

INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DOS TRANSPORTES ? SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO

RAÚL ANTÓNIO DA SILVA SOARES

outubro de 2021

INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DOS TRANSPORTES – SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO

Raul António da Silva Soares

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DOS TRANSPORTES - SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO

Raul António da Silva Soares

Estudante n.º 1180172

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Professor Doutor Luís Pinto Ferreira.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Terminado este trabalho enquadrado com o Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, possível com um grande esforço, dedicação e entusiasmo, resta-me refletir e agradecer a todos aqueles que contribuíram, direta e indiretamente, para que este percurso pudesse ser concluído.

Ao Professor Doutor Luís Pinto Ferreira do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela sua disponibilidade, envolvimento e constante estímulo para fazer o meu melhor.

Ao Professor Doutor Juan Martin Garcia da Universidade Politécnica da Catalunha Barcelona, Espanha pela sua pronta disponibilidade para esclarecer questões técnicas relacionadas com o software utilizado e à Dra. Jéssica Sá pela sua disponibilidade e partilha de conhecimentos sobre a ferramenta.

Um agradecimento especial aos meus filhos Matilde e Vicente, por todo carinho e inevitável tolerância à minha ausência ao longo deste percurso académico.

página propositadamente em branco

RESUMO

Os últimos anos foram marcados por alguns eventos adversos a nível global, como ataques terroristas, desastres naturais, recessões económicas e a atual crise pandémica. Estes eventos refletem um ambiente global em constante mudança, gerando incerteza e vulnerabilidade na gestão das cadeias de abastecimento e dos transportes em concreto.

No sector dos transportes rodoviários em Portugal, além de existirem problemas em termos estruturais que afetam a sua atividade no geral, têm ocorrido grandes mudanças num curto intervalo de tempo, numa economia em mudança em que as oportunidades económicas estão cada vez mais relacionadas com novas formas de mobilidade de pessoas, de bens e particularmente da informação. Nesta era do digital, em que a indústria 4.0 está a revolucionar e revigorar todas as operações dos transportes, é importante perceber as vantagens oferecidas pela quarta revolução de forma a mudar comportamentos e aproveitar oportunidades.

Neste contexto, a presente dissertação apresenta como objetivo, compreender de que forma a Indústria 4.0 e as suas tecnologias de atuação, mais concretamente a simulação, pode servir de suporte na gestão mais eficiente das empresas que operam no setor dos transportes. Com este propósito, foi construída uma ferramenta de apoio à decisão baseada na Dinâmica de Sistemas (DS), que aborda os principais fatores que influenciam a atividade dos transportes para auxiliar os gestores na tomada de decisões, tendo por base os fluxos de carga através da comparação de vários cenários.

Na construção da ferramenta, recorreu-se a informação disponibilizada pela base de dados de uma empresa do setor, com considerável crescimento e larga experiência na atividade e, a informações legais relacionadas com o setor dos transportes.

Assim com a presente dissertação, pretende-se que a utilização da simulação suportada no software *Vensim*, possibilite ao utilizador de testar, analisar e prever os fluxos de carga face a cenários de atividade em função das variáveis que pretenda analisar, antecipar necessidades de recursos para cumprir com o serviço de entregas e tomar decisões sobre os custos da distribuição e o preço do serviço fornecido.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0, Transportes 4.0, Setor de transportes, Dinâmica de Sistemas, *Vensim*.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The last few years have been marked by some adverse events at the global level, such as terrorist attacks, natural disasters, economics recessions and the current pandemic crisis. These events reflect an ever-changing global environment, generating uncertainty and vulnerability in the supply chains management and transport.

In the road transport sector in Portugal, in addition to structural problems that affect its activity in general, there have been major changes in a short period of time, in a changing economy in which economic opportunities are increasingly related to new forms of mobility of people, goods and particularly information. In this digital age, where industry 4.0 is revolutionizing and reinvigorating all transport operations, it is important to understand the advantages offered by the fourth revolution to change behavior and seize opportunities.

In this context, this dissertation aims to understand how Industry 4.0 and its operating technologies, specifically simulation, can support the more efficient management of companies operating in the transport sector. With this purpose, a decision support tool based on System Dynamics (SD) was built, which addresses the main factors influencing transport activity to assist managers in decision making based on cargo flows through comparison of various scenarios.

In building the tool, we used information provided by the database of a company in the sector, with considerable growth and extensive experience in the activity and legal information related to the transport sector.

Thus, with this dissertation, it is intended that the use of simulation supported in the Vensim software, enables the user to test, analyze and predict the load flows against activity scenarios depending on the variables that they intend to analyze, anticipate resource needs to comply with the delivery service and make decisions about distribution costs and the price of the service provided.

KEYWORDS: Industry 4.0, Transport 4.0, Transport sector, System Dynamics, Vensim.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XV
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Enquadramento e pertinência	17
1.2. Questão e objetivos de investigação.....	17
1.3. Opções metodológicas	18
1.4. Apresentação da empresa.....	19
1.5. Estrutura do trabalho	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. O Setor de transporte de mercadorias.....	22
2.1.1. Enquadramento do Setor.....	22
2.1.2. O Transporte rodoviário de mercadorias.....	22
2.1.3. O transporte de carga por grupagem (consolidação)	24
2.1.4. Tendências do transporte de mercadorias	25
2.2. O setor do transporte em Portugal	26
2.3. A Indústria 4.0	29
2.3.1. A origem da Indústria 4.0.....	29
2.3.2. O conceito da Indústria 4.0.....	31
2.3.3. As Tecnologias da Indústria 4.0.....	32
2.3.4. Os impactos da Indústria 4.0.....	36
2.4. Indústria 4.0 nos Transportes.....	39
2.5. A Simulação na Indústria 4.0 como ferramenta de apoio à decisão.....	43
2.5.1. Dinâmica de Sistemas	44
2.5.2. Modelos de Simulação	46
3. SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO DESENVOLVIDO.....	50
3.1. Introdução Geral	50
3.2. Métodos utilizados.....	51
3.3. Sistema de apoio à decisão desenvolvido.....	52
3.3.1. Os principais problemas do setor dos transportes	52
3.3.2. Fator de carga e o peso taxável no transporte rodoviário.....	53
3.3.3. Fatores de custo do Transporte Rodoviário de Carga.....	53
3.3.4. Modelo Conceptual.....	56
3.3.5. As variáveis do modelo	58
3.3.6. Diagrama Stock-Flow	64
3.4. Validação do modelo com sistema real	68
3.5. Outputs do sistema de apoio à decisão	73

3.6. Análise e comparação de cenários	80
4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	85
4.1. Trabalho realizado	85
4.2. Contributos técnicos e científicos	86
4.3. Dificuldades encontradas	86
4.4. Limitações do modelo e investigação futura	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
APÊNDICE A - Tabela com valores reais de 2019 e valores simulados no modelo	100
APÊNDICE B - Tabela com valores reais de 2020 e valores simulados no modelo	101
APÊNDICE C - Tabela com valores reais de 2021 e valores simulados no modelo	102
ANEXO A – Valores de 2021 retirados da base de dados da empresa (caso real)	103

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do desenvolvimento da dissertação.....	21
Figura 2 - Estrutura por segmento atividade económica (2017) Fonte: Banco de Portugal, (2017)	26
Figura 3 - Mercadorias transportadas, por modo de transporte, Fonte: INE, 2019	27
Figura 4 - As transformações digitais entre as quatro Revoluções Industriais.	30
Figura 5 - Ciclo Physical-to-Digital-to-Physical e tecnologias relacionadas.	31
Figura 6 - Tecnologias inerentes à Indústria 4.0. Fonte: adaptado de Rüßmann et al. (2015).....	33
Figura 7 - Da Supply Chain tradicional para uma Digital Supply Network. Fonte: Adaptado de Laaper et al. (2017)	37
Figura 8 - Posição de Portugal no i4.0 Scoreboard em 2017. Fonte: KPMG Portugal (2019)	38
Figura 9 - Transformação do sistema logístico. Fonte: adaptado de Maslarić et al. (2016)	40
Figura 10 - Indústria 4.0 - Conceptual framework. Fonte: (Ferreira et al., 2020).....	42
Figura 11 - Exemplo de CLD com dois loops: positivo e negativo. Fonte (Shepherd, 2014).....	44
Figura 12 - Metáfora Hidráulica dos stocks e fluxos. Fonte (Shepherd, 2014)	45
Figura 13 - Fluxograma da metodologia do trabalho. Fonte própria.....	51
Figura 14 - Classificação geral dos custos de transporte rodoviário. Fonte: adaptado de (Jacyna & Wasiak, 2015).....	55
Figura 15 - Fluxograma da construção do modelo baseado em dinâmica de sistemas.....	56
Figura 16 - Diagrama de Loop Casual.....	57
Figura 17 - Submodelo da carga semanal e da capacidade de distribuição	65
Figura 18 - Submodelo para simulação de carga diária	65
Figura 19 - Submodelo representativo dos custos de distribuição com viaturas próprias.....	66
Figura 20 - Submodelo representativo dos custos operacionais	66
Figura 21 - Diagrama de Stock-flow	67
Figura 22 - Gráfico do Peso real da carga (t) de 2019 e dos valores simulados pelo modelo	69
Figura 23 - Gráfico da carga real (stops) de 2019 e dos valores simulados pelo modelo.....	69
Figura 24 - Gráfico de subcontratados (trucks) em 2019 e dos valores simulados pelo modelo	69
Figura 25 - Gráfico do Peso real da carga (ton) de 2020 e dos valores simulados pelo modelo	71
Figura 26 - Gráfico da carga real (stops) de 2020 e dos valores simulados pelo modelo.....	71
Figura 27 - Gráfico de subcontratados (trucks) em 2020 e dos valores simulados pelo modelo	71
Figura 28 - Custo da distribuição por tonelada de carga em 2020	72
Figura 29 - Gráfico do Peso real da carga (ton) de 2021 e dos valores simulados pelo modelo	72
Figura 30 - Parametrização do modelo	74
Figura 31 - Gráficos dinâmicos do modelo.....	75
Figura 32 - Gráficos disponibilizados pelo modelo	76
Figura 33 - Exemplo de uma simulação com gráficos dos resultados.....	77
Figura 34 - Causes Tree das variáveis Crossdocking cost e Distribution cost.....	77
Figura 35 - Causes Tree da variável Subcontracted trucks needs.....	78
Figura 36 - Uses Tree das variáveis Load forecast per week e Subcontracted trucks needs.....	78
Figura 37 - Exemplos de Causes strip disponibilizados pelo modelo	79
Figura 38 - Comparação de resultados do cenário 21 com o cenário 22.....	80
Figura 39 – Gráfico comparativo da subcontratação de camiões simulados nos cenários 21 e 22	80
Figura 40 – Gráficos comparativos dos valores da carga semanal simulados nos cenário 21 e 23.	81

Figura 41 - Tabelas dos valores de carga disponibilizadas pelo modelo para os cenários 21 e 23..	82
Figura 42 - Tabelas dos custos disponibilizadas pelo modelo para os cenários 21 e 23.....	82
Figura 43 - Gráficos comparativos dos custos do cenário 21 com o cenário 24.....	83
Figura 46 - Gráfico do custo da distribuição do cenário 21 comparado com o cenário 24	84

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados atuais da empresa S&V. Fonte (empresa)	20
Tabela 2 - Mercadorias transportadas por transporte rodoviário. Fonte: INE, 2019	27
Tabela 3 - Veículos rodoviários em circulação: total e por tipo de veículos. Fonte: INE, 2019	28
Tabela 4 - Exemplos da aplicação de simulação no setor dos transportes. Fonte própria.....	46
Tabela 5 - Tipo de custos fixos e variáveis no transporte rodoviário.....	55
Tabela 6 - Explicação das variáveis do modelo. Fonte própria	58
Tabela 7 - Detalhe do stock do modelo. Fonte própria	63
Tabela 8 - Tarifa portagens de acordo com a classe de veículo.....	63
Tabela 9 - Valores reais de carga registada em 2019 e valores simulados pelo modelo.....	68
Tabela 10 - Valores reais de carga registada em 2020 e valores simulados pelo modelo.....	70
Tabela 11 - Análise de comparação dos resultados do cenário 21 com o cenário 22	81
Tabela 12 - Análise de comparação dos resultados do cenários 21 com o cenário 23.....	83
Tabela 13 - Análise de comparação dos resultados do cenários 21 com o cenário 24.....	84

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P. Porto	Instituto Politécnico do Porto
CPS	Cyber Physical Systems
IoT	Internet das Coisas
IoS	Internet dos Serviços
IoE	<i>Internet of Everything</i>
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TI	Tecnologias de Informação
JIT	Just-In-Time
INE	Instituto Nacional de Estatística
ANTRAM	Associação Nacional dos Transportes Mercadorias
RFID	Identificação por radiofrequência
DS	Dinâmica de Sistemas
GSM	Global System for Mobile Communications;
TPL	<i>third party logistics</i>

Lista de Símbolos

m	massa	kg
v	volume	m^3
Km	quilómetros	Km
€	moeda	€

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

O presente documento foi desenvolvido no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial e descreve o projeto de dissertação realizado no sector dos transportes. O primeiro capítulo é integralmente dedicado à introdução do tema em investigação, onde será explanado o enquadramento do tema proposto e a pertinência do seu estudo, depois será referida a questão e os objetivos de investigação, prosseguindo uma abordagem da metodologia seguida ao longo da investigação e, por fim, indicação sobre a estrutura do trabalho.

1.1. Enquadramento e pertinência

Todos os setores económicos, de forma direta ou indireta estarão dependentes da operacionalidade e eficiência conseguidas pelo setor dos transportes. O recurso às técnicas e tecnologias integradas pela indústria 4.0, como: *Big Data*, RFID, robótica, sensores, digitalização e partilha de dados conectados através da internet incorporados no transporte, torna possível a partilha de informação e promove a produção de forma sustentável e inteligente (Jabbour et al., 2018), também o uso da digitalização pode promover a sustentabilidade (Wang et al., 2016). Adicionalmente, os algoritmos podem auxiliar na tomada de decisões ao identificar e sugerir o tipo de transporte mais adequado tendo em consideração o tempo, pontos de partida e destino, tipo de carga, quantidade, entre outros fatores tal como a capacidade de responder a eventos imprevistos, alterações no tráfego e rotas (Li et al., 2014; Stock & Seliger, 2016). As empresas precisam de soluções para se manterem lucrativas e competitivas, para isso, são necessárias ferramentas para ajudar na tomada de decisões (Santos et al., 2019).

O setor dos transportes enfrenta mudanças rápidas incitadas, quer pelos progressos tecnológicos, quer pela necessidade de adaptação continua para fazer face a imprevistos, tendências do mercado motivadas pelo crescimento do e-commerce, sazonalidade no consumo e a crescente distribuição em zonas urbanas. Face a estas imprevisibilidades, tendências e constante inovação tecnológica que obrigam a ajustes dinâmicos nas estruturas operacionais das redes de distribuição, os operadores de transportes são confrontados com o grave problema de recursos desajustados (por falta, excesso ou desadequados) às necessidades reais da atividade de forma a garantirem a qualidade e fiabilidade do serviço a custos controlados, pondo em risco a sustentabilidade do negócio.

1.2. Questão e objetivos de investigação

Considerando o problema de investigação apresentado, e a solução que para ele se preconiza, enuncia-se a seguinte questão de investigação:

De que forma, as ferramentas baseadas em dinâmica de sistemas, integrado com tecnologias suportadas na IoT, podem apoiar os operadores de transporte, no planeamento atempado de recursos, de forma a garantir a qualidade do serviço com os custos controlados?

Para responder à questão de investigação, define-se o seguinte objetivo geral:

Simular e testar um modelo de apoio à decisão recorrendo à dinâmica de sistemas que através da modelagem das interações dos fatores (dados históricos, económicos, indicadores e partilha de

dados), permita auxiliar os gestores de transportes a definir estratégias de atuação e a dar resposta à variação dos fatores que influenciam a distribuição.

Para a concretização do objetivo geral, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Desenvolver e testar um modelo suportado no software *Vensim*¹, que tendo por base fatores como dados históricos, crescimento expectável e sazonalidade da atividade, possibilite fazer simulações de carga semanal ao longo do ano em estudo;
- ii. A ferramenta deve permitir simular a necessidade de recursos (camiões) para cumprir com a entrega da carga semanal e apoiar na decisão sobre a quantidade mais vantajosa de viaturas por frota própria e por subcontratação;
- iii. O modelo deve estimar o custo de entrega por tonelada de carga, para cada cenário a analisar;
- iv. A ferramenta deve ser flexível, capaz de se adaptar à realidade de cada empresa e permitir incorporar novos fatores;
- v. Validar o modelo através da comparação dos seus resultados com os valores reais de um caso prático de uma empresa do setor.

1.3. Opções metodológicas

A metodologia adotada na elaboração de um processo de investigação, constitui o caminho para o desenvolvimento e concretização dos seus objetivos. A presente dissertação adota uma estrutura exploratória, na medida que pretende compreender a natureza do fenómeno em estudo, nomeadamente os fatores que interferem com o transporte, avaliando o seu estado sobre uma nova perspetiva (Saunders et al., 2019). Ainda segundo Yin (2003), o estudo de caso aplicado a este projeto será o estudo exploratório, atendendo que se trata de assuntos pouco explorados, tendo por objetivo definir hipóteses ou propostas para futuras investigações.

O presente projeto recorre ao estudo de um caso prático, de forma a investigar um problema dentro do seu próprio contexto. Tendo como objetivo estudar os impactos da Indústria 4.0 e da simulação nos transportes de mercadorias, face à pouca informação sobre o assunto dentro do setor dos transportes em Portugal, optou-se pelo estudo de um caso prático que segundo Yin (2003) é a estratégia adequada para o investigador quando o foco do seu trabalho, é um assunto contemporâneo inserido em um contexto real, ainda de acordo com o mesmo autor, o uso de um caso de estudo enquadrado com o tema em investigação, é fundamental quando se pretende tomar decisões com uma base sustentada.

Esta dissertação é uma investigação qualitativa, uma vez que a questão de investigação de base deste trabalho aborda um problema de certa forma emergente que requer a obtenção de dados recolhidos em contextos reais (Creswell, 2017).

De acordo com Quivy e Campenhoudt (1998), tendo como base a questão de partida, inicialmente foi desenvolvida uma pesquisa de diferentes referências bibliográficas já publicadas que incluísse todo o tipo de informação sobre o tema Indústria 4.0, simulação baseado em dinâmica de sistemas

¹ software de simulação desenvolvido pela *Ventana Systems*, oferece suporte principalmente à simulação contínua (dinâmica de sistemas).

(DS), bem como a outros materiais relacionados com transportes rodoviário de mercadorias, de modo a reunir informação necessária para desenvolver a dissertação.

Ao longo dos trabalhos de pesquisa, foram selecionados e analisados diversos materiais de onde se realizaram resumos de diferentes obras e artigos por forma a serem enquadrados e utilizados na dissertação final, tendo em consideração o tema e a questão de partida com especial foco no tema central, a Indústria 4.0 e um dos seus pilares - a simulação baseado na DS, aplicados ao transporte.

Com a implementação do projeto de simulação baseado na DS, a recolha e compilação de dados será efetuada com observação participante atendendo que o investigador participa diretamente no projeto.

A metodologia aplicada ao longo da dissertação vai seguir as seguintes fases:

- Análise e revisão bibliográfica para enquadramento do sector do transporte rodoviário de mercadorias em Portugal;
- Análise e revisão bibliográfica sobre o tema Indústria 4.0 (i4.0), a sua importância e aplicação ao sector do transporte e o recurso a uma das suas tecnologias – a simulação, como ferramenta de apoio à decisão com exemplos de trabalhos já efetuados e publicados;
- Desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão com recurso à DS suportado no software *Vensim*;
- Validação do modelo desenvolvido com o sistema real;
- Outputs do modelo, análise e comparação de cenários simulados;
- Conclusões e propostas de trabalhos futuros.

1.4. Apresentação da empresa

A presente dissertação assenta no desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão para os gestores das empresas de transportes de mercadorias. Porém, o modelo carece de validação e para isso, é necessário testar a conformidade entre o comportamento do modelo e o sistema do mundo real que está a ser modelado (Finlay, 1989, citado por Borenstein, 1998). Como suporte para a definição dos fatores que interferem com o setor dos transportes, definição das variáveis e suas interações, recorreu-se ao conhecimento, experiência e a dados reais da empresa designada por “SV”, informações fundamentais para o desenvolvimento, teste e validação do modelo.

A SV iniciou a sua atividade em 1982 com a missão de: “analisar e oferecer as melhores soluções logísticas aos seus clientes”. Atua nas áreas da Logística e Serviço de Transporte em todo território Nacional, dispõe de uma rede própria com mais de 500 viaturas e 800 colaboradores distribuídos por 18 Plataformas Logísticas em todo País, as quais, coordenam mais de 7.500 entregas (stops) diariamente. Com um modelo operacional eficiente, soluções inovadoras e com elevados níveis de serviço, a SV é atualmente um dos principais operadores de Serviços de Transporte em Portugal.

A tabela 1 apresenta informação e dados de atividade referentes ao ano 2020.

Tabela 1 - Dados atuais da empresa S&V. Fonte (empresa)

Fundação	1982
Capital	100% português
Áreas de Negócio	Logística e Transporte
DADOS 2020:	
Recursos Humanos	823 trabalhadores
Frota	+ de 500 viaturas
Plataformas Logísticas	18
Área total de Armazém	57.600 m ²
Área Total	185.500 m ²
Entregas (stops)	7.500 / dia 1.700.000 / ano
Carga Movimentada	2.425 toneladas / dia 550.000 Toneladas / ano

A empresa é especializada em fazer entregas de pequenos e grandes volumes com peso até 1.200kg no retalho especializado e grandes superfícies, com o setor Agroalimentar a dominar a sua atividade (40%), seguindo o setor da Higiene e Limpeza (20%), Tecnologia e Eletrónica (18%), Construção (16%) e restantes setores (6%).

A satisfação dos clientes é o principal objetivo da empresa, o serviço prestado é resultante de um processo de padronização e melhoria contínua. Certificada pela Norma NP EN ISSO 9001 desde 1999, a empresa não só monitoriza constantemente o serviço que presta, como procura corresponder às necessidades e expectativas do cliente de forma a garantir um desempenho estável e confiável dos processos sempre com foco na inovação e na cultura de procurar novas formas de fazer, identificar oportunidades de melhoria nos processos de trabalho e redução dos desperdícios de tempo e recursos com o propósito de utilizar menos, gastar menos e poluir menos.

Em 2020, a empresa adotou uma aplicação móvel na sua frota para reduzir até 20% as emissões de CO₂. Através da monitorização, análise de dados em tempo real, a aplicação permite dar instruções aos motoristas no sentido de melhorarem a sua condução. Aliando esta condução preditiva com clara redução nos consumos ao programa de otimização das rotas, a empresa prossegue a sua política de sustentabilidade.

Com aposta em novas tecnologias de informação, a SV tem melhorado a comunicação com os colaboradores, parceiros e clientes. Os interfaces com os seus clientes permitem acesso e informação em tempo real sobre o estado da entrega das suas mercadorias. Todavia, as rápidas mudanças que o setor dos transportes tem vivido com o crescimento do comércio eletrónico e alterações no consumo, exigem decisões a curto e médio prazo suportadas em ferramentas que permitam fazer simulações de cenários possíveis. Sendo este problema transversal a todas as empresas do setor dos transportes, um dos objetivos desta dissertação, é desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão que possibilite auxiliar responsáveis de empresas de transporte a definir estratégias que melhor se enquadram com as suas atividades por forma a planear os recursos (viaturas e pessoas) necessários para garantir o cumprimento do serviço de entregas a custos controlados e, desta forma, salvaguardar a sustentabilidade do negócio.

