmoneim, A. Basu, A. D. E. Berini, and M. Naouss, “A systematic review of digital twin-driven predictive maintenance in industrial engineering: Taxonomy, architectural elements, and future research directions,” *arXiv preprint*, 2025. arXiv:2509.24443. [Citado na página 15]

-
- [43] P. Radanliev, D. De Roure, R. Nicolescu, *et al.*, “Digital twins: artificial intelligence and the iot cyber-physical systems in industry 4.0,” *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 6, pp. 171–185, 2022. [Citado na página 15]
- [44] A. de Norman, “Digital twin na indústria: evolução, abrangência e potencial,” 2023. Acedido em: 07 dezembro 2025. [Citado na página 15]
- [45] K. Iranshahi, J. Brun, T. Arnold, T. Sergi, and U. C. Müller, “Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields,” *Intelligent Systems with Applications*, p. 200516, 2025. [Citado na página 15]
- [46] D. Alfaro-Viquez, M. Zamora-Hernandez, M. Fernandez-Vega, J. Garcia-Rodriguez, and J. Azorin-Lopez, “A comprehensive review of ai-based digital twin applications in manufacturing: Integration across operator, product, and process dimensions,” *Electronics*, vol. 14, no. 4, p. 646, 2025. [Citado na página 15]
- [47] A. Saitoh, T. Yokono, M. Sakagami, M. Kashiwa, H. M. Abeywickrama, and M. Uchiyama, “Perspectives of nursing students on hybrid simulation-based learning clinical experience: A text-mining analysis,” *Nursing Reports*, vol. 14, no. 2, pp. 988–999, 2024. [Citado na página 15]
- [48] S. M. M. Sajadieh and S. D. Noh, “From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, pp. 1–32, 2025. [Citado na página 15]
- [49] K. Wang, Y. Tang, T. Q. Duong, S. R. Khosravirad, O. A. Dobre, and G. K. Karagiannidis, “Multi-tier computing-enabled digital twin in 6g networks,” *arXiv preprint arXiv:2312.16999*, 2023. [Citado na página 15]
- [50] Elsevier B.V., “Scopus database,” 2025. [Citado nas páginas vii, 17, 18, 19 e 20]