1.5. Estrutura do trabalho

A dissertação será dividida em quatro capítulos a seguir resumidos.

No presente capítulo, Capítulo 1 dedicado à introdução, é feito o enquadramento geral do tema estudado, após o qual se definem os objetivos que se pretendem alcançar e a questão de investigação do trabalho, assim como são apresentadas a metodologia de elaboração da dissertação e a estrutura da mesma.

No Capítulo 2 é feita a revisão da literatura com uma abordagem aos conceitos mais importantes para suportar o trabalho desenvolvido nos capítulos seguintes, nomeadamente o enquadramento do setor dos transportes em Portugal, os princípios e o impacto da i4.0, o transporte 4.0 e finalmente o enquadramento da simulação como ferramenta de apoio à decisão.

No Capítulo 3 é feita uma breve revisão da literatura referente aos métodos existentes no âmbito dos modelos de simulação e descrito o caso de estudo sobre o qual será simulado o funcionamento de uma rede de transporte, fazendo-se a caracterização dos principais problemas que o setor enfrenta, assim como são identificados os principais fatores que influenciam o transporte, a qualidade do serviço e o custo do transporte. Posteriormente é feita uma explicação do modelo construído, baseado na DS sendo então analisados os resultados da simulação.

Finalmente, no Capítulo quatro são apresentadas as conclusões finais da elaboração da presente tese, bem como discutidos possíveis desenvolvimentos futuros.

No final, são apresentados os apêndices e anexos deste trabalho.

Complementam estes capítulos, o Resumo e *Abstract*, os índices e listas, bem como as Referências Bibliográficas, os apêndices e os anexos.

A elaboração da presente dissertação desenvolve-se em 4 etapas, como apresentado na Figura 1:

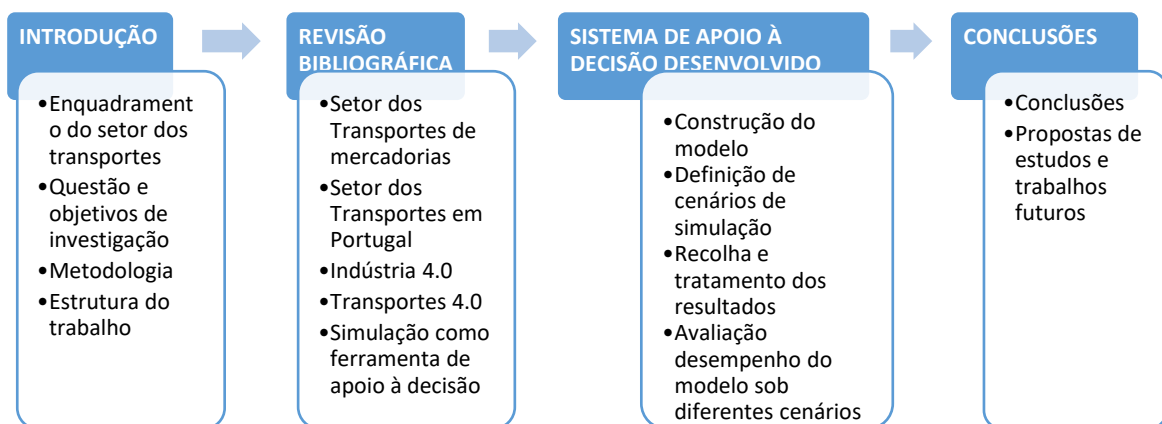


Figura 1 - Etapas do desenvolvimento da dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado à revisão da bibliografia, faz uma abordagem aos temas que suportam a base teórica ao desenvolvimento da ferramenta de apoio à decisão proposta. Inicialmente será feito um enquadramento histórico sobre o setor dos transportes mercadorias em Portugal e explanada a importância económica deste setor no seio da economia nacional. Neste capítulo serão também abordados conceitos relacionados com a i4.0 e os transportes e, na parte final, será analisada e desenvolvida a questão da simulação enquanto ferramenta de apoio à decisão, evidenciando casos em que a simulação foi útil para a resolução de problemas no setor de transportes.

2.1. O Setor de transporte de mercadorias

2.1.1. Enquadramento do Setor

A logística e o transporte de mercadorias são atualmente fatores-chave de vantagem competitiva, devido à inovação significativa verificada nas Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) cada vez mais inteligentes (Cimino et al., 2017).

O transporte de mercadorias representa atualmente um setor de atividade muito importante na sociedade, possibilita a ligação de mercados, liga a oferta de mercado com a procura, disponibiliza ao consumidor bens de várias origens com um fluxo constante dos produtos até ao consumidor final (Sadler, 2007). Desta forma, o transporte para além de ser uma parte indispensável da produção, acaba por também ser uma indústria que fornece um produto que é o serviço oferecido, nomeadamente o transporte de determinada carga desde a origem até ao destino envolvendo a sua própria produção e eficiência, consumo e gestão de recursos (Pleszko, 2012).

Este setor, além da importância que tem para as cadeias de abastecimento, é também crucial para as economias nacionais e globais, uma vez que faz circular as matérias-primas e produtos acabados desde o fabricante até ao consumidor/utilizador. Neste sentido, o sistema de transportes deve ser eficiente, seguro, flexível e sustentável em termos económicos, sociais e ambientais. Assim, o setor de transportes é um importante componente da economia, com impacto no desenvolvimento e bem-estar das populações. Quando os sistemas de transporte são eficientes, fornecem oportunidades económicas e sociais e benefícios para a economia. Quando os sistemas são deficientes, podem representar um custo económico em termos de oportunidades reduzidas ou perdas (Rodrigue et al., 2016).

2.1.2. O Transporte rodoviário de mercadorias

O transporte de mercadorias é um componente vital da economia. Apoia as atividades de produção, comércio e consumo, garantindo a movimentação eficiente e a disponibilidade oportuna de matérias-primas e produtos acabados (Crainic, 2000). Os tipos de transporte atualmente existentes, são essencialmente cinco: 1) ferroviário; 2) rodoviário; 3) hidroviário; 4) dutoviário; 5) aéreo. Cada um apresenta características mais adequadas em função das distâncias, pesos, dimensões das mercadoria e pela velocidade que transportam ou pelo custo mais baixo (Bowersox & Closs, 2007).

O transporte rodoviário é também o modo que mais expandiu nas últimas 5 décadas, é o mais utilizado tanto na União Europeia como em Portugal. É um modo que apresenta menores custos fixos, dado que o equipamento dos terminais, bem como o equipamento de transporte, não são dos mais dispendiosos. Porém, os custos variáveis são muito elevados, influenciados pelos custos dos combustíveis e da mão-de-obra e representam a maior parcela do custo do transporte rodoviário, sendo crucial obter economia de escala através do aumento da quantidade transportada ou da distância percorrida (Rodrigue et al., 2016).

A gestão de transporte e todas operações envolvidas, são influenciadas pelas economias de escala e de distância. A economia de escala é possível através da diluição dos custos de transporte (fixos) pelo peso da sua carga; a economia de distância é conseguida com a dissolução dos custos de transporte (fixos) pela distância percorrida (Bowersox & Closs, 2007).

Apesar da capacidade de carga dos veículos rodoviários ser limitada, é o modo de transporte mais competitivo em percursos de curta e média distância, sendo importante salientar que o transporte rodoviário é o único modo que possibilita um serviço transversal em toda a cadeia (desde a origem até ao consumidor final) detendo, portanto, uma grande flexibilidade nas suas operações e assim permitir acesso a pontos de entrega isolados (Rodrigue, 2006).

Existem diversas modalidades de redes de transporte, cada um com a sua especificidade na movimentação dos produtos. Chopra (2003) destaca seis tipos de redes de transportes:

- Armazenamento do fornecedor com entrega direta: o produto é enviado diretamente de uma origem para um ponto entrega.
- Armazenamento do fornecedor com entrega direta e consolidação em trânsito: combina partes do pedido provenientes de diferentes origens para o mesmo ponto de entrega.
- Armazenamento e entrega pelo transportador: nesta situação, o stock é feito por distribuidores em depósitos intermediários e os transportadores entregam o produto nos vários pontos.
- Armazenamento do distribuidor com entrega na última milha: o armazém do distribuidor deve estar mais perto do cliente final, aumentando o número de armazéns intermédios.
- Armazenamento do fabricante/distribuidor com levantamento do cliente: os pedidos são enviados do local de armazenamento para os pontos de recolha conforme necessário.
- Armazenamento nas Lojas comerciais com levantamento do cliente: nesta situação, o cliente levanta o produto num dos pontos de venda.

De acordo com Rodrigue et al. (2016), o transporte rodoviário é um elo crucial na distribuição de mercadorias na sequência do aumento da utilização dos contentores. Por outro lado, Allen et al. (2012) referem que os desenvolvimentos tecnológicos no transporte rodoviário de mercadorias permitiram que a distância de transporte rodoviário de mercadorias de e para as áreas urbanas (pontos de maior consumo), aumentasse substancialmente nas últimas décadas.

O transporte de carga consolidado resulta das mercadorias serem mantidas em Armazéns por períodos de tempo cada vez mais curtos e em algumas operações/atividades, não chegam a ser armazenados em Armazém, são simplesmente recolhidos, descarregados de veículos, classificados e separados por destino (triagem) e carregados imediatamente em outros veículos (operações de *crossdocking*) para posterior transporte para o cliente final (Bowen, 2008).

2.1.3. O transporte de carga por grupagem (consolidação)

O transporte de mercadorias é uma indústria grande e complexa. Os sistemas de transporte de carga são o conjunto de entidades: equipamentos, infraestrutura, operações, mão-de-obra; que participam na movimentação da carga. Alguns desses sistemas têm um local fixo, por exemplo, portos e ferrovias, enquanto outros, como as empresas de transporte rodoviário, não são operacionalmente restritos a uma área específica. Esses sistemas são subsistemas de sistemas maiores (Holguín-Veras & Sánchez-Díaz, 2016). A cooperação e a subcontratação têm captado grande atenção no transporte de cargas. Os prestadores de serviços logísticos estão cientes de que as economias de escala reduzem os custos e a consolidação de carga é considerada uma abordagem eficaz na redução dos custos de transporte (Zhou et al., 2011).

A consolidação de carga é uma combinação de muitas remessas pequenas de forma que uma carga maior e mais econômica possa ser expedida no mesmo veículo. Um veículo com espaço vazio significa um desperdício de capacidade de transporte (Çetinkaya & Lee, 2002). Também para Zhou et al. (2011) a consolidação de carga combina muitas remessas pequenas para que uma carga maior e, portanto, mais econômica, possa ser despachada no mesmo veículo.

Uma política de consolidação de carga bem calculada, contribui para a correta utilização de armazenamento, capacidade de transporte e de pessoal. Os princípios de despacho de veículos são: (i) a quantidade, segundo a qual um veículo é despachado quando a quantidade de carga acumulada atinge um limite pré-determinado; (ii) o tempo, segundo a qual um veículo é despachado quando chega o prazo de envio; e (iii) o tempo e quantidade, segundo a qual um veículo é despachado sempre que chega o prazo de entrega ou se atinge uma quantidade acumulada predeterminada para o transporte (Çetinkaya & Lee, 2002). O transporte de carga em consolidação são assim, sistemas de transporte onde o serviço não pode ser adaptado para cada cliente individualmente e um veículo geralmente transporta cargas de diferentes clientes com origens e destinos possivelmente diferentes. Neste sistema as transportadoras estabelecem rotas de serviço regulares e ajustam suas características para satisfazer as expectativas do maior número possível de clientes (Crainic, 2000).

Definir rotas adequadas é importante para as transportadoras distribuírem o custo variável pelos seus clientes, de forma a conseguir diferentes níveis de economia e cotar preços de frete competitivos. A receita total conseguida por uma transportadora é a soma dos preços cobrados de cada remessa transportada em determinado período de tempo. Da mesma forma, o custo total é a soma dos custos associados às rotas de entrega mais os custos fixos. O lucro total é definido pela diferença entre os dois (Mesa-Arango & Ukkusuri, 2013).

Um aspeto crucial de qualquer sistema de transporte de cargas, é a necessidade de movimentação de veículos vazios que ocorre devido aos desequilíbrios existentes nos fluxos comerciais que resultam em discrepâncias entre a oferta e a procura de veículos nos terminais do sistema. Para corrigir essas diferenças, os veículos precisam ser reposicionados por forma a estarem disponíveis para atender a procura do próximo pedido (Crainic, 2000).

O transporte de carga é um componente crucial das economias modernas; sem um fluxo eficiente e oportuno de abastecimentos, a vida moderna não seria possível. As crescentes preocupações sobre os impactos da atividade humana nas mudanças climáticas adicionam uma enorme pressão para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de transporte (Holguín-Veras & Sánchez-Díaz,

2016). Este foco no transporte faz todo sentido, já que o setor dos transportes continua a ser um dos sectores de atividade com maior consumo de energia em Portugal: 37,2% da energia total e 79% do petróleo, dados de 2017 (APA - agência portuguesa do ambiente, 2019).

2.1.4. Tendências do transporte de mercadorias

Os desafios para a indústria de transporte de carga resultam das grandes mudanças que afetam as cadeias de abastecimento e os processos logísticos no comércio. O primeiro fator é a forte tendência de seguir a redução de stocks que levou às práticas de aquisições *just-in-time* e, mais recentemente, também a reposições *just-in-time* de bens no setor comercial. A globalização e a liberalização dos mercados e a criação de zonas de livre comércio, constituem o segundo principal fator de mudança. A reestruturação dos canais de fabricação e distribuição em todo o mundo acompanhou a globalização da economia (Crainic et al., 2009). O transporte e as cadeias de abastecimento (*supply chain*), estão correlacionadas e apresentam tendências que os relacionam ainda mais. Speranza (2018) cita algumas das principais tendências da cadeia de abastecimento e do transporte:

- Otimização de toda a rede da cadeia de abastecimento;
- Partilha da informação para melhorar o desempenho;
- Flexibilidade para adaptação às constantes mudanças das condições do mercado;
- Veículos autónomos;
- Veículos elétricos;
- Informação de trânsito nos veículos com ligação à internet;
- Construção de veículos com novos materiais.

Nos últimos anos, as cadeias de abastecimento têm vindo a mudar e para muitos especialistas, continuarão a sofrer fortes mudanças nos próximos tempos. Closs et al. (2015) identificaram as tendências na cadeia de abastecimento (*supply chain*) com fortes influências nos transportes:

- Otimização de toda a rede *supply chain*. Criação de valor para o cliente.
- Síntese da informação: a informação é partilhada de forma holística. Sentido conjunto para melhorar o desempenho.
- Relações colaborativas: responsabilidade conjunta e recompensas, criação de valor do sistema.
- Modelagem da procura: influência proativa da procura.
- Condições em constante mudança;
- Integração de rede flexível: Seleção dinâmica de parceiros a montante e jusante;
- Otimização global.

O transporte representa assim, uma atividade-chave na economia global, satisfazendo a necessidade vital da sociedade na movimentação de pessoas e bens. É o transporte que fornece a estrutura para o comércio interno e externo eficaz, desenvolvimento de relações, transporte de

passageiros e carga. A digitalização na infraestrutura de transporte global foi colocada em foco há mais de uma década e estabeleceu-se na economia internacional. No entanto, no setor de transportes, alguns negócios os modelos não exigiam digitalização urgente. Até 2019, algumas indústrias conservadoras operaram em formatos tradicionais devido à baixa eficiência económica de tais investimentos.

A mobilidade sustentável nas zonas urbanas é um propósito da política europeia e da política nacional. O “Livro Branco dos Transportes – 2050”, estabelecido pela Comissão Europeia em 2011, propõe orientar a política de transportes em toda União Europeia (UE), no período 2010-2050 para tornar o sistema de transportes menos dependente dos combustíveis fósseis, sem comprometer a eficiência e a mobilidade de pessoas e bens. As metas apontadas no Livro Branco, para as áreas urbanas, são extremamente ambiciosas e implicam a redução para metade dos veículos ligeiros convencionais (com motores de combustão interna), no transporte urbano, até 2030, com o objetivo de, até 2050, esses veículos não circularem nas cidades.

2.2. O setor do transporte em Portugal

Os países da União Europeia praticam uma economia de mercado regulamentada, onde a concorrência constitui um elemento importante. No mercado global, as empresas competem entre si, os fornecedores de serviços de transporte de carga competem entre si no mercado de frete. Neste mercado competitivo Liu et al. (2010) sugerem a necessidade da diversidade de ofertas de serviços de logística para apoiar o processo de criação de valor.

Segundo os dados Banco de Portugal (2017), na análise das empresas do setor dos transportes em 2017, o setor representava 4% das empresas em Portugal (16 mil empresas), aproximadamente 4% do volume de negócios (12 mil milhões de euros) e 4% das pessoas ao serviço (113 mil pessoas). Os transportes terrestres representavam 98% das empresas, 88% das pessoas ao serviço e 59% do volume de negócios do setor. Os transportes terrestres de mercadorias representam um peso considerável ao reunirem 51% das empresas do setor, 49% do volume de negócios e 62% das pessoas ao serviço (Figura 2).

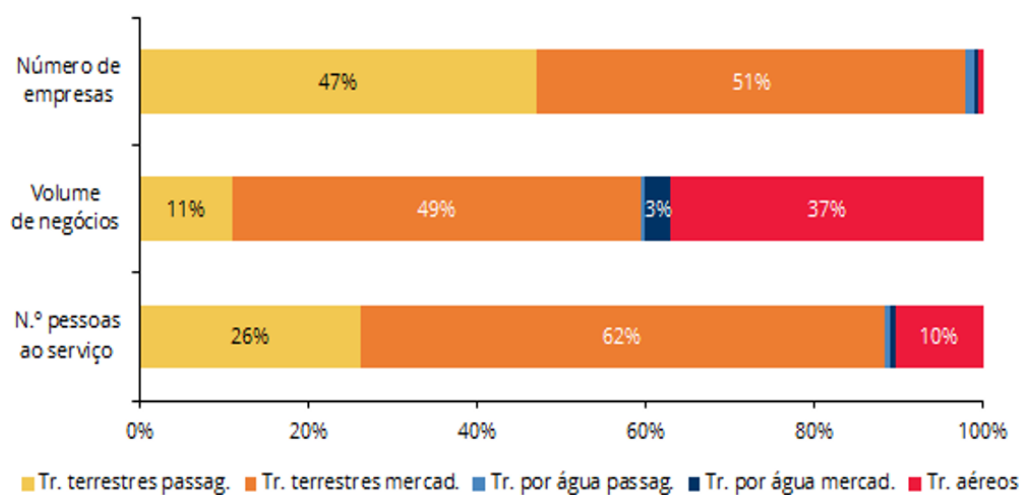


Figura 2 - Estrutura por segmento atividade económica (2017) Fonte: Banco de Portugal, (2017)

Ainda com base nos dados do Banco de Portugal, em 2017 As microempresas representavam 89% das empresas do setor de transportes, 15% do volume de negócios e 25% de pessoas a trabalho. As grandes empresas representavam 0,3% do setor, 42% do volume de negócios e 29% das pessoas; enquanto as pequenas e médias empresas eram pouco mais de 10% das empresas do setor, 43% do volume de negócios e 45% do pessoal.

De acordo com dados do INE (2019) o transporte de mercadorias em Portugal é dominada pelo transporte rodoviário (Figura 3).

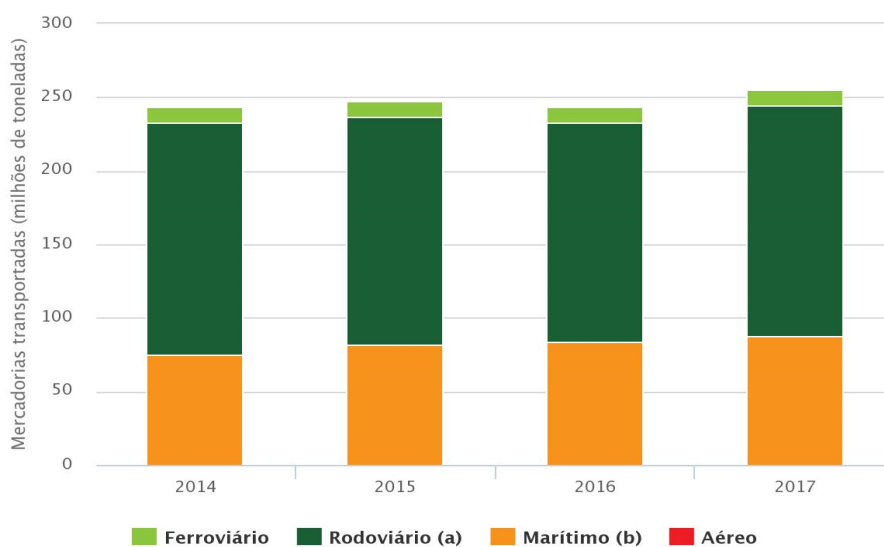
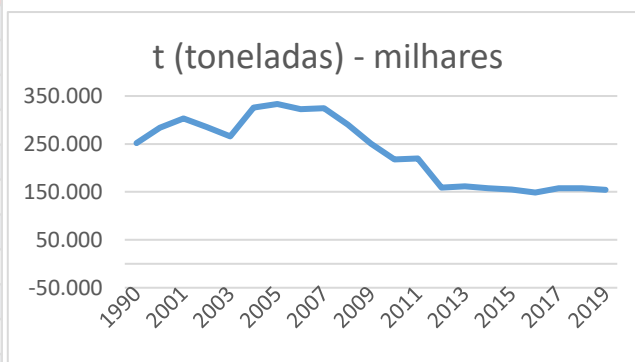


Figura 3 - Mercadorias transportadas, por modo de transporte, Fonte: INE, 2019

Dentro do setor dos transportes, o transporte rodoviário de mercadorias continua a dominar registando, em 2019, 154.4 milhões de toneladas de mercadorias transportadas, verificando-se uma desaceleração no ritmo de crescimento face ao ano anterior (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Mercadorias transportadas por transporte rodoviário. Fonte: INE, 2019

Anos	Mercadorias t (tonelada) - Milhares		
	Total	Nacional	Internacional
1990	251.741	248.531	3.210
2000	284.106	273.478	10.629
2010	217.915	196.699	21.216
2011	219.807	196.087	23.720
2012	158.958	138.376	20.583
2013	161.689	133.708	27.980
2014	157.903	130.322	27.581
2015	154.832	131.007	23.825
2016	148.626	122.779	25.847
2017	157.696	133.050	24.646
2018	157.826	132.933	24.893
2019	154.407	132.671	21.736



Na tabela 3, são contabilizados os veículos pelas categorias Ligeiros e Pesados em Portugal entre os anos 2010 e 2019 e as quantidades afetas ao transporte de mercadorias.

Tabela 3 - Veículos rodoviários em circulação: total e por tipo de veículos. Fonte: INE, 2019

Anos	Tipo veículos										
	TOTAL	Ligeiros				Pesados					
		Total	Passageiros	Mercadorias	Outros	Total	Passageiros	Mercadorias			Outros
							Total	Camiões	Tractores	Outros	
2010	6.182.051	6.049.831	4.692.000	1.337.373	20.458	132.220	15.425	106.893	65.236	41.657	9.902
2011	6.181.188	6.054.508	4.712.354	1.321.711	20.443	126.680	15.181	101.840	61.482	40.358	9.659
2012	5.556.041	5.450.699	4.258.746	1.172.906	19.047	105.342	12.358	84.980	50.971	34.009	8.004
2013	5.624.964	5.522.144	4.334.364	1.167.306	20.474	102.820	12.119	81.940	50.460	31.480	8.761
2014	6.095.506	5.982.096	4.699.645	1.259.725	22.726	113.410	14.941	88.874	51.562	37.312	9.595
2015	6.083.694	5.970.710	4.722.963	1.224.821	22.926	112.984	14.717	88.398	49.112	39.286	9.869
2016	6.208.350	6.095.470	4.850.229	1.221.913	23.328	112.880	14.850	88.561	47.386	41.175	9.469
2017	6.447.241	6.325.855	5.059.472	1.240.914	25.469	121.386	15.235	95.904	50.760	45.144	10.247
2018	6.705.331	6.576.883	5.282.970	1.267.647	26.266	128.448	15.493	102.033	51.908	50.125	10.922
2019	7.027.591	6.880.725	5.452.119	1.396.653	31.953	146.866	17.819	116.384	60.797	55.587	12.663

Entre 2011 e 2013 verificou-se uma redução significativa do número de veículos reflexo da crise económica que afetou os mercados externos e internos.

2.3. A Indústria 4.0

As condições do mercado atuais mudam rapidamente devido à influência da globalização, dos fatores sociológicos, tecnológicos, económicos e políticos. Cada vez mais, as empresas precisam de se focar na produção a custos reduzidos para serem capazes de manter sua posição competitiva. No contexto de cadeia de abastecimento, a Indústria 4.0 representa as ligações digitais e autónomas dentro e entre as empresas, que permitem a produção, aperfeiçoamento e entrega de produtos e serviços aos consumidores finais com benefícios na cadeia tais como maior rapidez, maior flexibilidade e melhor eficiência (Ivanov et al., 2019). A Indústria 4.0 está assim centrada na ideia de que certas tarefas e decisões podem ser automatizadas por meio de sistemas inteligentes e processos autónomos (Ralston & Blackhurst, 2020).

2.3.1. A origem da Indústria 4.0

O desenvolvimento da Indústria moderna durou centenas de anos e agora chega a era da Indústria 4.0 (i4.0). O conceito foi inicialmente proposto para o desenvolvimento da economia alemã em 2011 (Roblek et al., 2016). Ao longo do tempo, o homem tem desenvolvido a indústria com a contínua criação de novas tecnologias que têm permitido desenvolver e inovar as operações Industriais.

O desenvolvimento Industrial pode dividir-se em quatro evidentes revoluções que por diversos fatores, marcaram a história da humanidade, sempre com o objetivo de criar condições para sermos mais eficazes e produtivos (Xu et al., 2018). De acordo com Lukac (2016), a primeira revolução Industrial começa no final do século XVIII (entre os anos 1760 e 1840) na Inglaterra, de entre vários avanços Industriais, é representada por fábricas de produção mecânica baseadas na água e na energia a vapor. No início do século 20 (anos 1870) dá início à segunda revolução Industrial, com o propósito da produção em massa com recurso à energia elétrica; na década de 1970 começa a terceira revolução Industrial com início da produção automática caracterizada pelo uso da eletrónica e da tecnologia de informação e neste momento está em curso a quarta revolução Industrial designada por Indústria 4.0, com as características de produção em sistemas ciberfísicos (CPS) com base em dados heterogéneos e integração do conhecimento.

Atualmente, estamos perante a quarta revolução Industrial designada como i4.0 caracterizada pela transformação digital em que os computadores e a automação são integrados e os sistemas são informatizados e equipados com máquinas e algoritmos de aprendizagem (*machine learning*) capazes de aprender e reter dados, permitindo o aumento da eficiência e autonomia dos processos de produção (Santos et al., 2017). A i4.0 engloba vários conceitos e tecnologias que incluem sistemas ciberfísicos (*cyber physical systems* -CPS), *Big Data*, identificação por radiofrequência (RFID), planeamento de recursos empresariais (ERP), internet das coisas (IoT), internet de serviços (IoS) e produção baseada em nuvem (*Cloud*). As principais funções destas tecnologias visam atender aos requisitos ágeis e dinâmicos da produção e melhorar a eficácia e eficiência de toda a indústria (Pfeiffer, 2016; Roblek et al., 2016; Thames & Schaefer, 2016).

Para Hecklau et al. (2016), a Quarta Revolução Industrial é caracterizada pela junção da automação resultante da terceira revolução Industrial com as tecnologias de informação (TI), com intuito de desenvolver dispositivos inteligentes e conectados no ambiente fabril. Assim, a i4.0 faz com que

esse ambiente se torne mais ágil, inteligente e preciso, podendo responder às constantes mudanças do mercado de forma mais efetiva.

A Figura 4 apresenta as quatro revoluções Industriais e a base que as sustentam: a mecanização pela utilização da máquina a vapor, a produção em massa com o uso da energia elétrica, a robotização com introdução dos computadores e a transformação digital na era atual.

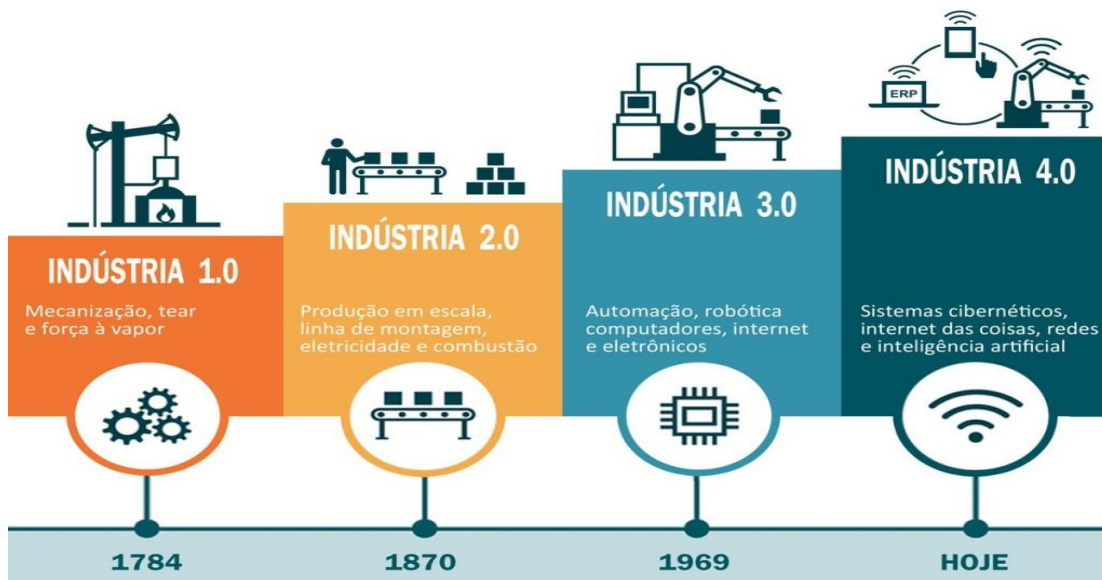


Figura 4 - As transformações digitais entre as quatro Revoluções Industriais.

Fonte: adaptado de Rüßmann et al. (2015)

Assim, A primeira revolução Industrial com o uso da força a vapor, melhorou a produtividade das indústrias siderúrgica e têxtil; a segunda revolução Industrial deu origem custos de fabrico reduzidos ao usar energia elétrica para criar a produção em massa. Com o desenvolvimento dos computadores e da internet na década de 1980, a terceira revolução Industrial transformou o cenário económico (Rifkin, 2011). Ao contrário das três anteriores, Schwab (2016) refere que a quarta revolução Industrial é diferente das outras revoluções porque alavanca a conectividade e a comunicação entre vários dispositivos. Essas tecnologias emergentes, em conjunto com grandes dados (*Big Data*) em tempo real, transformam as operações de fabrico e serviços ao longo de uma cadeia de abastecimento global e modificam as interações entre humanos (consumidores e parceiros da cadeia de abastecimentos) e máquinas. Atualmente, as empresas procuram criar valor explorando essas tecnologias da i4.0.

As mudanças de mercado e a complexidade dos processos influenciaram a i4.0 que, segundo Sung (2018), a integração de tecnologias e processos ciberfísicos permite customizar produtos e serviços, conseguir uma produção mais autónoma, controlada e mais produtiva. Na visão de Schwab (2016) estamos perante uma revolução com implicações no quotidiano, no trabalho e relacionamentos. A combinação de tecnologias físicas e digitais, incluindo análise, fabrico aditivo (impressão 3D), robótica, computação de alto desempenho, inteligência artificial, realidade aumentada entre outras, faz com que o modelo de gestão e a forma de analisar os dados, seja mais profissional e precisa, produzindo melhores resultados e maior competitividade para as empresas.

2.3.2. O conceito da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 (i4.0) foi criada em 2011 por uma iniciativa alemã do governo federal com universidades e empresas privadas, grupo de especialistas da ACATECH (*Academy Nacional of Science and Ingeniering*) dirigido pelo especialista Kagermann. Era um programa estratégico para desenvolver sistemas avançados de produção com o objetivo de aumentar a produtividade e eficiência da indústria alemã (Kagermann et al., 2013). A i4.0, ou seja, a Quarta Revolução Industrial, é um termo concebido na Feira de Hannover em 2011 como parte da estratégia de longo prazo da Alemanha para fortalecer a competitividade de seu setor de produção (Liao et al., 2017). O termo foi assim moldado na Alemanha como uma visão da fusão do mundo físico e digital, principalmente na indústria e serviços, mas também na sociedade (Bartodziej, 2017).

Estamos na era da quarta revolução Industrial, conhecida como i4.0, a qual descreve uma estratégia de integração das tecnologias baseada na internet das coisas (*Internet of Things - IoT*) (Strange & Zucchella, 2017). Esta combinação de tecnologias avançadas e da internet, está a transformar o modelo Industrial e é designada por quarta Revolução Industrial ou i4.0 (Lasi et al., 2014).

Para Cotteleer e Sniderman (2017) o conceito da i4.0 consiste no repetido movimento de informação entre o mundo físico e digital denominado *Physical-to-Digital-to-Physical* (PDP). O fluxo movimento da informação ocorre através de uma série de três etapas (Figura 5):

- **Physical to Digital:** Recolher informações do mundo físico para criar um registo digital das operações físicas;
- **Digital to Digital:** Partilhar informação, permitindo a utilização da inteligência artificial e visualização de dados de várias fontes em tempo real;
- **Digital to Physical:** Aplicar algoritmos e automação para transformar as decisões e ações do mundo digital em movimentos no mundo físico.

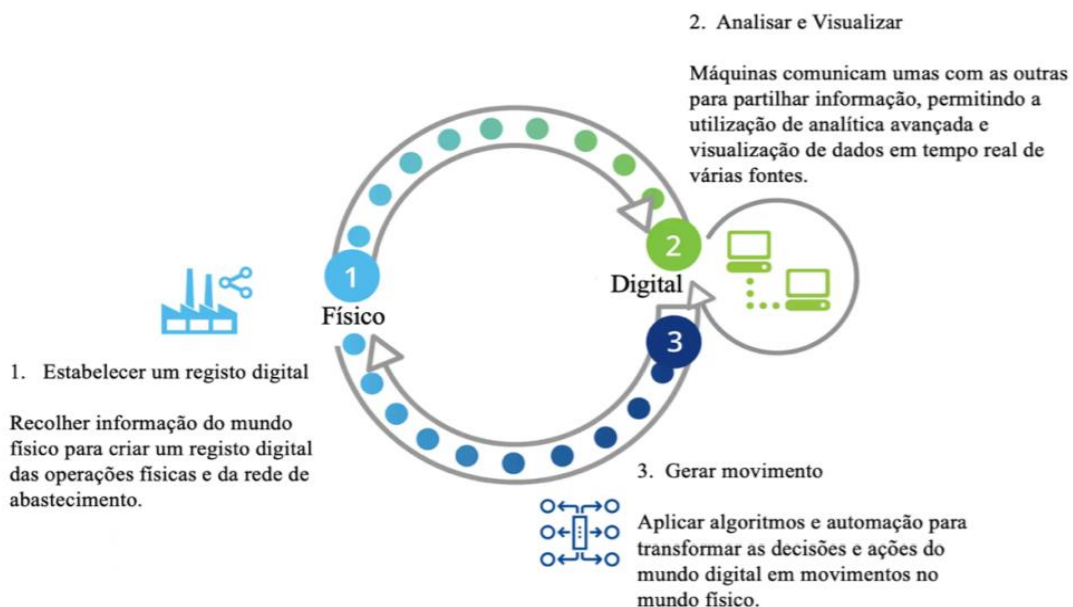


Figura 5 - Ciclo Physical-to-Digital-to-Physical e tecnologias relacionadas.

Fonte: Adaptado de Cotteleer e Sniderman (2017)

Goleman et al. (2017), num estudo elaborado no âmbito da iniciativa Portugal i4.0 referem que a quarta revolução Industrial designada de i4.0, consiste na inclusão dos recentes desenvolvimentos da tecnologia de informação e comunicação (TIC).

Os princípios da i4.0 são interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação de serviço e modularidade (Lu, 2017). A i4.0 pode ser resumida como um processo de fabrico integrado, adaptado, otimizado, orientado a serviços e interoperável que está correlacionado com algoritmos, *Big Data* e tecnologias de ponta (Ji et al., 2016; Wan et al., 2016; Hermann et al., 2015 e Xu et al., 2018).

2.3.3. As Tecnologias da Indústria 4.0

A i4.0 inclui tecnologias chave como comunicação Máquina-Máquina, Robótica, Realidade Aumentada bem como RFID para rastrear os produtos durante o transporte (Mourtzis et al., 2016). Outras tecnologias como *Big Data*, computação em *Cloud* são outros exemplos que integram o ambiente computacional com o ambiente físico (Adamson et al., 2017). Muitas empresas estão adotar um conjunto de novas tecnologias como CPS, IoT, Robótica, *Big Data*, computação em nuvem (*Cloud*) e Realidade Aumentada (AR) para melhorar seus produtos e processos e assim aumentar a eficiência (Schmidt et al., 2015).

Os avanços tecnológicos permitem melhorar o desempenho das organizações e de toda a cadeia. Este novo paradigma tem como objetivo ligar o mundo físico com o mundo digital através da criação dos chamados sistemas ciberfísicos (*cyber physical systems* - CPS), que permitem a digitalização dos ativos físicos e a sua integração em ecossistemas digitais (Kagermann et al., 2013). Este princípio é importante para o desenvolvimento de processos produtivos inteligentes compostos por máquinas e dispositivos (sensores), com a capacidade para comunicarem, em tempo real, entre si e com outros elementos da cadeia de valor, por forma a adaptarem-se agilmente a diferentes cenários (Chen, 2017).

As principais tecnologias da i4.0, são principalmente o CPS, a IoT, a computação em nuvem (*Cloud*), análise de dados (*Big Data*) e outras técnicas analíticas avançadas (Zhou et al., 2016). Para Rüßmann et al. (2015) as nove tecnologias que formam a base para a i4.0 proporcionam uma produção totalmente integrada, automatizada, otimizada e com maior eficiência e altera as relações de produção tradicionais entre fornecedores, produtores e clientes, bem como entre humanos e máquinas possibilitando que humanos, máquinas, Tecnologias de Informação e sensores se interliguem em toda a cadeia.

Na figura 6 estão evidenciadas as nove tecnologias que servem de base para a i4.0.

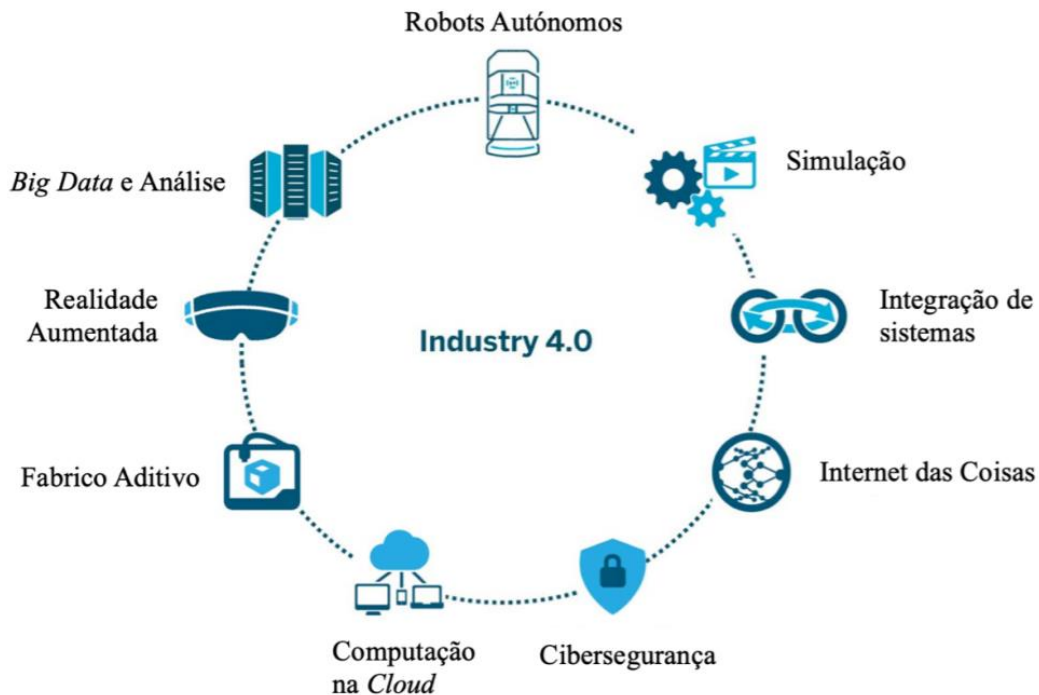


Figura 6 - Tecnologias inerentes à Indústria 4.0. Fonte: adaptado de Rüßmann et al. (2015)

Podemos citar as seguintes tecnologias utilizadas na i4.0:

- **Análise de dados (*Big Data*):** As características de *Big Data* são destacadas como 5Vs- volume, velocidade, variedade, verificação e valor” (Huang et al., 2015, citado por Addo-Tenkorang & Helo, 2016). Na mesma linha de pensamento, Witkowski (2017) refere que *Big Data* deve ter em consideração o volume de dados, a variedade, capacidade de gerar novos dados e o conteúdo dos dados.

A análise de dados visa explorar a grande quantidade de dados disponível para identificar “clusters” e correlações ocultas, de forma a reconhecer padrões sistemáticos. A análise e tratamento de dados é indispensável para uso da tecnologia do *Machine Learning*² que através da aplicação de algoritmos procura aprender o modo como vários sistemas se relacionam entre si, com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão de modo eficaz (Lee et al., 2014).

- **Robôs autônomos:** Na maioria dos casos, os robôs eliminam erros, têm atividades de rotina atribuídas, enquanto a tarefa de uma pessoa ou de um trabalhador, é responder às mudanças e à diversidade de atividades. Essa cooperação também é uma forma de quebrar várias restrições entre locais de trabalho exclusivamente humanos ou locais de trabalho somente robotizados (Gerhátová et al., 2021).

Para automatizar as operações de armazenamento e separação nos centros de distribuição da Amazon, a Amazon gastou 775 milhões de dólares em 2012 para adquirir o sistema robótico Kiva, que permitiu melhorar a produtividade, registrar e rastrear itens dentro do centro de distribuição e movimentar os produtos até aos funcionários para coleta, embalagem e envio.

² é uma ferramenta da área da Inteligência Artificial que “ensina” os computadores a decodificar informações mais complexas e em grande escala de maneira independente através da análise de dados e de algoritmos previamente programados.

Roy et al. (2019) analisam os efeitos de diferentes atribuições de zonas de armazenamento de robôs e estratégias de alocação de filas.

Gružauskas et al. (2018) mostram que a implementação da estratégia de veículos autónomos junto aos armazéns de consolidação, pode baixar o nível de emissões CO2 em 22%, e reduzir os custos em toda rede logística, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e económica. Os veículos autónomos podem ainda melhorar o fluxo de tráfego, reduzir os acidentes, reduzir a exclusão social e melhorar a utilidade do tempo nas viagens. A evolução do transporte será a substituição do ser humano como motorista por uma máquina com inteligência artificial.

- **Integração de sistemas:** a integração conseguida por tecnologias digitais pode promover diversos benefícios para a indústria (Kagermann et al., 2013). Segundo Rüßmann et al. (2015), a integração de sistemas permite que empresas, departamentos, funções e recursos estejam mais coesos à medida que as redes de integração de dados entre empresas evoluem e permitem cadeias de valor verdadeiramente automatizadas. Através da integração de sistemas, é possível conseguir melhor previsão do negócio e maior agilidade para se ajustar às flutuações na procura.
- **Simulação:** é o método de usar modelos de um sistema ou processo real ou virtual para melhor compreender ou prever o comportamento do sistema ou processo modelado (Rodič, 2017). De acordo com Ferreira et al. (2020) (W. D. P. Ferreira et al., 2020), a simulação é uma tecnologia chave para o desenvolvimento de modelos de planeamento exploratórios para otimizar a tomada de decisões, bem como o projeto e as operações de sistemas de produção complexos e inteligentes. A simulação é uma das técnicas mais úteis que permite prever o desempenho dinâmico de um sistema complexo, reproduzindo interações entre os seus subsistemas num modelo desenvolvido em computador (Benedettini & Tjahjono, 2009).

Os avanços das tecnologias promotoras da i4.0, introduzem novos desafios ao campo da simulação devido à crescente complexidade dos sistemas a serem modelados. Através de programas de computador, é possível construir diversos modelos de sistemas, tais como: funcionamento de um banco, uma fábrica, um porto, fluxos de carga num Centro Logístico, no transporte e visualizar o seu funcionamento em tela. A técnica da simulação é utilizada em vários trabalhos na indústria, Ferreira et al. (2005) utilizaram a técnica da simulação para a geração automática de modelos de simulação de linha de montagem de auto rádios, bem como a otimização de linhas de montagem na indústria automóvel (Ferreira et al., 2011).

- **Internet das Coisas (IoT):** A Internet das Coisas permite que as pessoas e coisas estejam conectadas a qualquer hora, em qualquer lugar, com qualquer coisa e qualquer pessoa, de preferência usando qualquer caminho/rede e qualquer serviço (Sundmaeker et al., 2010). Segundo Witkowski (2017), a IoT possibilita que todos os elementos de um sistema produtivo estejam conectados via internet. Dada a capacidade deste meio de comunicação, é possível aumentar a quantidade e qualidade dos dados recolhidos, possibilitando o controlo e a gestão do fluxo de informação. A tecnologia IoT pode ser considerada como impulsionadora da i4.0 (Kagermann et al., 2013).

Esta tecnologia foi desenvolvida para ser compatível com vários tipos de dispositivos (máquinas, robôs, parceiros negócio, transportadores, etc.) quer comuniquem por protocolos mais modernos ou mais antigos (Mourtzis et al., 2016).

No contexto da gestão da cadeia de abastecimento (SCM), Ben-Daya et al. (2019) define IoT como uma rede de objetos físicos que estão digitalmente conectados para sentir, monitorizar e interagir dentro de uma empresa e entre a empresa e a sua cadeia de abastecimentos, permitindo agilidade, visibilidade, rastreamento e informação partilhada para facilitar o planeamento oportuno, controlo e coordenação dos processos da SCM.

- **Computação em nuvem (Cloud):** As tecnologias como computação em nuvem (*Cloud*) suportado pela IoT, permitem a transferência, retenção e partilha de dados dentro da cadeia de abastecimento de forma mais eficiente e rápida, facilitando o transporte, da carga correta, no momento certo (Gnimpieba et al., 2015). A confiança na tecnologia de nuvem depende muito da confiança dos usuários na proteção de dados e, portanto, não tem apenas uma dimensão técnica, mas também política (Kagermann et al., 2013).
- **Realidade Aumentada (AR):** Esta tecnologia suporta uma variedade de serviços como a seleção de peças num armazém ou fabrica, envio de instruções de reparação por intermédio de dispositivos móveis (Bahrin et al., 2016).

A tecnologia AR é uma solução inovadora e eficaz para ajudar a resolver alguns dos problemas críticos para simular, auxiliar e melhorar os processos de fabricação antes que eles sejam realizados (Nee et al., 2012). Segundo estes autores, a produção digital tornou-se uma tendência comum em todo o mundo, uma vez que os sistemas de fabrico integrados por computador eliminam erros de manipulação de dados e melhoraram a tomada de decisões. O desafio é projetar e implementar sistemas integrados de produção assistidos por AR que possam melhorar os processos de fabrico, bem como o desenvolvimento de produtos e processos, com um menor tempo de aprovação, redução de custos qualidade acrescida.

- **Sistemas ciberfísicos (Cyber Physical Systems - CPS):** Os CPS são sistemas de entidades computacionais colaboradoras que estão em intensa ligação com o mundo físico envolvente e seus processos em curso, proporcionando e utilizando, ao mesmo tempo, serviços de acesso e processamento de dados disponíveis na Internet (Monostori et al., 2016). Por outro lado, Shafiq et al. (2015) descrevem o CPS como a convergência dos mundos físico e digital através da criação de redes globais para negócios que incorporam máquinas, sistemas de armazenagem e instalações de produção.

Xu et al. (2014) referem que face aos avanços na comunicação sem fio (sensores, smartphones e tecnologias de rede), o CPS terá um grande impacto nas novas tecnologias de TIC e sistemas corporativos. O CPS pode ser considerado o avanço mais importante da I4.0, pode ser usado para integrar o ambiente físico com o virtual, para controlo e coordenação de processos e operações (Monostori et al., 2016). O CPS desempenha um papel importante em diversas áreas, como equipamentos médicos digitais, controlo aeroespacial e de aeronaves, controlo Industrial, fabricação de veículos motorizados, maquinaria e indústria pesada, metalurgia de ferro e aço, produção e distribuição de energia, transporte e logística (Liu et al., 2017; Zhou et al., 2016)

- **Fabrico aditivo (Impressão 3D):** O fabrico aditivo tem várias aplicações que vão desde a produção de protótipos, peças de substituição, produtos personalizados (como aparelhos auditivos, coroas dentárias, próteses de joelho e até brinquedos) de forma mais rápida, barata e melhor (Sodhi & Tang, 2017; T. Chen & Lin, 2017). Além disso, facilitam a personalização dos

produtos de forma considerável, reduzindo o tempo desenvolvimento e produção assim como os custos de fabrico de produtos exclusivos (Santos et al., 2017).

Do ponto de vista estratégico, Dong et al. (2017) mostram que uma empresa que adota o fabrico aditivo, consegue oferecer mais variedade de produtos para competir. Esta tecnologia não só tem impacto nos setores da produção como em toda cadeia de abastecimento. Para um projeto de componentes, Westerweel et al. (2018) descobriram que o custo de projeto mais alto de fabrico aditivo pode ser superado com custo logístico mais baixo e prazo de entrega reduzido.

2.3.4. Os impactos da Indústria 4.0

A economia e a sociedade enfrentam mudanças significativas devido ao aumento da digitalização que se tem verificado nos últimos anos. No contexto das Indústrias e serviços, a i4.0 está na base do desenvolvimento da digitalização crescente, que visa melhorar a produtividade, flexibilidade e orientação para o cliente. Esta nova fase Industrial está a afetar as regras de concorrência, a estrutura da indústria e as necessidades dos clientes (Bartodziej, 2017)

Os objetivos da i4.0 são, atingir um maior nível de eficiência operacional e produtividade, bem como um maior nível de automatização (Thamsen & Wulff, 2016). A I4.0 traz mudanças disruptivas nas cadeias de abastecimento (*Supply Chain*), nos modelos e processos de negócios (Schmidt et al., 2015). Os princípios da Indústria 4.0 são interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real e orientação para serviços. Em termos de recursos, a Indústria 4.0 pode fornecer uma maior flexibilidade, redução dos prazos de entrega, lotes mais pequenos e personalizados assim como a redução de custos (Shafiq et al., 2016).

Uma análise realizada pelo *Boston Consulting Group* (BCG), comentado por Rüßmann et al. (2015) refere que os impactos da I4.0 serão consideráveis na medida que permitem uma resposta mais rápida e concreta às necessidades dos clientes. Além disso, será possível melhorar a flexibilidade, a capacidade, produtividade e qualidade do processo de produção. Este estudo também refere que a conectividade e interação entre máquinas e seres humanos farão com que os sistemas de produção sejam 30% mais rápidos e 25% mais eficientes.

De acordo com o *McKinsey Global Institute*, a otimização de operações e equipamentos na configuração de fábrica pode gerar até 3,7 triliões de dólares em 2025 (Manyika et al., 2015). Recentemente, Frank et al. (2019) analisaram diferentes fatores económicos e tecnológicos para as empresas adotarem várias tecnologias da I4.0. Com base em uma pesquisa com 92 empresas de produção, descobriram que o fabrico inteligente, é um fator chave.

De acordo com o estudo da Accenture, a Inteligência Artificial (IA) pode aumentar a produtividade do trabalho em 40% até 2035 e ajudar a acelerar o crescimento real anual do PIB em 2%. A IA pode ter impacto em todos setores (Industrial, Serviços, Transportes) e poderá substituir trabalhadores altamente qualificados (Záležáková, 2019; citado por Gerhátová et al., 2021).

A interação do mundo físico com o digital permite a interligação dos processos tornando possível obter uma visão de todo processo em tempo real e assim poder ajustá-lo de acordo com as necessidades. Consequentemente, são tomadas decisões mais assertivas, possibilitando o desenvolvimento de melhores produtos, serviços e sistemas, utilização dos recursos mais eficiente

e a uma melhor previsão das necessidades. Segundo Laaper et al. (2017), para que esta sinergia seja possível, devem ser implementados dois sistemas:

- i) *Smart factory*: sistema de automação flexível e conectado, que utiliza a informação transmitida dos sistemas de operação e produção para perceber e ajustar-se à variação da procura.
- ii) *Digital supply network* (DSN): A cadeia de abastecimento tradicional caracteriza-se por operações lineares, pouco flexíveis e onde a informação acompanha a movimentação das matérias primas e produtos acabados, ao longo do processo. Com a digitalização, esta cadeia de abastecimento torna-se numa rede de abastecimento digital (Figura 7), todas as operações são conectadas de forma flexível, permitindo ligação dos dados e informação em rede, dando melhor eficiência nas variações da procura e necessidades do mercado.

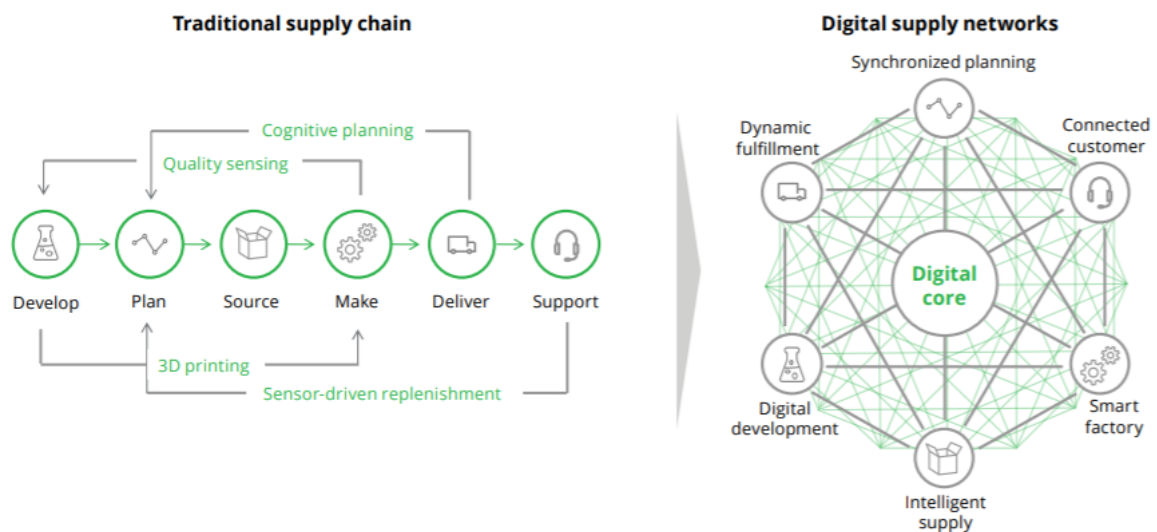


Figura 7 - Da Supply Chain tradicional para uma Digital Supply Network. Fonte: Adaptado de Laaper et al. (2017)

A i4.0 é considerada como um ambiente de negócios integrado onde máquinas, processos operacionais e produtos, interagem uns com os outros de forma autónoma dentro da empresa e entre as empresas (Ivanov et al., 2019), permitindo que todas as partes interessadas possam colaborar de forma mais eficiente (Cotteleer & Sniderman, 2017).

Utilizando novas ferramentas tecnológicas, as empresas procuram aumentar a eficiência, a flexibilidade e a fiabilidade, tornando-as mais ágeis e desta forma, melhorar as operações de toda a cadeia de valor (Correia et al., 2016). As empresas com menor preparação digital correm o risco de serem ultrapassadas por novos concorrentes mais preparados para um mundo digital.

A estratégia portuguesa para a i4.0, foi lançada em janeiro de 2017 com o objetivo de colocar Portugal na vanguarda da 4ª revolução Industrial, apostando em três eixos: digitalização, inovação e formação. Concentrando-se na identificação das reais necessidades da indústria portuguesa, com particular enfoque nas PME's como motores de mudança, 120 empresas portuguesas participaram na conceção da estratégia. As medidas foram divididas em 6 pilares estratégicos: qualificação do capital humano; cooperação tecnológica; start-up i4.0; financiamento e incentivo ao investimento; internacionalização e padrões. Seu objetivo é ter um impacto em mais de 50.000 empresas e treinar mais de 200.000 trabalhadores em habilidades de Tecnologia da Informação e Comunicação (Comissão Europeia, 2017).

Num estudo realizado em Julho de 2019 para a COTEC³ Portugal (2019) sobre o impacto da i4.0 e seu potencial efeito nas PME Portuguesas, é referido que Portugal encontra-se nos países de nível médio em termos de Indústria 4.0 (Figura 8). Este estudo foi realizado com base na ferramenta “i4.0 Scoreboard” desenvolvida pela COTEC com o apoio da KPMG, com vista a identificar a competitividade europeia e nacional no contexto da i4.0, contou com análise de 18 países Europeus que foram classificados em 3 grupos: “LAGGING”, “MID TIER” e “LEADING”. Os países do norte da Europa constituíram o nível superior e Portugal ficou na 12ª posição. Em 2030, Portugal pode aspirar o escalão superior, mas vai exigir um esforço sustentado envolvendo 20.000 empresas, formando 200.000 funcionários e financiando centenas de projetos.

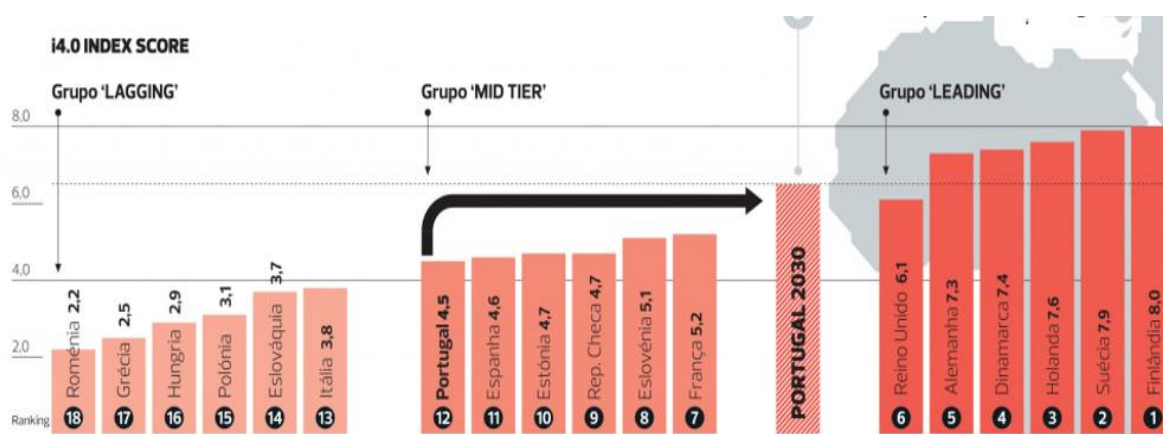


Figura 8 - Posição de Portugal no i4.0 Scoreboard em 2017. Fonte: KPMG Portugal (2019)

Através das tecnologias e dos novos modelos de negócio, orientados para o paradigma da i4.0, aproximadamente 57% das empresas portuguesas do setor Industrial preveem um aumento médio da sua receita até 10%. Enquanto cerca de 55% têm como expectativa reduzir mais de 10% dos custos e 70% esperam obter ganhos de eficiência superiores a 10% (Correia et al., 2016).

As empresas melhor preparadas para a era digital e com maiores volumes de negócios terão mais capacidade para investirem em novas tecnologias e gerar retornos em tempos razoáveis (Correia et al., 2016). A falta de parâmetros para medir com eficácia os impactos da alteração da estratégia, poderão ser obstáculos ao investimento, neste sentido, poderá ser conveniente que estas empresas optem por encontrar tecnologias de transição ou reconverter equipamentos existentes, de modo a não comprometer a sua competitividade e sustentabilidade (Müller et al., 2018).

³ - Associação empresarial para a Inovação

2.4. Indústria 4.0 nos Transportes

O potencial da i4.0 é construído com base no princípio de comunicação e cooperação entre máquinas, pessoas, produtos, equipamentos e sistemas de logística (Gerhátová et al., 2021). Um aspecto revolucionário da i4.0 é a acessibilidade às suas tecnologias a preço mais baixo e uso generalizado de sensores em todas as cadeias de valor (Dalenogare et al., 2018), o que ajuda a eliminar barreiras para a integração e gestão eficazes da cadeia de abastecimento (Hofmann & Rüsçh, 2017).

Pelo enquadramento das novas tecnologias, a quarta revolução Industrial, não só tem impacto nas indústrias e dos modelos de negócios como também em todas as cadeias de abastecimento, (Kersten et al., 2015). No entanto, a inclusão destas tecnologias está integrada com os governos de cada país, pelas normas, políticas e diretrizes que são definidas com o fim de se implementar de forma eficiente (Liao et al., 2018). Para Muhuri et al. (2019) a quarta revolução tem promovido uma transformação global impondo diferentes pilares como a sustentabilidade, estando alinhada com organizações como a ONU (Organização das Nações Unidas) na preocupação pelo bem-estar das pessoas protegendo o aspeto social ambiental e económico (ODS, 2020), propondo objetivos como o acesso a transporte seguro, sustentável e a preço acessível.

A principal tarefa do transporte de mercadorias, é a movimentação de mercadorias do fornecedor para o cliente. As tecnologias inovadoras e a digitalização permitem otimizar a capacidade, fortalecer o desempenho, melhorar a qualidade e simultaneamente, garantir a flexibilidade de toda a cadeia de abastecimento e a sustentabilidade de todos os processos (Gerhátová et al., 2021). Outros autores, como Uden e He (2017), destacam as implicações da IoT no transporte, como o acompanhamento em tempo real das localizações, transmissão de dados, partilha de informações do estado de transporte, gestão de combustível através dos sensores com informação de consumos, transmissão do estado do veículo, recolhendo dados importantes oferecendo segurança ao motorista e diminuição de trajetos desnecessários.

As tecnologias como a IoT e *Big Data*, criam oportunidades para responder às necessidades dos clientes e também contribuem para o desenvolvimento da cadeia de abastecimento. Estas tecnologias ditas inteligentes podem ser reconhecidas como soluções inovadoras na Indústria, podendo também ser utilizadas na logística e transportes, nomeadamente na redução dos tempos de entrega e confiança no serviço (Witkowski, 2017). A troca de dados entre os transportes e fornecedores permite descentralizar a coordenação das remessas e produtos com o transporte. Para isso, as remessas e produtos apresentam sistemas de identificação, por RFID ou códigos QR, que possibilitam a identificação localização através da Internet, de todos os produtos na cadeia de abastecimento (Stock & Seliger, 2016). Adicionalmente, os algoritmos podem ajudar na tomada de decisões, sugerindo o tipo de transporte mais adequado tendo em consideração o tempo, distancias a percorrer entre ponto de partida e destino, tipo de carga, volumes, pesos e quantidades (Li et al., 2014).

Automatizar os processos de troca de dados é uma forma eficaz de agilizar a comunicação e promover o bom funcionamento das operações individuais na cadeia de abastecimento. A digitalização e automação dos processos de negócios ajudam a facilitar o trabalho dos colaboradores e, acima de tudo, interfere positivamente os resultados da empresa (Gerhátová et al., 2021).

Com a crescente inovação tecnológica e o aumento da competitividade à escala global, o cliente final não se preocupa só com o tempo e o custo, como também passou a prestar atenção à sustentabilidade de todo sistema logístico em relação aos aspetos, económicos, sociais e ambientais - figura 9 (Maslarić et al., 2016).

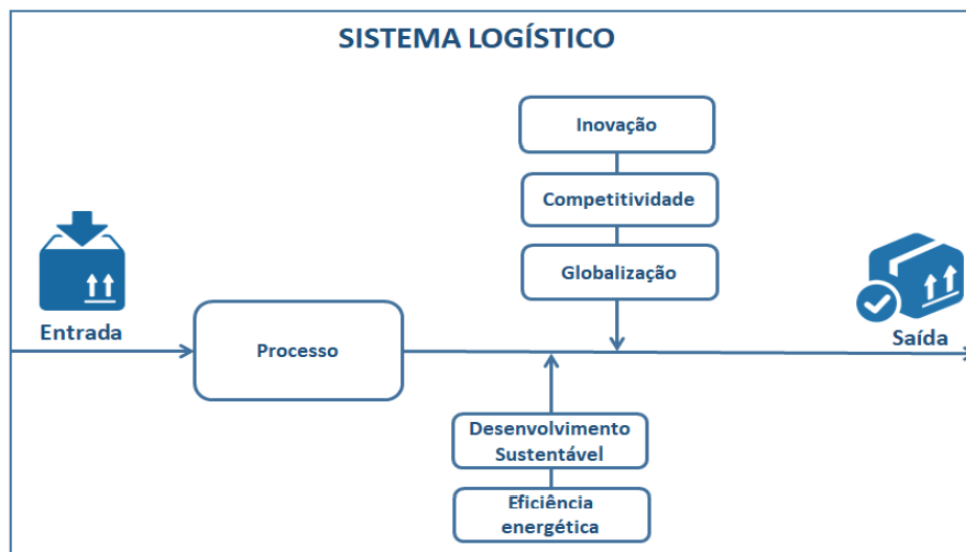


Figura 9 - Transformação do sistema logístico. Fonte: adaptado de Maslarić et al. (2016)

As tendências do desenvolvimento global da humanidade estão ligadas à crescente urbanização, implicando um aumento da necessidade de movimentação de pessoas e bens de diferentes países. As principais direções no desenvolvimento de sistemas de transporte e logística, são as soluções que proporcionam um transporte mais rápido, ecológico e barato de pessoas e mercadorias, ao mesmo tempo que reduz o congestionamento nos meios urbanos. Para além do bem-estar público e privado, estas tendências contribuem para uma nova era de desenvolvimento económico (Makarova et al., 2019).

Através das tecnologias da I4.0, as empresas podem criar valor económico, ambiental e social, transformando a função logística como: i) uma alavanca competitiva, ii) criador de valor social, iii) facilitador para a sustentabilidade. A logística do transporte apesar de ser uma função importante que leva o produto certo ao cliente certo no momento certo, representa um papel importante na estratégia das organizações (Tang & Veelenturf, 2019). Estes autores referem alguns exemplos que evidenciam a importância da logística e transporte:

- [1] O desaparecimento da mercearia online *Webvan* e da loja de móveis online *furniture.com*, devido aos atrasos nas entregas, itens em falta e elevados custos de entrega final (*last mile*).
- [2] Em 2018, a *Amazon* criou o serviço "*Amazon Logistics*" para obter melhor controle do desempenho nas entregas *last mile* - maior rapidez, confiabilidade e menor custo.

O setor do transporte é caracterizado por um número relativamente pequeno de grandes empresas internacionais e várias empresas pequenas regionais. Esta estrutura do setor deve-se ao fato de serem poucas as barreiras de entrada, mas são necessários investimentos avultados para atingir determinado tamanho. O número limitado de empresas de tamanho suficiente para usar sistemas de informação integrados na cadeia de abastecimento levou à formação de um ambiente de sistema que possui alguns padrões e ainda menos softwares e tecnologias especializados em grande escala (Verdouw et al., 2016).

Para Tonelli et al. (2016), conseguir integrar os sistemas que compõem as operações logísticas e transporte que utilizam padrões distintos entre si, é o maior desafio da atualidade. As tecnologias da i4.0 permitem homogeneizar as operações, os custos e cria oportunidades logísticas que antes não eram possíveis. Os mercados globais impõem grandes opções de reconfiguração nas cadeias de abastecimento para atender aos requisitos da sustentabilidade decorrentes de mudanças ambientais e crescente variabilidade na procura e perfis de qualidade na era atual da digitalização (Bechtsis et al., 2017). Estes autores estudaram a utilização de veículos automatizados para enfrentar as condições dinâmicas do mercado e alinhar a gestão da cadeia de abastecimento (SCM) tendo em consideração a sustentabilidade.

A internacionalização de mercados em conjunto com preocupações de sustentabilidade decorrentes de regulamentos legais e consciência ambiental dos consumidores, sustentam a adoção e exploração de sistemas flexíveis e automatizados nas operações da cadeia de abastecimento que podem ser monitorizadas, controladas, planeadas e otimizadas remotamente e em tempo real via Internet (Verdouw et al., 2016). Toda a cadeia logística deve ser interligada de forma a formar uma rede de logística global aberta, eficiente, sustentável e resistente através da digitalização proposta pela I4.0, criando um padrão global de interfaces e protocolos (Uhlemann et al., 2017). A conectividade de todos processos logísticos, deve assegurar a cooperação entre todos os intervenientes da cadeia de abastecimento (Tonelli et al., 2016).

A i4.0 tem interferência na forma como os stocks são geridos antes ou na entrega ao cliente. A gestão de Inventário pelo fornecedor transforma-se em gestão de inventário autónomo com a ajuda de sensores e interconexão. O futuro será a logística preditiva baseada na integração da inteligência artificial no processo de tomada de decisão. Da mesma forma, as operações de Armazém automatizadas em rede possibilitarão a distribuição sincronizada sem armazéns intermediários (Cruz-Mejía et al., 2019).

A IoT oferece novas possibilidades na área de desempenho, exemplo disso é o facto dos veículos de transporte rodoviário poderem ser controlados de forma automática, o que dá a possibilidade de operar em intervalos previamente determinados e a uma velocidade controlada, de modo a maximizar a poupança de combustível. No transporte de mercadorias, a localização e seguimento (através de sistemas GPS) tornam-se mais rápidos, precisos e seguros. A análise associada ao desenvolvimento da "frota conectada" pode ajudar a prever falhas e planear processos que melhorem a cadeia de abastecimento (Witkowski, 2017).

Hofmann e Rüsç (2017) nos seus estudos e cenários avaliados, evidenciaram a importância da I4.0 na logística entre as organizações no que concerne aos fluxos de informação em tempo real, transparência em toda cadeia de abastecimentos e melhorias na flexibilidade, ajudando as empresas a otimizar a criação de valor. A i4.0 e suas tecnologias como o IoT, permite à gestão de transporte, a recolha de dados em tempo real e a digitalização, melhorando assim a previsão das operações e criam oportunidades para responder melhor às necessidades dos clientes, contribuindo desta forma, para o desenvolvimento do transporte e da gestão das cadeias de abastecimento (Witkowski, 2017).

Com o crescente uso da IoT e a inevitável atualização para a i4.0, um sistema de gestão de transportes que utiliza dados em tempo real para alcançar mais eficiência e eficácia no processo logístico, é importante para uma empresa ser capaz de usar a tecnologia GPS para localização de veículos, monitorizar o movimento de carga, negociar com transportadoras, consolidar remessas e

usar as funcionalidades avançadas da plataforma para interagir com um sistema inteligente de transporte. A transformação digital e o uso de sistemas inteligentes tornarão a cadeia de abastecimento mais inteligente, transparente e eficiente em todas as etapas (Barreto et al., 2017).

Os ambientes de produção em todo o mundo transformam-se para aproveitar ao máximo as diretrizes da i4.0. Automação, troca de dados, CPS, IoT, nuvem e computação cognitiva, representam um passo no desconhecido para as empresas, associado a altos riscos e também à necessidade de reestruturação da sua cultura (Gajsek et al., 2019). Em linha com as necessidades dos clientes que alteram rapidamente, a competição de mercado cada vez mais intensa, a crescente complexidade do produto e os requisitos legais exigentes, há uma elevada procura por maior eficiência de produção, qualidade do produto, consumo de energia e contenção de custos (Vrecko et al., 2019). i4.0 altera de forma significativa produtos e sistemas de produção relativos a design, processos, operações e serviços (Durana et al., 2019).

As tecnologias da i4.0 (sensores, *Big Data*, análises, inteligência artificial) confundem os limites entre o mundo digital e físico. O mercado atual exige melhor atendimento ao cliente e transparência. Saber da localização dos produtos e recursos em tempo real dá força aos fabricantes e distribuidores em modernas cadeias de abastecimento. Estas tecnologias facilitam o status do sistema em tempo real, incluindo pedidos, produtos, disponibilidade de recursos de armazenamento e de transporte. A simulação pode ser usada para modelar o impacto da implementação das tecnologias da i4.0 na coordenação de recursos (Cruz-Mejía et al., 2019).

Ferreira et al. (2020) propõem uma estrutura conceitual da i4.0 (Figura 10) que descreve os componentes do sistema e os diferentes tipos de relações entre eles, nomeadamente o uso da simulação, áreas de aplicação e a relação entre as abordagens de simulação e os princípios da i4.0.

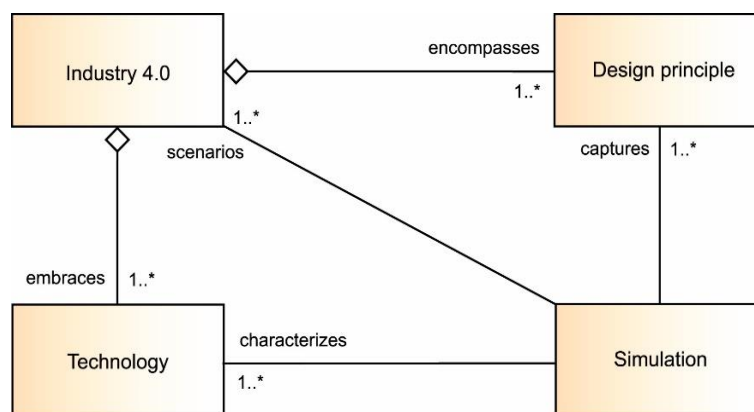


Figura 10 - Indústria 4.0 - Conceptual framework. Fonte: (Ferreira et al., 2020)

Rodič (2017) realça a influência da i4.0 no desenvolvimento de novos métodos de simulação que são importantes para o aumento da competitividade. As técnicas de simulação servem a diferentes propósitos e aplicam-se a diferentes áreas (Jahangirian et al., 2010) o que pode permitir uma fácil análise do fenómeno i4.0 de diferentes perspetivas.

2.5. A Simulação na Indústria 4.0 como ferramenta de apoio à decisão

Nas últimas décadas, a simulação e a otimização desempenharam papéis importantes na solução de problemas complexos. Exemplos bem sucedidos incluem planejamento e programação de produção, projetos de *Supply Chain* e otimização de rotas. Porém, muitos dos problemas permanecem desafiantes devido à sua complexidade, incerteza e aleatoriedade. Além disso, nos últimos anos, a maior aplicação de métodos de otimização e simulação foi utilizada no suporte à decisão (Ivanov et al., 2019).

Para Rodič (2017), simulação é o método de utilizar modelos de um sistema real ou imaginário para melhor compreender ou prever o comportamento do sistema ou processo modelado. Como representação analógica, é construído um modelo físico, matemático ou outro tipo. Como tal, a simulação e criação de modelos são tão antigas quanto o primeiro uso de peças de madeira ou pedra para representar unidades militares num jogo semelhante ao xadrez.

A simulação é uma tecnologia chave para o desenvolvimento de modelos de planejamento e exploratórios para otimizar a tomada de decisões, bem como o projeto e as operações de sistemas de produção complexos e inteligentes (Ferreira et al., 2020), também pode ajudar as empresas a avaliar os riscos, custos, barreiras de implementação, impacto no desempenho operacional e guia para a i4.0. Vieira et al. (2020) refere que a simulação destaca-se como um método adequado para a área da gestão das cadeias de abastecimento (SCM), contudo, para gerar simulações precisas de *Supply Chain (SC)*, devem ser considerados diversos processos de negócio.

A simulação é, de fato, um dos métodos mais utilizados na gestão das cadeias de abastecimento (SCM) conforme defende Jahangirian et al. (2010) e, as suas mais valias incluem a capacidade de testar cenários de interrupção, previsão, determinar soluções complexas e visualizar fluxos logísticos. As abordagens híbridas que combinam duas ou mais técnicas de simulação (por exemplo, simulação de eventos discretos e dinâmica do sistema) estão a ser cada vez mais populares devido à tendência crescente de disponibilizar soluções para toda empresa que levam em consideração o impacto que diferentes partes de uma organização têm umas sobre as outras.

Ferreira et al. (2010) desenvolveram um sistema de apoio à tomada de decisão, baseado em modelos de simulação de eventos discretos dirigido a uma classe de linhas de produção muito específica de montagem automóvel com uma configuração de rede de quatro circuitos fechados para analisar a influência do número de paletes que circulam na linha, permitindo ao proprietário da empresa conhecer melhor a sua atual realidade Industrial e, assim, ajudar na tomada de decisões para maximizar o desempenho da linha de montagem. A simulação serve também de auxílio no processo de tomada de decisão envolvendo a implementação dos princípios do *Lean manufacturing*, Ferreira et al. (2012) recorreram à simulação para melhorar e otimizar o desempenho da linha de montagem de uma fábrica de moldes para caixas de cartão evidenciando que mudanças no layout podem reduzir a movimentação dos trabalhadores e aumentar a produtividade.

2.5.1. Dinâmica de Sistemas

Criada na década de 50 por Jay Forrester, no *Massachusetts Institute of Technology* – MIT, Cambridge, EUA, a Dinâmica de Sistemas (DS) é uma metodologia poderosa desenvolvida a partir da teoria dos sistemas, ciência da informação, teoria organizacional, teoria do controle, tomada de decisões táticas, cibernética e jogos militares e tomadas de decisões táticas. A função principal da DS é construir modelos de problemas complexos e testá-los em computadores (Abbas & Bell, 1994).

A DS é uma ferramenta de modelação e simulação que possui a capacidade de representar a complexidade e os ciclos (*loops*) de causalidade presentes em sistemas físicos e sociais (Forrester, 1994). O objetivo dessa abordagem é compreender como é que as interações do sistema são geradas e propor medidas que melhorem o desempenho do mesmo (Wen & Bai, 2017).

Este método emprega modelos mentais que facilitam a compreensão das relações existentes entre os componentes de um sistema, sendo por isso uma excelente ferramenta de suporte no processo de tomada de decisão (Shepherd, 2014). A grande vantagem da DS, é a sua eficácia em descrever os sistemas por meio de uma lógica sistêmica que apresenta as relações circulares de causa e efeito, circuitos de retroalimentação e atrasos (Liu et al., 2010). Outro aspeto importante da DS, é o facto de considerar o sistema como um todo, representar sistemas agregados e apreender a complexidade dinâmica da sua evolução (Sayyadi & Awasthi, 2017).

Os modelos baseados em DS têm a capacidade de lidar e monitorizar as suposições sobre as estruturas do sistema e os efeitos das mudanças nesses subsistemas, gerando cenários simulados dependendo das alterações das variáveis em causa (Al-khatib et al., 2016). Por isso, esta metodologia tem sido usada há muito tempo como uma ferramenta de simulação em diferentes áreas que inclui aplicações em defesa, desenvolvimento urbano e regional, negócios, bancos, indústria, economia, finanças, fabrico, educação, saúde, medicina, engenharia, silvicultura, pesca, energia, meio ambiente e transportes (Abbas & Bell, 1994).

Para Shepherd (2014), a DS tem uma abordagem que vincula modelos qualitativos e quantitativos. Os modelos qualitativos utilizam diagramas de *loop* causal (CLD) que visam identificar os principais *loops* de realimentação (positivos ou negativos) que afetam o comportamento do sistema e relações causais entre os elementos ou variáveis do sistema. A figura 11 apresenta um exemplo de CLD com os dois *loops*: um positivo representado pela letra R e um negativo representado pela letra B. Os *loops* positivos amplificam o que ocorre no sistema, os negativos têm uma relação inversa. Os sistemas que contêm ambos os *loops*, podem alcançar o equilíbrio dinâmico.

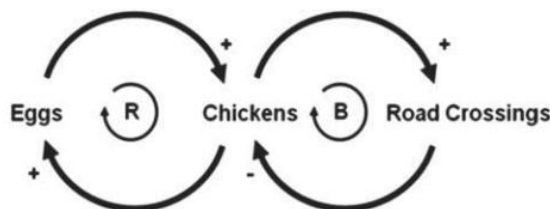


Figura 11 - Exemplo de CLD com dois loops: positivo e negativo. Fonte (Shepherd, 2014)

Os *loops* causais representam a interação entre ovos, galinhas e travessia de estradas. No *loop* R, o ciclo de “ovos e galinhas” é positivo, mais ovos levam a mais galinhas que por sua vez dão mais ovos. No *loop* B, o ciclo “galinhas e travessia de estradas” é equilibrado, enquanto um aumento no número de galinhas leva a um aumento nas travessias de estradas, o aumento nas travessias de

estradas leva a menos galinhas por serem atropeladas. Se ambos os *loops* funcionassem isoladamente, no primeiro tanto as galinhas como os ovos aumentariam exponencialmente, já no segundo, as galinhas (e travessias de estradas) cairiam gradualmente para zero, com a interação dos dois *loops*, é possível alcançar o equilíbrio dinâmico (Shepherd, 2014).

Apesar dos modelos qualitativos serem úteis para descrever a estrutura de um sistema e uma hipótese dinâmica, a maioria dos decisores pretende ter resultados quantitativos. Aqui, a abordagem é baseada na ligação de equações diferenciais, mas é apresentada ao utilizador em termos de “stocks” e “fluxos” por meio de um diagrama de stock e fluxos (SFD) para o modelo ser transparente e fácil de entender (Shepherd, 2014). Stocks e fluxos são fundamentais para a dinâmica de sistemas complexos. As variáveis de estado e as taxas que as alteram são o conceito central do cálculo e das equações diferenciais, entre outros paradigmas de modelagem, estes conceitos são fundamentais na instrução de todo cientista e engenheiro (Sterman, 2002). A Figura 12 ilustra a teoria dos stocks e fluxos através do exemplo do fluxo de água, a quantidade no depósito de água é sempre o acumulativo das entradas para o stock menos as saídas.

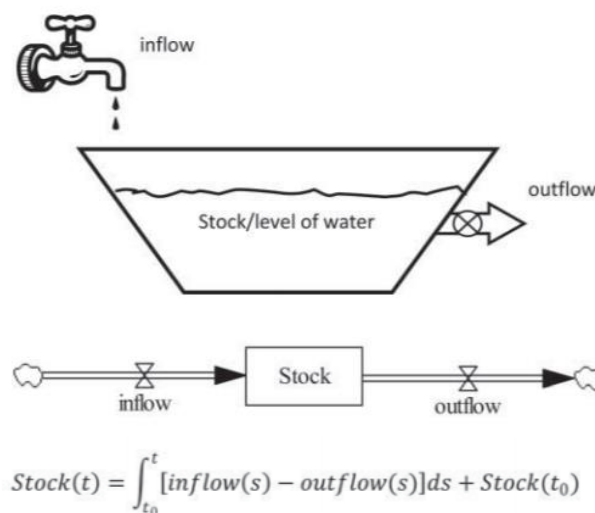


Figura 12 - Metáfora Hidráulica dos stocks e fluxos. Fonte (Shepherd, 2014)

Os stocks são acumulações e são representados por retângulos sugerindo uma caixa para conter o conteúdo. Os fluxos podem ser de entrada ou de saída de um stock e são representados por tubos com válvulas que controlam a taxa de fluxo para dentro ou para fora de um estoque

A DS dá a possibilidade de fazer uma análise contínua de determinado cenário através da modelação das interações dos fatores analisados, permitindo prever cenários futuros. Este método utiliza modelos qualitativos e quantitativos que permitem uma visão global de todo o sistema no planeamento de transportes (Dundović et al., 2009). A análise dos sistemas de transportes envolve fatores sociais, económicos, ambientais e políticos, sendo por isso complexa (Junior et al., 2016). Para Wang et al.(2008) as abordagens tradicionais para os transportes não são aconselhadas, devem ser substituídas por abordagens holísticas possíveis através da DS.

A simulação é a ferramenta mais útil nos campos da engenharia Industrial, pesquisa operacional e ciências da gestão. Modelagem e simulação são uma metodologia de solução de problemas, poderosa e eficaz para estudar como é que os sistemas complexos do mundo real se comportam ao longo do tempo (Scheidegger et al., 2018).

2.5.2. Modelos de Simulação

Modelagem e Simulação é uma área da engenharia que tem como principal objetivo, simplificar problemas complexos em uma representação significativa chamada de modelo e a simulação é a execução de um modelo ao longo do tempo. Após a simulação ser executada, os resultados são coletados e analisados a fim de formular uma resposta à questão de modelagem (Diallo et al., 2015). Desenvolver modelos de simulação é a técnica de utilizar modelos de um sistema real ou imaginário ou um processo para melhor compreender ou prever o comportamento do sistema ou processo modelado (Rodič, 2017).

Na Tabela 4 são apresentados alguns exemplos práticos da utilização desta metodologia que foi útil na resolução de vários problemas relacionados com o setor dos transportes.

Tabela 4 - Exemplos da aplicação de simulação no setor dos transportes. Fonte própria

Referência	Aplicações de simulação
(Yao & Chen, 2005)	Os autores desenvolveram um modelo de simulação para analisar as relações entre população, economia, habitação, transporte e desenvolvimento do espaço urbano em Toronto -Canadá. Estudaram dois cenários: (i) aumentar a parcela do transporte público; (ii) expandir a capacidade rodoviária e verificaram que, o aumento do uso do transporte público em 30% resultaria em uma redução de 20% na distância percorrida por veículos até 2030, reduzindo assim o congestionamento. Já o aumento da capacidade rodoviária, aumenta a distância percorrida por veículo e o congestionamento.
(Ferreira et al., 2005)	Os autores criaram uma aplicação de apoio à tomada de decisão baseada na geração automática de modelos de simulação para apoiar a redefinição do processamento do fluxo de materiais numa linha de produção de autorrádios. No trabalho foram desenvolvidas seis estratégias de controlo que permitem ao utilizador da ferramenta de apoio à decisão, validar o impacto da implementação que cada uma das estratégias de controlo poderá ter na produção.
(Zheng et al., 2009)	Com base na análise qualitativa, desenvolveram um modelo de DS na ferramenta <i>Vensim</i> , da interação da logística da aviação com o desenvolvimento da economia regional em Guangxi. Usando este modelo, simularam e analisaram a interação e tendência da logística da aviação, a economia regional de Guangxi e o comércio de Guangxi-ASEAN. Os resultados indicam que a capacidade de oferta e o nível de serviço da logística da aviação desempenham papéis importantes no desenvolvimento da economia e do comércio.
(Hang & Li, 2010)	Utilizando a dinâmica de sistemas, os autores desenvolveram uma estrutura metodológica para avaliação da Regulação do Peso do Camião (TWR) para o sistema de frete rodoviário na província de Anhui, China. Os resultados da simulação mostram que, entre três alternativas de política, a abordagem de política moderada é a opção mais adequada para resolver os problemas sociais e económicos decorrentes do transporte com excesso de peso em Anhui. Os autores fazem também algumas sugestões de política TWR na China.
(Ferreira et al., 2012)	Neste trabalho, os autores utilizaram a simulação para auxiliar o processo de tomada de decisão envolvido na implementação de princípios <i>Lean</i> numa fábrica de moldes para caixas de cartão com objetivo de melhorar e otimizar o desempenho da linha de montagem. O modelo de simulação demonstrou o impacto dos princípios <i>Lean</i> em termos de redução do tempo de transporte e espaço físico, resultando em economia significativa nos custos de funcionamento da empresa.
(Ferreira et al., 2011)	Neste trabalho, os autores formularam um sistema de apoio à decisão desenvolvendo um modelo de simulação no ARENA para uma fábrica de montagem de automóveis. O resultado obtido, permitiu reduzir o número de paletes a circular nos transportadores pela linha de produção, conseguindo reduzir os custos sem prejudicar o desempenho.
(Yeo et al., 2013)	Desenvolveram um modelo de simulação na ferramenta <i>Vensim</i> para analisar a relação entre os níveis de segurança de portos marítimos e os volumes de carga em contentores na Coreia. Através da simulação, os autores analisaram o impacto do volume de containers

	para os níveis segurança previstos para os anos de 2015 a 2020. A adaptação adequada da metodologia baseada em DS proposta, pode estimular a análise quantitativa da economia de segurança em uma ampla gama de contexto portuário, promovendo assim a implementação eficaz de medidas de segurança.
(Peng et al., 2014)	Recorrendo à DS, os autores analisaram o comportamento da cadeia de abastecimento em situações de desastres sísmicos. O objetivo é propor um modelo de DS para analisar os comportamentos da cadeia, simulando as incertezas associadas com a previsão da rede rodoviária pós-sísmica e informações atrasadas. As soluções de reabastecimento são combinadas com três estratégias de planejamento de stock e quatro métodos de previsão, e diferentes cenários que combinam soluções com as circunstâncias dinâmicas. Como resultado, os autores sugeriram uma árvore de decisão para auxiliar nas tomadas de decisões a escolha das melhores estratégias.
(Manohar et al., 2014)	Um modelo de DS, foi aplicado para prever as emissões de veículos de transporte rodoviário para avaliar as políticas de gestão do transporte. O modelo desenvolvido na ferramenta <i>Vensim</i> , foi aplicado para avaliar e comparar três cenários, incluindo expansão de estradas, incentivo ao transporte público e aplicação de normas de qualidade para veículos. Os dados de poluição foram coletados em <i>Chennai, Tamil Nadu - Índia</i> . Constatou-se que das políticas propostas, a implementação de política de incentivo ao trânsito para a adoção de transportes públicos e a implementação de normas (<i>Bharat Stage IV</i>) para veículos mostraram-se eficientes na redução da poluição causada pelo transporte.
(Wang et al., 2012)	Por meio da DS utilizando o <i>Vensim</i> , os autores analisaram os efeitos do atraso de transporte em um sistema de produção com inventário restrito. Os resultados sugerem que informações precisas sobre o tempo de processamento são essenciais para eliminar o desvio e a instabilidade do stock e que as políticas de pedidos devem ser projetadas adequadamente de acordo com o tempo de processamento real para evitar flutuações e divergências, mostrando assim, a importância de um <i>leadtime</i> apurado para eliminar a instabilidade do sistema.
(Spiegler & Naim, 2014)	Os autores investigaram de que forma as limitações de capacidade no sistema de transporte afetam o comportamento dinâmico das cadeias de abastecimento com foco no efeito de 'reação' definido. Usando uma abordagem de simulação de DS, replicaram a conhecida cadeia de abastecimento <i>Beer Game Distribution</i> , para diferentes cenários de gestão de capacidade de transporte. Os resultados indicam que as limitações da capacidade de transporte impactam negativamente nos custos de stock e <i>backlog</i> , embora haja um impacto positivo no efeito 'folga'.
(Rassafi et al., 2014)	Desenvolveram um modelo por meio da DS para avaliar o sistema de transporte urbano, focando nas variáveis ambientais, económicas e sociais. Para validar o modelo, os autores utilizaram dados reais da cidade de Mashhad, Irã. Os resultados mostram que as atuais políticas não são eficazes e a continuidade das mesmas resultarão no aumento de problemas e, conseqüentemente, em um sistema de transporte não sustentável.
(P. Liu & Mu, 2015)	Para solucionar o problema da sobrecarga de camiões (TWR) no transporte rodoviário de minério de ferro de Caofeidian a Tangshan (HTCT), estes autores desenvolveram um modelo para avaliação de políticas, utilizando a DS. O modelo desenvolvido na ferramenta <i>Vensim</i> é capaz de simular os efeitos das políticas de TWR em questões de transporte rodoviário, como fluxo de carga, fluxo de tráfego de camiões, desempenho do pavimento, capacidade de transporte rodoviário, tempo de transporte e dos custos envolvidos. As conclusões do estudo podem ajudar o governo local a projetar políticas de TWR adequadas para alcançar a sustentabilidade do HTCT.
(Haghshenas et al., 2015)	Analisaram os impactos ambientais, económicos e sociais de diversas políticas de transporte no Isfahan (Irã). O modelo de DS desenvolvido pelos autores apresenta a gestão de viagens, a divisão modal, a oferta de transporte e o equilíbrio entre oferta e procura de transporte. Os autores concluíram que o desenvolvimento de redes de transporte (incluindo metro, comboio e bus) foi apontado como o melhor cenário sustentável, enquanto que a construção de estradas e estacionamento foi apontado como o pior cenário.
(Barisa et al., 2015)	Neste artigo, os autores desenvolvem um modelo de simulação dinâmica para analisar o comportamento do mercado de biodiesel na Letônia com objetivo de encontrar as

	estratégias políticas mais eficazes. Os resultados obtidos pelas simulações no modelo, confirmam que promover o uso de biocombustíveis nos utilizadores finais é a principal forma de alcançar os objetivos da política nacional de transportes.
(Linares et al., 2017)	Os autores testaram uma ferramenta desenvolvida em CitScale com objetivo de visualizar, analisar e comparar os impactos dos novos conceitos de mobilidade Urbana na cidade de Barcelona, dando especial ênfase aos veículos inovadores com vista a redução dos impactos ambientais. Foram testados diferentes modelos de simulação de tráfego com diferentes finalidades, a Plataforma provou ser muito útil no apoio à análise de resultados para os diferentes projetos experimentais, sendo uma ferramenta flexível que permite economizar muito tempo aos analistas de tráfego.
(Sayyadi & Awasthi, 2017)	Os autores avaliam o impacto das políticas de planeamento de transporte sustentável. Utilizando dados hipotéticos, analisam políticas relacionadas com a partilha de viagens, a propriedade de carro e ao incentivo de viagens realizadas por transporte público. Os resultados apontam que as políticas de restrição a propriedade de carros têm mais influência do que as políticas de incentivo ao transporte público, as políticas de propriedade de carros diminuem a tendência de viagens por veículos privados e aumenta as viagens de transporte público. Por fim, observa-se que a partilha de viagens é mais eficiente na redução do congestionamento, do consumo de combustível e das emissões do que as políticas de propriedade de carros.
(Elbert et al., 2017)	Os autores desenvolveram uma ferramenta de simulação em <i>AnyLogic</i> para analisar e estudar o impacto dos diferentes tempos de expedição de encomendas de uma empresa alemã dedicada ao transporte de contentores. A pesquisa mostrou que a integração das tecnologias de informação e comunicação (TIC) pode originar uma vantagem competitiva e melhorar a eficiência do processo nas cadeias de transporte. O modelo de simulação mostrou ainda que em áreas com uma grande participação de trabalho manual, vale a pena analisar os efeitos (negativos) da troca inicial de informações.
(Gerrits et al., 2013)	Os autores desenvolveram um modelo de simulação baseada em agente (ABS) escalável e flexível para o planeamento e controle de AGVs em terminais de contentores automatizados (ACTs). O simulador é capaz de controlar todas as operações no cais de um contentor sendo uma ferramenta útil para testar a eficácia (em termos de tempo de retorno da embarcação) do controlo baseado em agente para diferentes tipos e layouts de terminais.
(Arnold et al., 2018)	O objetivo do estudo é analisar a estrutura de custos da distribuição B2C de última geração na cidade de Antuérpia – Bélgica. Os autores simularam o cenário que trata de entregas ao domicílio realizadas por furgões, e mais três cenários: uso de <i>Collection-and-Delivery Points</i> (CDP), o uso de bicicletas de carga e um sistema híbrido. Pela comparação dos diferentes cenários, o transporte com furgões representa 18 a 28% dos custos operacionais e que o sistema híbrido foi identificado como o cenário com melhores resultados em termos de custos operacionais e externos.
(Alves et al., 2019)	Os autores avaliaram o recurso às Estações de Entrega Automática (EEA) como solução para entregas ao domicílio no Brasil, considerando o comportamento e a interação entre os <i>stakeholders</i> do e-commerce. A maioria das entregas são assistidas ao domicílio (EAD) dando origem a muitas entregas falhadas e tentativas de reentrega. Foram simulados quatro cenários, variando a implementação da EEA e a exclusão das tentativas de devolução, concluindo-se que as EEA reduzem em 46% as distâncias percorridas pelos camiões e trazem melhorias em termos de redução de segundas entregas.
(Vecchio et al., 2019)	Neste artigo, os autores visam demonstrar que a DS pode apresentar uma abordagem útil para otimizar a tomada de decisão no contexto de cidade inteligente no que respeita à mobilidade. O modelo conceitual é construído utilizando os princípios da metodologia de DS e é baseado em relações de feedback causal entre os diversos fatores relacionados às diferentes necessidades de mobilidade. O estudo apresentou um modelo de simulação de DS de mobilidade inteligente de pessoas; ilustrando seis cenários possíveis com fatores específicos que afetam a probabilidade desses cenários no objetivo final de desenvolver uma plataforma completa alimentada por <i>Big Data</i> .
(Inturri et al., 2019)	Os autores apresentaram um modelo capaz de simular serviços flexíveis de transporte partilhado para apoiar o planeamento e desenho estratégico, simulando o seu

	funcionamento em contexto real, tendo sido testado o comportamento macroscópico do sistema a partir da interação entre passageiros e veículos, na cidade de Ragusa, Itália. Os resultados mostram que a qualidade e o desempenho do serviço variam muito em relação ao número e à capacidade dos veículos, assim como atribuir veículos a rotas específicas, reduz as distâncias percorridas em vazio e melhora o desempenho geral do sistema.
(Singh et al., 2020)	Os impactos do COVID-19 são observados de forma ubíqua em todos setores devido aos confinamentos impostos para mitigar a pandemia. Estes autores desenvolvem um modelo de simulação da rede do sistema público de distribuição na Índia com três cenários diferentes para demonstrar interrupções na cadeia de abastecimento de alimentos, medicamentos, EPIs e outros produtos essenciais. Através do modelo de simulação, os autores calcularam o tempo de espera esperado (ELT) para os 3 cenários; propondo um plano de ação para lidar com interrupções nos abastecimentos causados pela pandemia.
(Mutanov et al., 2020)	Este artigo apresenta uma abordagem para melhorar os processos logísticos de distribuição na cadeia de abastecimento com a modelação utilizando a DS, de dois cenários de processos diferentes: a estrutura do processo de recebimento e processamento de pedidos em empresas de comércio de pequeno e médio porte do Cazaquistão que distribuem produtos para lojas independentes (ponto de entrega). Os autores utilizaram o software de simulação "Vensim" para cálculo de um modelo dinâmico do sistema para estudar 2 cenários, obtendo-se resultado notável na melhoria da velocidade de conclusão do pedido de 4,85 para 0,33 horas de trabalho.
(Silva et al., 2021)	Neste estudo, os autores desenvolveram uma ferramenta de apoio à decisão baseada em um modelo de simulação para apoiar a produção de malhas e tecidos adamscados. A ferramenta foi utilizada para testar diferentes estratégias de controle de fluxo de materiais, desde o armazém de matéria-prima ao armazém de produto acabado, podendo também ser utilizado para avaliar os impactos dessas estratégias na produtividade.

O software *Vensim*[®] desenvolvido pela *Ventana Systems*, é muito útil para simulação de processos contínuos e dinâmicos como é o caso dos transportes e é utilizado na resolução de problemas de gestão e apoio à decisão. Este software pode ser programado em qualquer linguagem e permite a importar modelos desenvolvidos em outros softwares usados na modelação e simulação (Ristić et al., 2016).

Vários autores recorreram ao software *Vensim* para desenvolver modelos de simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão em diversas áreas de negócio, Sá et al. (2021) e Sá et al. (2022) desenvolveram um modelo de apoio à decisão suportado no *Vensim* para auxiliar os produtores e gestores de empresas do setor de vinhos, nas suas decisões estratégicas e táticas quanto ao preço do vinho, considerando as variáveis que podem interferir no preço.

3. SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO DESENVOLVIDO

Este capítulo foca-se na apresentação do modelo desenvolvido. Será efetuada uma breve introdução geral sobre o que foi feito, assim como os métodos e materiais utilizados e explanados os principais problemas que o setor de transporte apresenta, bem como os parâmetros que influenciam o transporte de mercadorias e os custos associados, seguindo-se o modelo conceptual. É ainda apresentada uma breve explicação das variáveis incluídas no modelo e o diagrama de *stock-flow* e por fim, é efetuada a validação do modelo tendo por base um caso real e serão apresentados os principais resultados disponibilizados pelo modelo.

3.1. Introdução Geral

A gestão e decisão do transporte consiste num planeamento atempado das tarefas com a finalidade de realizar uma previsão das necessidades de movimentação de produtos de forma a evitar atrasos nas entregas ocasionada pela sazonalidade e variação da procura do mercado, garantindo assim um serviço ininterrupto de elevada qualidade de serviço aos clientes.

Qualquer erro ou falha no planeamento ou a falta deste, pode representar atrasos e custos adicionais, além de afetar negativamente a imagem da organização perante o mercado e os seus clientes. O transporte está relacionado ao tempo, cumprir com as atividades nos prazos acordados demonstra eficiência e flexibilidade, os atrasos revelam ineficiência, acarretam custos e interferem no relacionamento e na confiança do cliente. O mercado é cada vez mais volátil e incerto, o stock de mercadorias por longos períodos representa capital intensivo e está relacionado a riscos de valor (por exemplo, deterioração, queda de preço ou perda de clientes) e por estes motivos, muitos fabricantes e comerciantes desejam receber os seus produtos "na hora certa" para evitar os riscos relacionados, originando num grande aumento de remessas, impondo redes de agrupamento sincronizadas e confiáveis, agrupando remessas de e para vários locais.

Este trabalho tenta avaliar o impacto da variação da carga, causada por fatores como taxa de crescimento expectável, sazonalidade, entrada ou saída de clientes, crises económicas ou pandémicas, na necessidade de recursos ajustados a atividade de forma dinâmica assim como o peso dos custos de toda operação por forma a medir e controlar a rentabilidade e sustentabilidade da atividade assegurando elevados níveis de serviço.

Como refere Dundović et al. (2009) e Dvornik et al. (2006), a dinâmica de sistemas proporciona uma visão global de todo o sistema para o planeamento de transportes. Assim, recorreu-se à dinâmica de sistemas para criar uma ferramenta de apoio à gestão que ajude os operadores de transporte de mercadorias na tomada de decisões e que, seja flexível para se ajustar às necessidades de cada empresa, sendo o principal objetivo do processo de modelação do sistema, comparar resultados de vários cenários de forma obter a máxima informação na decisão.

As variáveis de entrada do modelo foram definidas, não só pela análise da literatura, mas também através do conhecimento e análise do sistema real de uma empresa do setor para melhor compreender ou prever o comportamento do sistema ou processo modelado, tal como refere Rodič (2017), permitindo assim aproximar o modelo da realidade e criar cenários com dados históricos. O programa escolhido para responder aos problemas referidos, foi o software *Vensim* desenvolvido

pela *Ventana Systems*, muito útil para simulação de processos contínuos e dinâmicos, é utilizado na resolução de problemas de gestão e apoio à decisão.

3.2. Métodos utilizados

O presente estudo tem como objetivo, a construção de uma ferramenta de apoio à decisão que suporte gestores de transporte a tomar decisões sobre as necessidades de recursos para melhor responder às variações da atividade assegurando o nível de serviço pretendido a custos controlados. Para conseguir este objetivo, foi seguida a metodologia descrita na figura 13.

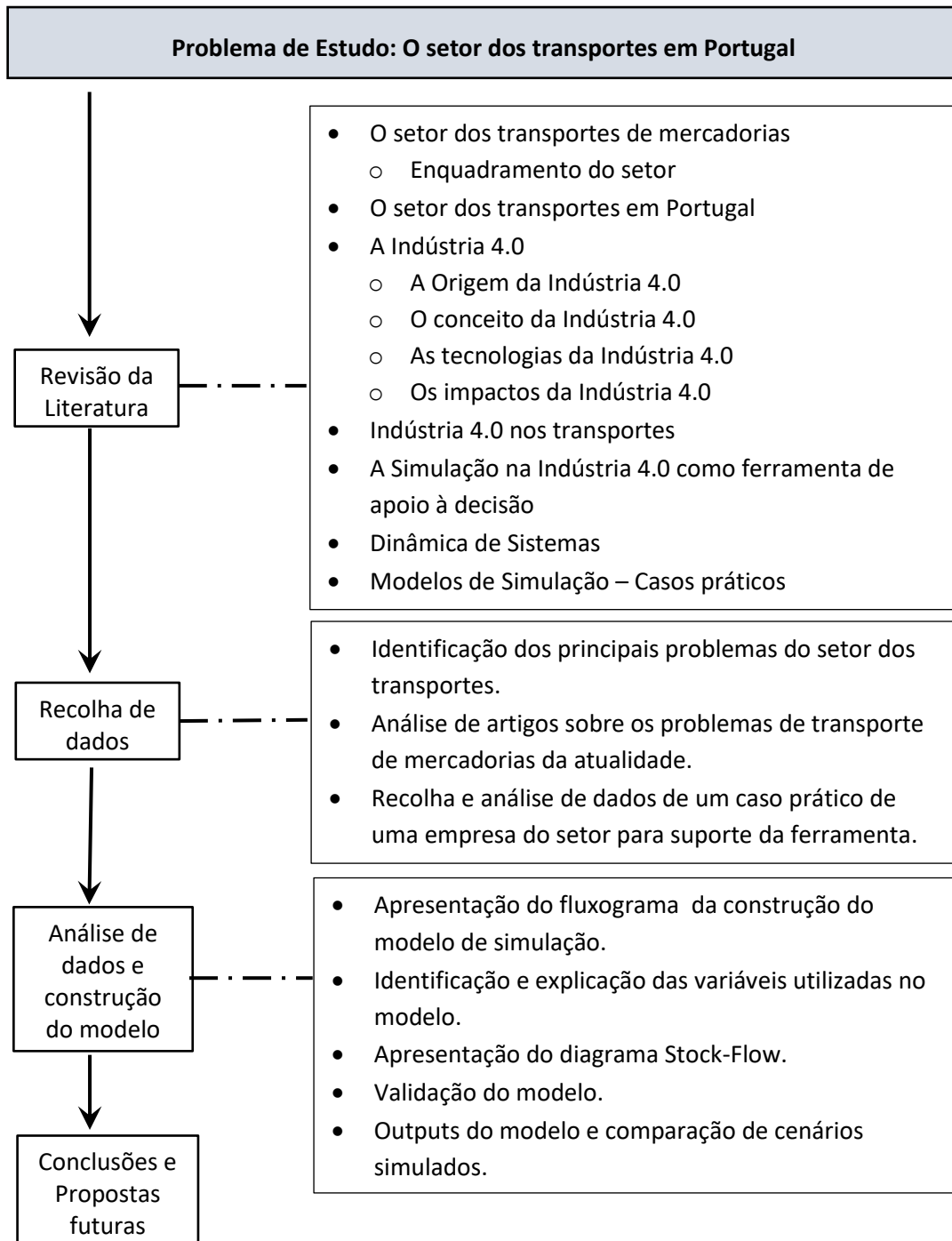


Figura 13 - Fluxograma da metodologia do trabalho. Fonte própria

3.3. Sistema de apoio à decisão desenvolvido

3.3.1. Os principais problemas do setor dos transportes

Existem diversas opções para transporte de mercadorias. Uma das opções mais eficaz, é o transporte por grupagem que consiste na consolidação de mercadorias de vários clientes na mesma direção ou rota. Este método de transporte é benéfico para clientes e transportadoras. Em comparação com os outros métodos, para os clientes, esta é a forma mais rentável e mais rápida de entregar uma pequena carga de um ponto para outro (Bakhtadze et al., 2020).

No moderno e altamente competitivo sector dos transportes, os transportadores reduzem os seus custos de atividade explorando diferentes modos (auto execução e subcontratação). Para auto execução utilizam os seus próprios veículos para efetuar os pedidos e na subcontratação recorrem a veículos externos de outros transportadores ou pequenos agentes (Krajewska & Kopfer, 2006). Estes autores estudaram de que forma uma empresa de transporte rodoviário pode otimizar o seu plano de distribuição, decidindo quais serviços são tratados com veículos próprios e quais são atribuídos a empresas subcontratadas.

Face ao atual processo de globalização, os grandes transportadores internacionais, são mais competitivos que as pequenas empresas devido à sua carteira de clientes e à vasta disponibilidade de recursos obtendo assim vantagem competitiva. Além disso, a estrutura das grandes empresas de transporte de mercadorias contemplam filiais que operam de forma autónoma, que devem no entanto, cooperar no sentido de aumentar o lucro global no negócio. A solução para as empresas transportadoras de média e pequena dimensão, passa por estabelecer coligações para alargar a sua carteira de recursos e reforçar a sua posição no mercado.

Devido à forte concorrência do mercado e uma procura crescente por "transporte verde", os operadores no setor de transporte rodoviário procuram intensamente obter meios adicionais para aumentar a eficiência dos seus processos de atendimento. A maioria das empresas transportadoras de carga, tem que lidar com uma procura fortemente flutuante, que varia consideravelmente ao longo do tempo. Além das flutuações de longo prazo, os transportadores precisam de gerir as variações diárias da procura pelo serviço de transporte (Kopfer et al., 2011). Para estes autores, a eficiência da resposta à procura de transporte pode ser significativamente melhorada pela possibilidade de subcontratação de transportadoras externas e parcerias entre transportadores.

Também os autores Krajewska e Kopfer (2006) defendem que quando a procura total é maior do que toda a capacidade dos camiões próprios, os gestores devem considerar a utilização de subcontratação. A integração do modo de realização no planeamento do transporte conhecido como planeamento operacional integrado, pode trazer economias de custos significativas para a empresa, porque podem ser geradas melhores soluções com custos mais controlados.

No presente projeto, para desenvolver o modelo de simulação de apoio à decisão, foi considerada uma variável para simulação da carga diária com base nos dados históricos da atividade de uma empresa do setor, crescimento ou redução de carga mediante a entrada ou saída de clientes e, é também considerada uma taxa de variação da procura ao longo do ano em função de registos históricos ou fenómenos adversos como crises económicas ou outras.

3.3.2. Fator de carga e o peso taxável no transporte rodoviário

O fator de carga de um veículo é definido como a razão entre a carga e a capacidade total do veículo, que pode ser definida pelo peso ou pelo volume e representa uma medida de desempenho da eficiência do transporte em termos de quantidade de mercadorias carregadas em um veículo (Ni & Wang, 2021). Como medida de fator de carga, as empresas de transporte em grupagem utilizam a carga volumétrica que é a proporção do espaço cúbico no veículo ocupado por determinada carga e assim determinam o peso taxável como forma de faturar os serviços oferecidos na entrega das mercadorias.

O peso taxável é calculado na melhor relação do peso volumétrico e do peso bruto da mercadoria a transportar. O peso volumétrico é uma medida da densidade do envio, isto é, do espaço (volume) que a mercadoria ocupa relativamente ao que pesa, ou seja:

$$\text{Peso Volumétrico (kg)} = \text{volume (m}^3\text{)} \times \text{fator peso (kg)}.$$

Assim, o peso taxável ou peso faturável, calcula-se a partir do maior valor entre o peso bruto e o peso volumétrico, desta forma, os transportadores faturam os serviços de carga fracionada em função do que a mesma pesa ou ocupa. Cada transportador, tem a sua própria equivalência, face à sua atividade e margem operacional que precisa obter. No transporte rodoviário, o aumento do fator de carga é crucial para a eficiência do transporte e beneficia os transportadores devido ao seu potencial para reduzir o impacto ambiental e os custos de transporte.

Face ao impreterível controlo dos custos, os transportadores devem estimar os custos totais de distribuição pela carga transportada em peso e por remessa ou stop, para desta forma poderem assegurar a sua margem operacional através da redefinição da sua atividade e/ou negociação de tarifas junto dos seus clientes. Um dos principais desafios da gestão de operações, é minimizar os custos de transporte e, ao mesmo tempo, atender aos níveis adequados de satisfação do cliente (Hanbazazah et al., 2019).

Esta preocupação com os custos de transporte é alvo de vários estudos, os autores Brabänder e Braun (2020) desenvolveram um esquema de cálculo para os custos de distribuição por remessa de acordo com princípio de custo por causa, propuseram estimar os custos totais das rotas de distribuição, excluindo e incluindo um novo expedidor, estimando os custos marginais por remessa e por expedidor.

3.3.3. Fatores de custo do Transporte Rodoviário de Carga

A gestão de custos é importante para todas as empresas de transporte. O aumento da concorrência no transporte rodoviário de cargas obriga as empresas a ter uma boa relação custo-benefício e por isso, precisam conhecer os seus custos de execução do serviço de transporte. O custo de transporte de carga tornou-se um dos indicadores económicos mais importantes da eficiência da cadeia de abastecimento (Izadi et al., 2020). Os custos de transporte têm impactos significativos na estrutura das atividades económicas bem como no comércio internacional. A evidência empírica sublinha que aumentar os custos de transporte em 10% reduzem os volumes de comércio em mais de 20% (Rodrigue et al., 2016).

A gestão dos custos nas empresas de transporte representa assim um problema crucial para o seu funcionamento eficiente. As empresas que atuam no mercado apresentam diferenças e por isso devem analisar a sua estrutura de custos em função da sua dimensão (Kot, 2015). Os custos de transporte são uma medida monetária do que o operador de transporte deve pagar para produzir serviços de transporte. Estes custos podem-se dividir em custos fixos (infraestruturas e veículos) e variáveis (em função da atividade), dependendo de um conjunto de condições relacionadas à geografia, infraestrutura, barreiras administrativas, energia e o modo como as cargas são transportadas (Rodrigue et al., 2016).

Os custos fixos representam os custos associados às infraestruturas (rendas, amortizações, seguros e taxas), aos veículos (depreciações, registos, seguros, taxas) e parte dos custos associados aos Motoristas. Adicionalmente também são incluídos custos indiretos da empresa (por exemplo: custos de gestão, serviços financeiros, custos ambientais, etc) (Bokor & Markovits-Somogyi, 2015).

Do ponto de vista da eficiência, os custos fixos obrigam as empresas transportadoras a assegurar a máxima produção possível (boa performance de toneladas de carga entregue por quilómetros realizadas) por forma de diluir os custos fixos pelo serviço realizado.

Os custos variáveis estão associados aos fatores que alteram com atividade, como quantidade de carga movimentada que obriga a ajustes na estrutura assim como à quilometragem percorrida pelas viaturas. Na estrutura dos custos variáveis, os mais importantes são os custos com combustíveis, portagens, subcontratação e parte da mão-de-obra que varia com atividade assim como os prémios produtividade.

Os custos totais representam a soma dos custos fixos com os variáveis e o seu aumento depende essencialmente das características dos custos variáveis que podem ser crescentes, proporcionais ou decrescentes face à atividade. Do ponto de vista do negócio do transporte por grupagem, o custo médio por quilómetro percorrido e o custo médio por peso (kg) transportado são indicadores importantes pois mostram a dependência dos custos totais do volume de negócios. Para o custo médio diminuir com o volume de negócios, requer que as empresas de transporte maximizem a utilização da frota. O controlo de custos não é possível sem conhecer todos os custos da empresa envolvidos nas operações (Sternad, 2018).

A imputação dos custos, requer decomposição dos custos diretos e indiretos (Jacyna & Wasiak, 2015), atendendo se os custos tem ligação direta ou indireta com o fator de custo e se são determinados de acordo com a economia das operações.

No presente trabalho vão ser seguidos os seguintes critérios para a classificação dos custos que são assim divididos em custos indiretos e custos diretos fixos e variáveis, existindo dois critérios utilizados simultaneamente: variabilidade e a origem dos custos (figura 14). Os custos indiretos não serão considerados no presente trabalho.

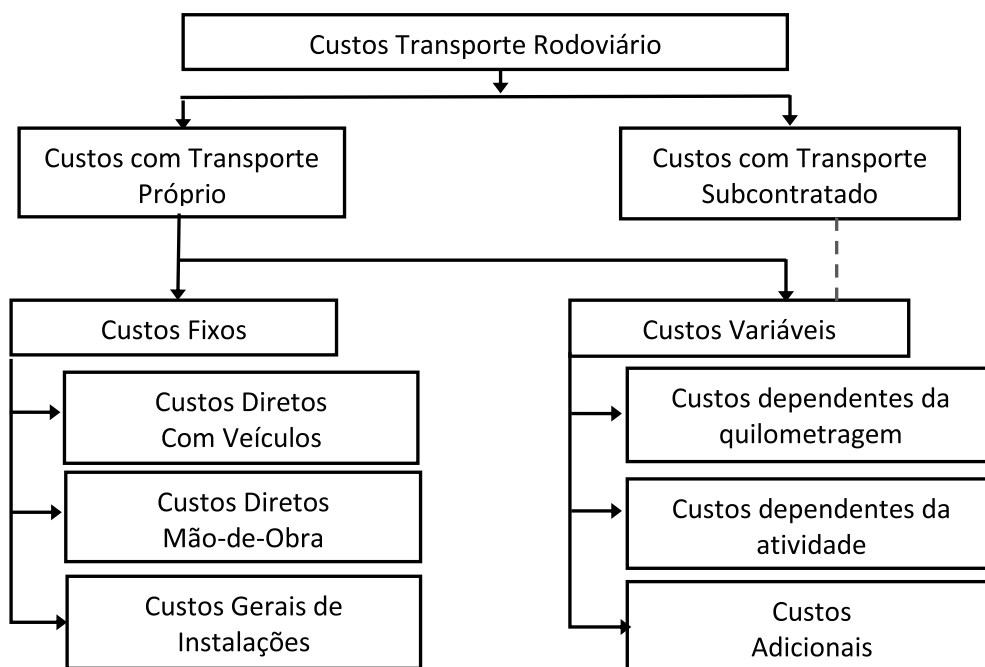


Figura 14 - Classificação geral dos custos de transporte rodoviário. Fonte: adaptado de (Jacyna & Wasiak, 2015)

Os custos variáveis no transporte rodoviário abrangem os custos que dependem da quilometragem média percorrida pelos veículos ou do tempo de trabalho, bem como custos variáveis adicionais resultantes do carácter específico de tarefa de transporte que não pode ser diretamente relacionada com a quilometragem ou tempo de trabalho. O tipo de custos fixos e variáveis considerados no presente trabalho estão referidos na tabela 5.

Tabela 5 - Tipo de custos fixos e variáveis no transporte rodoviário.

Custos Fixos no transporte Rodoviário	Custos Variáveis no transporte Rodoviário
Custos Fixos com Veículos: - Custos do financiamento de veículos (leasing), - Custos com desgaste veículos (depreciação), - Custo com seguros de veículos, impostos de circulação e Licenças.	Custos Variáveis dependentes da quilometragem: - Custo do consumo de combustível, - Custos com pneus, - Custos de manutenção e reparações técnicas.
Custos Fixos Mão-de-Obra: - Custos com motoristas (salários e formação), - Custos com operadores fixos, - Custos de BackOffice e Administração.	Custos Variáveis dependentes da atividade: - Custo com subcontratação de mão-de-obra, - Custo aluguer de equipamentos.
Custos Fixos Gerais com Instalações: - Custo com crédito ou renda de Instalações, - Custos com seguro e manutenção instalações, - Custos com TI e licenças, - Custos com qualidade.	Custos Variáveis Adicionais: - Custos com portagens, - Custos com energia e água, - Custos com consumíveis.

No caso dos custos fixos com veículos através do financiamento para compra de veículos, pode incluir custos com *leasings*, aluguer operacional ou o custo de depreciações (em caso de compra de veículos a partir de capitais próprios). Em ambos os casos, estes custos estão diretamente relacionados com o valor do veículo e custo de capital (externo ou próprio).

3.3.4. Modelo Conceptual

Neste ponto será explanado o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão baseado em modelos de simulação. A Figura 15 apresenta o fluxograma com os passos seguidos para a construção do modelo.

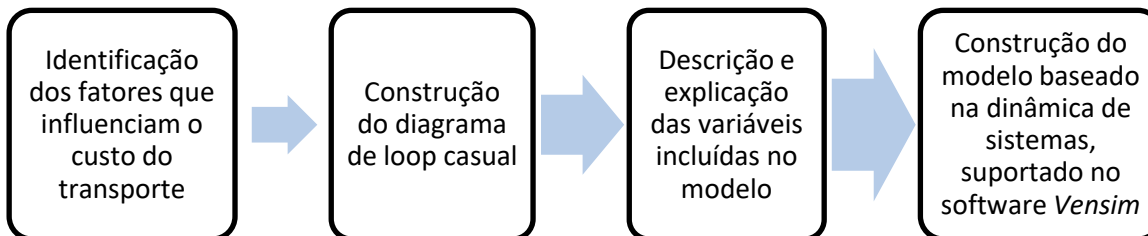


Figura 15 - Fluxograma da construção do modelo baseado em dinâmica de sistemas.

Na concepção do modelo, pretende-se formular os pressupostos que explicam a dinâmica do sistema real modelado e que evidencie as relações de causa e efeitos entre as variáveis consideradas. Os modelos de simulação podem dar percepções detalhadas sobre os comportamentos e desempenhos dos sistemas (Gingu et al., 2017). A simulação constitui um instrumento que proporciona ao utilizador a possibilidade de desenvolver um modelo baseado em um sistema real, prevendo ações decorrentes de dados previamente coletados (Silva et al., 2021).

Face análise do caso real da empresa e dos dados recolhidos, o modelo contempla as seguintes variáveis: carga semanal resultante da carga diária (com base em dados anteriores) e da variação de carga por entrada ou saída de clientes, taxa de oscilação da procura de mercado (dados históricos e dados de consumo), número de camiões da frota própria, peso médio entregue por camião, capacidade estimada de distribuição da frota própria, Inventário (diferença entre os valores da carga simulada e a capacidade distribuição da frota); camiões subcontratados, custo semanal da frota própria, custo depreciação dos camiões, custo com seguros dos camiões, custo total da distribuição, custo da distribuição por tonelada, vencimento dos motoristas, coeficiente salarial, custos de formação, custos com combustível, média de consumo por camião (L/100km), quilometragem média por camião, preço do combustível, custo médio de manutenção por camião, custo de manutenção por km, custo dos pneus por km, custos mensais com portagens, custo mensal com mão-de-obra, número de trabalhadores fixos, trabalhadores necessários em função da atividade, fator de carga por trabalhador, número trabalhadores subcontratados (*outsourcing*), salário médio mensal, coeficiente salarial, coeficiente do trabalho em *outsourcing*, custos com BackOffice, custos mensais com empilhadores, necessidade de empilhadores em função da atividade, empilhadores fixos, fator de carga por empilhador, custo aluguer por empilhador, custo mensal dos empilhadores, custo mensal do armazém, renda ou crédito do armazém, custo com segurança e manutenção das Instalações, custo com energia e água, custo com consumíveis, custo mensal com licenças, custo da qualidade (incidências de carga danificada), custo operacional semanal e por tonelada de carga manuseada em armazém.

Apesar do modelo ter sido desenvolvido tendo por base um caso real de uma empresa com mais de três décadas de atividade no setor dos transportes, pretende-se que seja ajustável à realidade de qualquer empresa do setor. Como se observa na figura 16, algumas variáveis são transversais a todas organizações do setor como são exemplos: o vencimento dos motoristas, vencimentos de operadores de armazém, coeficientes salariais, o preço por litro de combustível. Para outras

variáveis, os valores devem ser ajustadas a cada organização em função dos dados , como por exemplo: média de entregas diárias por camião, médias de combustível da frota, custo manutenção por km e custo desgaste pneus por km (ambos dependem das marcas e dos contratos negociados), custos adicionais com reparações e com portagens onde é inserido um fator de utilização de estradas com portagens a definir por cada empresa, custos com seguros viaturas (varia de empresa para empresa em função da taxa sinistralidade), custo com depreciações, custo com alugueres de longa duração, custo de viaturas subcontratadas, custo com mão-de-obra subcontratada, custo com equipamentos pois dependem da marca e contratos de aluguer assim como os custos com Instalações pois dependem do valor da renda ou crédito em função da zona geográfica, das áreas e condições das instalações, custos com energia, manutenção e consumíveis e os custos com licenças e tecnologias de informação.

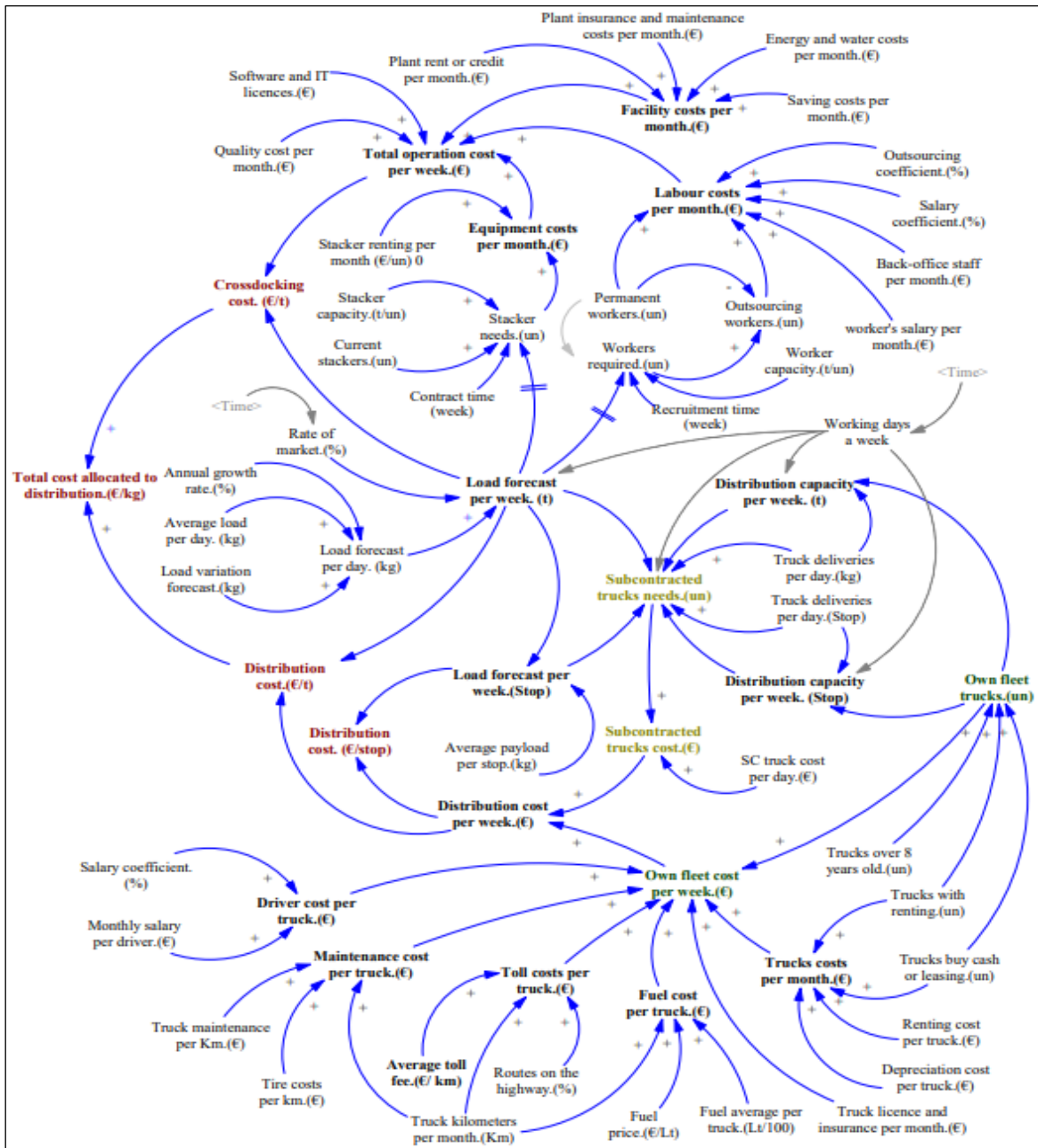


Figura 16 - Diagrama de Loop Casual

3.3.5. As variáveis do modelo

No presente projeto, para simular o modelo composto por 2 stocks e 70 variáveis, é conveniente referir as relações que existem entre as variáveis selecionadas, para isso, nas tabelas 6 e 7 estão discriminadas as fórmulas utilizadas na criação do modelo e a descrição de cada variável utilizada no modelo.

Tabela 6 - Explicação das variáveis do modelo. Fonte própria

VARIÁVEL	EQUAÇÃO	DESCRIÇÃO
Load forecast per week (t)	$Load\ forecast\ per\ day\ (kg) / 1000 * (1 + Rate\ of\ market\ (%)) * Working\ days\ per\ week$	A simulação da carga semanal (toneladas) depende da carga diária simulada, da sazonalidade do mercado e dos dias úteis de cada semana.
Load forecast per week (Stop)	$INTEGER(Load\ forecast\ per\ week\ (t) / (Average\ payload\ per\ stop\ (kg) / 1000))$	A número de entregas (Stops) depende da carga semanal e da carga média por cliente (Stop).
Average payload per stop (kg)	Constante definida pelo utilizador	A carga média por cliente (Stop) deve ser definida com base nos dados registados em períodos anteriores.
Distribution capacity per week (t)	$Own\ fleet\ trucks\ (un) * (Truck\ deliveries\ per\ day\ (kg) / 1000) * Working\ days\ per\ week$	Capacidade de distribuição semanal (toneladas) com a utilização de viaturas próprias (frota própria).
Distribution capacity per week (Stop)"	$Own\ fleet\ trucks\ (un) * Truck\ deliveries\ per\ day\ (Stop) * Working\ days\ per\ week$	Capacidade de distribuição semanal (Stops) com a frota própria.
Truck deliveries per day (Kg)	Constante definida pelo utilizador	Capacidade média de entregas (kg) por Camião a definir por cada empresa com base em dados registados e experiência.
Truck deliveries per day (Stop)	Constante definida pelo utilizador	Representa a média de clientes (Stops) diários que cada viatura consegue fazer.
Load forecast per day (kg)	$Average\ load\ per\ day\ (kg) * (1 + Annual\ growth\ rate\ (%)) + Load\ variation\ forecast\ (kg)$	A simulação da carga diária é a carga média diária real de período anterior acrescida da taxa de crescimento expectável e da variação de carga por entradas ou saídas de clientes.
Rate of market (%)	Constante definida pelo utilizador	Sazonalidade da atividade ao longo do ano registada no mercado onde cada empresa atua.
Average load per day (kg)	Constante definida pelo utilizador	Varia consoante a realidade de cada empresa e os dados que pretenda simular.
Annual growth rate (%)	Constante definida pelo utilizador	É a taxa de crescimento anual definido por cada empresa.
Load variation forecast (Kg)	$DELAY1I(STEP(Load\ increase - new\ clients\ (kg) - Load\ reduction - loss\ clients\ (kg), Step\ week\ to\ start), Load\ variation\ time, 0)$	A variação da carga depende do aumento ou redução de carga por entrada ou saída de clientes. Estes efeitos não são imediatos e tem início em determinado período, daí serem conjugados na fórmula, com um <i>Delay</i> e com um <i>Step</i> .

Load variation time	Constante definida pelo utilizador	Número semanas indicadas para refletir o efeito da variação da carga - <i>Delay</i> .
Step week to start	Constante definida pelo utilizador	Semana indicativa no modelo para a entrada ou saída de clientes.
Load increase - new clients (Kg)	Constante definida pelo utilizador	Aumento de carga por entrada de novos clientes ou outros efeitos económicos.
Load reduction – loss clients (Kg)	Constante definida pelo utilizador	Redução de carga por saída de clientes ou outros efeitos económicos.
SC truck cost per day (€)	Constante definida pelo utilizador	Valor da diária paga por um Camião subcontratado incluindo motorista.
Subcontracted trucks needs (un)	<i>IF THEN ELSE((Distribution capacity per week (t)>Load forecast per week (t):AND: (Distribution capacity per week (Stop)>Load forecast per week (Stop))), 0, MAX (INTEGER(((Load forecast per week (t)-Distribution capacity per week (t))/(Truck deliveries per day (kg)/1000))/Working days per week),INTEGER (((Load forecast per week (Stop)-Distribution capacity per week (Stop))/"Truck deliveries per day (Stop)) /Working days per week)))</i>	Necessidade de subcontratação de Camiões em função do stock (<i>Inventory</i>), ou seja, carga sobranete. O cálculo é efetuado pela relação entre a carga simulada e a capacidade de entrega das viaturas, sendo considerado o valor máximo obtido no parâmetro peso (toneladas) ou Stops. Como não se aplica subcontratação negativa (sempre que a capacidade de distribuição é superior à carga simulada), recorreu-se a função <i>IF THEN ELSE</i> na fórmula.
Subcontracted trucks cost (€)	<i>Subcontracted trucks needs (un)*Truck cost per day (€)</i>	Custo com a subcontratação de Camiões necessários para atividade.
Own fleet trucks (un)	<i>Trucks buy cash or leasing (un)+Trucks with renting (un)+Trucks over 8 years (un)</i>	Composição da frota através da soma dos Camiões alugados, comprados e com amortização de capital ou já amortizados (com mais de 8 anos).
Trucks with renting (un)	Constante definida pelo utilizador	Quantidade de camiões em regime de aluguer longa duração.
Trucks buy cash or leasing	Constante definida pelo utilizador	Quantidade de camiões comprados a leasing ou pagos a pronto.
Trucks over 8 years old (un)	Constante definida pelo utilizador	Quantidade de camiões com mais de 8 anos, já sem depreciações.
Renting cost per truck (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo médio mensal de aluguer por Camião.
Depreciation cost per truck (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo da desvalorização do Camião, valor da compra amortizado em 8 anos.
Truck costs per month (€)	<i>Trucks buy cash or leasing (un)*Depreciation cost per truck (€)+Trucks with renting (un)*Renting cost per truck (€)</i>	Custo total de aquisição e de aluguer de Camiões.
Renting cost per truck (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo médio de aluguer do Camião em regime de aluguer longa duração (ALD)
Depreciation cost per truck (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo depreciação do Camião, é o valor médio aquisição amortizado em 8 anos.

Truck licence and insurance per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo mensal das licenças de circulação, alvará e custo médio do seguro por Camião.
Truck kilometers per month (Km)	Constante definida pelo utilizador	Representa a distância que cada Camião percorre em média por mês. Valor obtido com base nos registos de cada empresa.
Fuel average per truck (Lt/100)	Constante definida pelo utilizador	Consumo médio de um Camião, valor indicado pelo fabricante ou obtido pelos registos de cada empresa.
Fuel price (€/Lt)	Constante definida pelo utilizador	Preço médio do combustível por litro dos últimos 3 meses.
Fuel cost per truck (€)	$Truck\ kilometers\ per\ month\ (Km)/100 * Fuel\ average\ per\ truck\ (Lt/100) * Fuel\ price\ (€/Lt)$	Custo mensal com combustível por Camião que é o produto da quilometragem média feita por Camião pelo preço médio do combustível.
Average toll fee (€/km)	Constante definida pelo utilizador	Taxa média de portagem por quilometro de autoestrada e por classe de viatura.
Routes on the highway (%)	Constante definida pelo utilizador	Percentagem estimada de percursos feitos em estradas com portagens das rotas dos Camiões.
Toll costs per month(€)	$Truck\ kilometers\ per\ month\ (Km) * Average\ toll\ fee\ (€/km) * Route\ on\ highway\ (%)$	Custo mensal médio estimado com portagens por Camião.
Tire costs per Km	Constante definida pelo utilizador	Custo médio do desgaste de pneus por km, estimado por cada empresa ou mediante contrato de substituição pneus.
Truck maintenance per Km (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo médio com manutenção por km, estimado por cada empresa ou mediante contrato de manutenção.
Maintenance cost per truck (€)	$Truck\ kilometers\ per\ month\ (Km) * (Tire\ costs\ per\ km\ (€) + Truck\ maintenance\ per\ Km\ (€))$	Custo de manutenção mensal calculado por Camião em função da quilometragem percorrida e do custo médio definido ao km.
Monthly salary per driver (€)	Constante definida pelo utilizador	Vencimento de Motorista a definir por cada empresa ou em função do contrato coletivo de trabalho.
Salary coeficiente (%)	Constante definida pelo utilizador	Coefficiente aplicar ao vencimento mensal para incorporar os proporcionais de férias, subsídios, seguros de trabalho, custos com formação e prémios produtividade.
Driver cost per truck (€)	$Monthly\ salary\ per\ driver\ (€) * Salary\ coefficient\ (%)$.	Custo médio mensal total por motorista que inclui o vencimento médio legal considerando o coeficiente para incluir subsídios e seguros de trabalho, custo com prémios e custos com formação.
Own fleet cost per week (€)	$(Own\ fleet\ trucks\ (un) * (Driver\ cost\ per\ truck\ (€) + Fuel\ cost\ per\ truck\ (€) + Maintenance\ cost\ per\ truck\ (€) + Toll\ costs\ per\ month(€) + Truck\ insurance$	Custo mensal total da frota própria, que inclui os custos de aquisição e de aluguer de Camiões, despesas com combustíveis, com portagens, com a manutenção, custos de licenças e seguros e o custo da mão-de-obra dos Motoristas.

	$per\ month\ (\text{€}) + Trucks\ costs\ per\ month\ (\text{€}) * 12/52$	
Distribution cost per week (€)	$Own\ fleet\ cost\ per\ week\ (\text{€}) + Subcontracted\ trucks\ cost\ (\text{€})$	Custo mensal total com a distribuição onde está incluído o custo com subcontratação.
Distribution cost (€/t)	$Distribution\ cost\ per\ week\ (\text{€}) / Load\ forecast\ per\ week\ (t)$	Representa o custo médio de distribuição por tonelada de carga a entregar. Indicador operacional importante na gestão de uma empresa de transportes.
Current stackers (un)	Constante definida pelo utilizador	Quantidade de empilhadores disponíveis ao serviço a definir por cada empresa.
Stacker capacity (t/un)	Constante definida pelo utilizador	Capacidade média diária (toneladas) de movimentação de carga por empilhador.
Stacker needs (un)	$DELAY\ FIXED(MAX(Current\ stackers\ (un),\ INTEGER((Load\ forecast\ per\ week\ (t)/Working\ days\ per\ week)/Stacker\ capacity\ (t/un))),\ Contract\ time,\ Current\ stackers\ (un))$	Cálculo dos empilhadores necessários para atividade em função da carga semanal. Os equipamentos não ficam disponíveis de imediata, daí serem conjugados na fórmula, com um <i>Delay</i> .
Contract time	Constante definida pelo utilizador	Semanas necessárias para novos empilhadores ficarem disponíveis - <i>Delay</i> .
Stacker renting per month (€/un)	Constante definida pelo utilizador	Custo do aluguer de um empilhador definido por cada empresa.
Equipment costs per month (€)	$Stacker\ needs\ (un) * Stacker\ renting\ per\ month\ (\text{€/un})$	Custo mensal com empilhadores mediante as necessidades e valor aluguer.
Permanent workers (un)	Constante definida pelo utilizador	Número de operadores fixos, a definir por cada empresa.
Worker capacity (t/un)	Constante definida pelo utilizador	Capacidade média diária (toneladas) de manuseamento de carga por trabalhador a definir por cada empresa.
Workers required (un)	$DELAY\ FIXED(INTEGER((Load\ forecast\ per\ week\ (t)/Worker\ capacity\ (t/un))/Working\ days\ per\ week),\ Recruitment\ time,\ Permanent\ workers\ (un))$	Cálculo dos trabalhadores necessários para manusear a carga semanal. O recrutamento de novos trabalhadores requer tempo, daí serem conjugados na fórmula, com um <i>Delay</i> .
Recruitment time	Constante definida pelo utilizador	Semanas necessárias para recrutar e admitir novos trabalhadores - <i>Delay</i> .
Outsourcing workers (un)	$IF\ THEN\ ELSE\ (Permanent\ workers\ (un) > Workers\ required\ (un),\ 0,\ "Workers\ required\ (un) - Permanent\ workers\ (un))$	Número de trabalhadores que é necessário recorrer em regime outsourcing para responder a picos de atividade. No caso dos trabalhadores fixos serem suficientes para atividade, não se recorre ao trabalho em outsourcing, daí a utilização do <i>IF THEN ELSE</i> na fórmula.
worker's salary per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Vencimento médio por trabalhador definido por cada empresa.
Back-office staff per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo geral de BackOffice e de administração da empresa. Valor a mensurar por cada empresa.
Outsourcing coefficient %	Constante definida pelo utilizador	Coefficiente aplicado ao vencimento dos trabalhadores em regime de outsourcing.

Labour costs per month (€)	<i>(Back-office staff per month (€)+Permanent workers (un)*worker's salary per month (€)) * Salary coefficient % + Outsourcing workers (un) * worker's salary per month (€)*Outsourcing coefficient</i>	Custo total laboral que inclui vencimentos com trabalhadores, custo de mão-de-obra subcontratada e vencimentos de trabalhadores para área administrativa e Administração. Foram considerados estes custos atendendo que são transversais a qualquer empresa do setor de transportes.
Plant rent or credit per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo da renda ou crédito do Armazém onde é realizada toda operação. Custo a definir por cada empresa.
Plant insurance and maintenance costs per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custo com seguros de responsabilidade civil, sistemas de segurança, manutenção e limpeza Instalações.
Energy and water costs per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custos médios mensais com energia e água. Considera-se que a alteração desta variável com atividade é pouco significativa.
Saving costs per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custos médios mensais com economato e consumíveis.
Facility costs per month (€)	<i>Plant rent or credit per month (€) + Plant insurance and maintenance costs per month (€)+Saving costs per month (€)+Energy and water costs per month (€)</i>	Custo total mensal com as Infraestruturas que inclui os custos de renda ou crédito, seguros, segurança e manutenção, energia, água e consumíveis. Foram considerados estes custos uma vez que são transversais a qualquer empresa do setor de transportes.
Software and IT licences (€)"	Constante definida pelo utilizador	Custos com licenças de software e com TI a indicar por cada empresa.
Quality cost per month (€)	Constante definida pelo utilizador	Custos com incidências de carga danificada ou indemnizações por incumprimentos.
Total operation cost per week (€)	<i>(Equipment costs per month (€) + Facility costs per month (€)+Labour costs per month (€)+RFID and IT costs (€)+Software and IT licences (€)+Quality cost per month (€))*12/52</i>	São considerados os custos operacionais mais relevantes de qualquer empresa do setor, onde se enquadram os custos com infraestruturas, aluguer de equipamentos, custos laborais incluindo o BackOffice, custos com TI, licenças e custos com qualidade.
Crossdocking cost (€/t)	"Total operation cost per week (€)"/"Load forecast per week (kg)"	Representa o custo operacional por cada tonelada de carga a distribuir. É também um indicador importante na gestão de uma empresa de transportes.
Total cost allocated to distribution (€/kg)	<i>(Crossdocking cost (€/kg) +Distribution cost (€/kg))*Distribution activity ratio (%)</i>	Indicador final que mede o custo total de operação e distribuição por Kg de carga a distribuir. Este rácio permite analisar a margem operacional da atividade em cada cenário a simular para apoiar nas decisões quanto ao preço do serviço.

Tabela 7 - Detalhe do stock do modelo. Fonte própria

STOCKS	EQUAÇÃO	DESCRIÇÃO
Inventory (Kg)	<i>IF THEN ELSE (Distribution capacity (kg) > Load forecast per week (kg), 0, (Load forecast per week (kg)- Distribution capacity (kg)- Subcontracted trucks needs (un)*Truck deliveries per day (Kg) *Working days per week))</i>	O stock é designado por Inventário e representa a diferença entre a carga (entradas) e a capacidade distribuição própria (saídas) e assim calcular a subcontratação necessária. Não se aplica stocks com valores negativos, por isso, quando a capacidade de distribuição é superior à carga semanal, o stock é zero, daí o recurso à função <i>IF THEN ELSE</i> .
Inventory (Stop)	<i>IF THEN ELSE(Distribution capacity per week (Stop)> Load forecast per week (Stop), 0, Load forecast per week (Stop) - Distribution capacity per week (Stop))</i>	Este Stock é similar ao anterior mas é convertido em clientes (Stops), ou seja, representa a quantidade de clientes que ficam por entregar utilizando apenas a capacidade da frota própria.

Algumas variáveis supra referidas, dada a subjetividade de alguns fatores inerentes ao modelo, foram incluídas variáveis percentuais e variáveis de ponderação que permitem a cada utilizador ajustar o modelo à estratégia e realidade da sua atividade, nomeadamente:

- Na capacidade distribuição está dependente da capacidade média de entregas por Camião que varia de empresa para empresa e da zona/área de distribuição.
- Necessidades de empilhadores e de operadores para armazém estão dependentes das capacidades médias por equipamento e por pessoa determinado por cada empresa.
- O custo da frota própria está dependente da quantidade de viaturas compradas ou em regime de aluguer de longa duração assim como da idade da frota.
- Na variável do custo com portagens está dependente da quilometragem média por Camião, da taxa média de portagem por km de autoestrada e da percentagem de utilização de estradas com portagens. Nesta variável, foi utilizada a fórmula de cálculo das taxas de portagem contemplada no Decreto-Lei n.º 294/97 de 24 de Outubro e são o produto da aplicação das tarifas de portagem à extensão do percurso a efetuar pelos utentes ⁴ (tabela 8).

Tabela 8 - Tarifa portagens de acordo com a classe de veículo

Classe	Valor da tarifa (€/km)
Classe 1	0,090€/km (média) ⁵
Classe 2	1,75 * classe 1
Classe 3	2,25 * classe 1
Classe 4	2,50 * classe 1

⁴ - Encontra-se citado na base XIV do DL 294/97 de 24 de Outubro

⁵ - Ponderado com base nos dados fornecidos [Taxas de Portagem \(imt-ip.pt\)](http://Taxas.de.Portagem(imt-ip.pt)), valores s/IVA

- No custo com manutenção é considerado um custo médio por km para manutenção e para desgaste com pneus, que varia de empresa para empresa em função da sua atividade, trajetos e dos contratos que tenha em vigor. O resultado será o produto destes dois itens com a quilometragem média percorrida mensalmente.
- No custo com combustíveis, é o produto da quilometragem média percorrida com a média de consumo de toda a frota e o preço médio de combustível dos últimos 3 meses.
- No custo com Camiões é considerado o custo de depreciação que representa o desgaste e desvalorização que o Camião vai sofrendo no decorrer do tempo. De acordo com Decreto Regulamentar n.º 25/2009 de 14 de Setembro, a taxa depreciação anual é determinada com base no período de depreciação de 4 anos, sendo que este período pode ser duplicado para veículos de elevado valor de aquisição.

Neste projeto, vai ser contemplada uma Frota composta por viaturas com um peso bruto de 16 toneladas e uma capacidade líquida máxima de 7.200Kg de carga.

Os custos no modelo de cálculo são divididos em custos diretos com a prestação de serviços de transporte e custos indiretos (Kovács, 2017). O custo total da distribuição é calculado pela equação:

Custo total de distribuição = custos com camiões + custos com licenças e seguros + custos com combustível + custos com manutenção + custos com portagens + custos com motoristas + custos indiretos (veículos subcontratados)

No cálculo da frota própria deste projeto, é assumido um período de depreciação de 8 anos para os Camiões, sendo a base de depreciação dos veículos, o valor de compra de 89.500 euros por viatura. O custo de depreciação considerado neste projeto, é assim calculado pela equação:

Custo da depreciação = Custo de compra / período depreciação = 89.500€/(8 x 12)= 935€/mês

3.3.6. Diagrama Stock-Flow

O modelo é construído a partir da interpretação do submodelo representado na figura 17. A variável de entrada é a simulação da carga semanal que é resultante da carga diária esperada e do efeito da sazonalidade de mercado. A variável de saída é representada pela capacidade de distribuição semanal dos Camiões da própria empresa (frota própria). No submodelo é representado ainda o nível de stock designado por Inventário que é a diferença entre a entrada de carga e a capacidade de distribuição total das viaturas próprias. Este nível de stock, representa a carga que sobra depois de esgotada a capacidade da frota própria e determina a necessidade de subcontratação de camiões para fazer face ao aumento de carga e variações ao longo do ano.

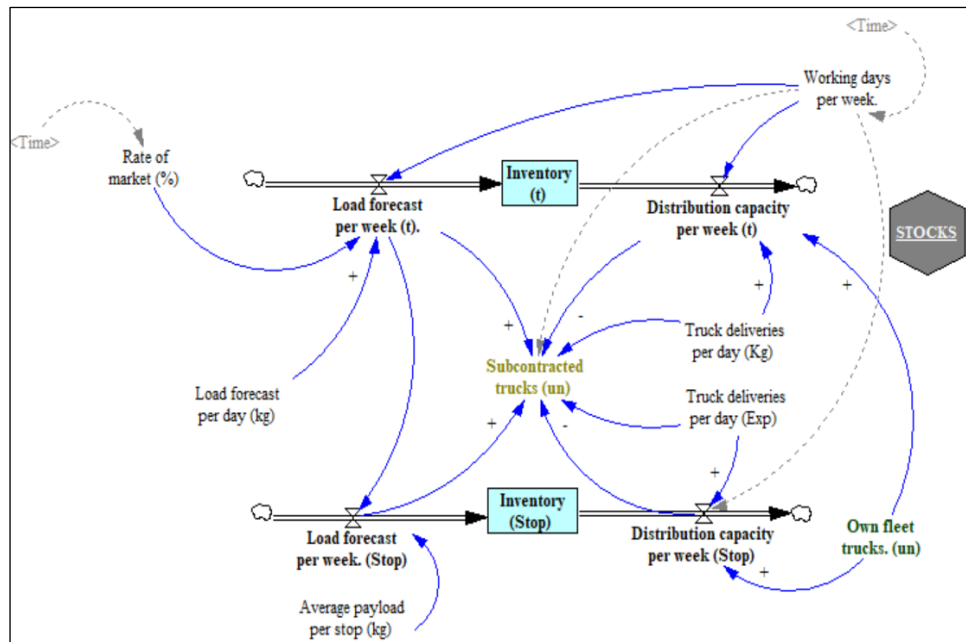


Figura 17 - Submodelo da carga semanal e da capacidade de distribuição

Outro submodelo é representado pela carga diária esperada (figura 18) que é dependente da carga média diária registada pela empresa em período homólogo anterior acrescida da taxa de crescimento anual expectável e também de variações de carga provenientes de entrada e saída de clientes.

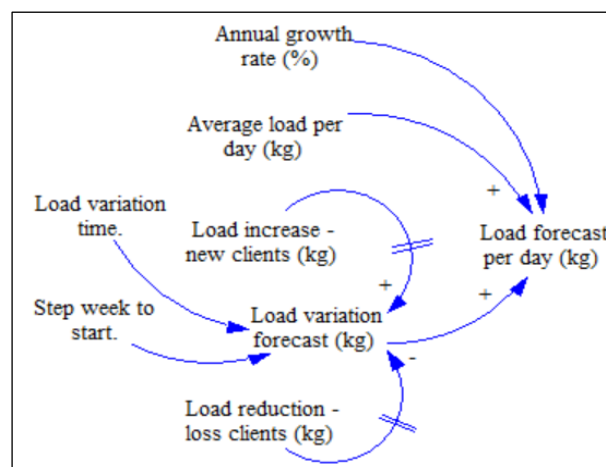


Figura 18 - Submodelo para simulação de carga diária

Um outro submodelo também importante na construção do modelo final, diz respeito aos custos envolvidos na distribuição com frota própria. Este submodelo representado na figura 19, contempla todos custos envolvidos na utilização de viatura próprias, incluindo o custo com Camiões quer sejam comprados a pronto ou leasing ou em aluguer operacional, o custo com licenças e seguros dos Camiões, custo com combustíveis, custo com portagens, custo com manutenção e o custo com Motoristas. Este submodelo é muito importante na construção do modelo final porque permite obter os custos da distribuição e, desta forma, é possível calcular um indicador crucial da atividade do transporte que é o custo distribuição/tonelada de carga entregue, indicador que possibilita validar se a margem operacional da empresa é consistente com o objetivo pretendido e serve ainda de orientação para definição dos preços a praticar pelos serviços de entregas.

A junção dos submodelos apresentados em epígrafe, deu origem ao modelo final representado na figura 21, onde podemos visualizar a ligação e interação de todas as variáveis e a forma como influenciam os custos associados ao transporte de cargas, nomeadamente os custos de distribuição e os custos operacionais. O modelo final permite ainda, através do seu stock designado por Inventário que representa a carga que sobra depois de esgotada a capacidade da frota própria, permitir simular os Camiões necessários subcontratar para responder às variações da carga e ao crescimento da atividade. Através do modelo, é possível verificar as variáveis que influenciam o custo da distribuição e determinar o rácio deste custo por cada tonelada de carga.

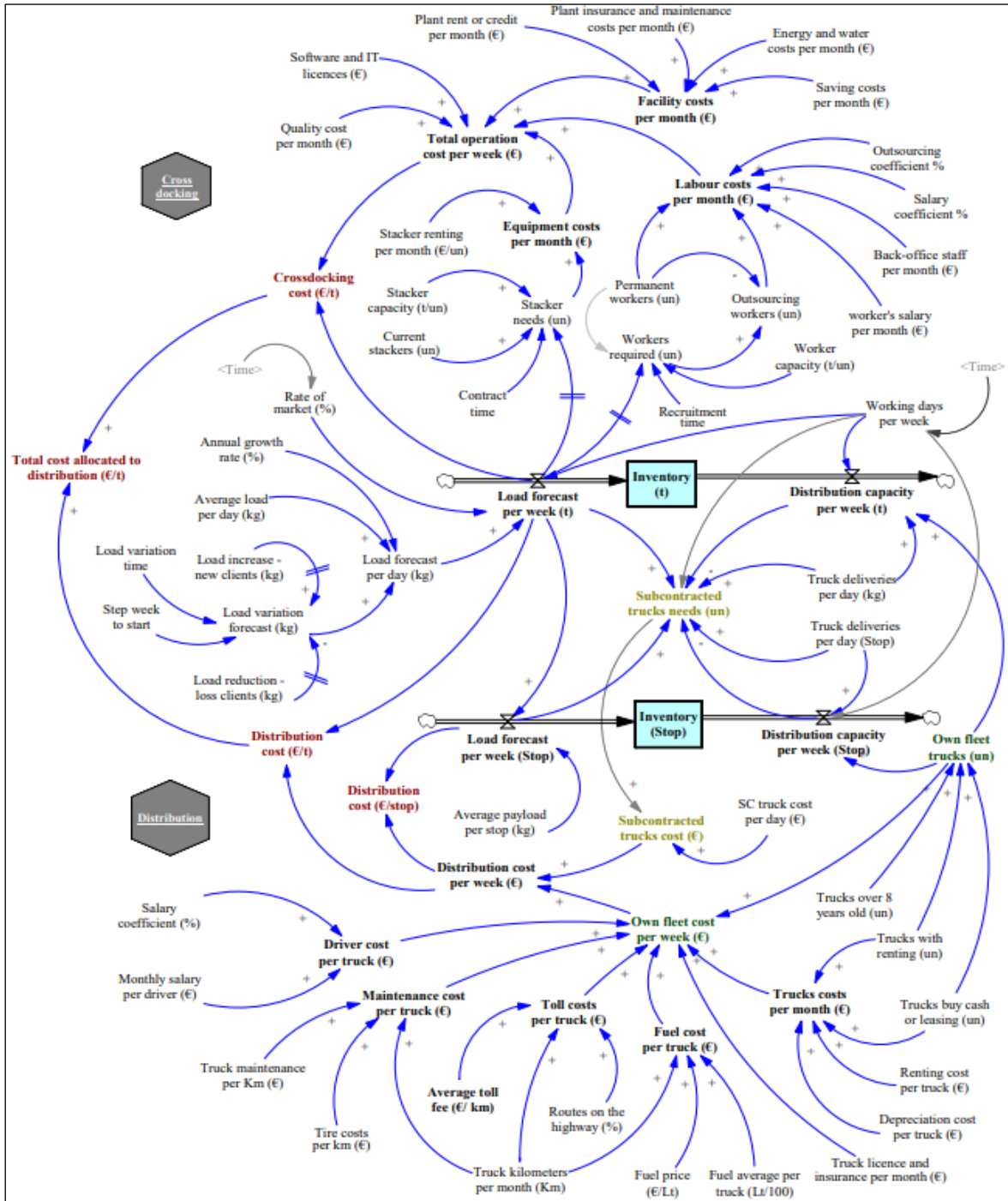


Figura 21 - Diagrama de Stock-flow

As figuras 22 e 23 apresentam os gráficos com os dados reais da carga (em peso e stops) verificados no ano 2019 e os valores simulados no modelo.

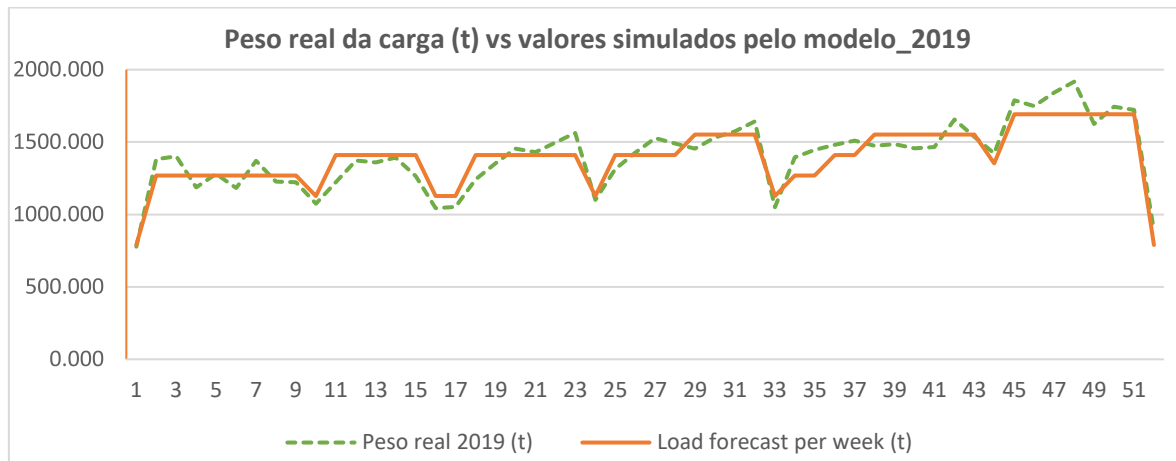


Figura 22 - Gráfico do Peso real da carga (t) de 2019 e dos valores simulados pelo modelo

Através dos gráficos, é possível verificar que existe correlação entre o comportamento do modelo e os valores reais verificados no ano modelado.

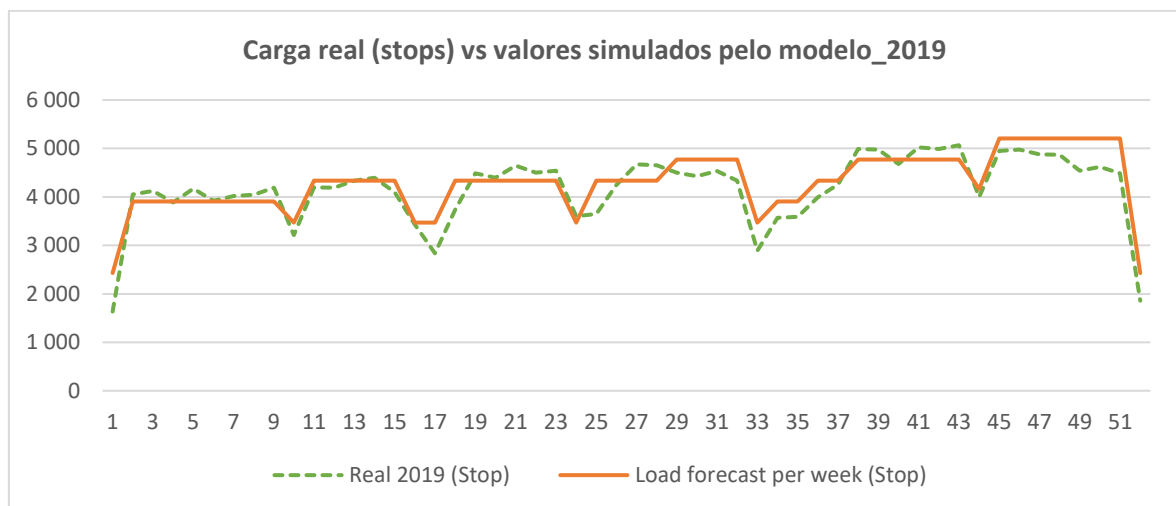


Figura 23 - Gráfico da carga real (stops) de 2019 e dos valores simulados pelo modelo

Quanto à necessidade de subcontratação de Camiões, o modelo deu resultados próximos da quantidade de Camiões subcontratados ao longo do ano 2019 como se pode verificar na figura 24.

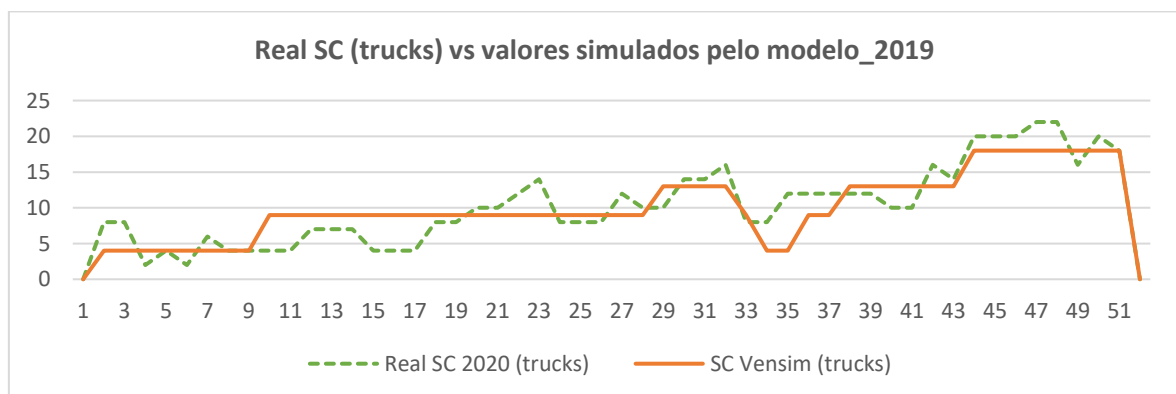


Figura 24 - Gráfico de subcontratados (trucks) em 2019 e dos valores simulados pelo modelo

Tendo como base os valores reais de 2019, foram utilizados os valores das mesmas variáveis para simular dados para 2020 e comparar com os valores reais:

- Carga média diária registada no ano 2019 (*Average load per day* = 281 000 Kg).
- Taxa de crescimento registada em 2020 face a 2019 (*Annual growth rate* = 22 %).
- Carga media útil por stop (*Average payload per stop* = 337 Kg).

Na tabela 10 são apresentados os valores reais da carga registada durante o ano 2020 na mesma delegação da empresa (040) que serve como estudo de caso real para comparar com os resultados da simulação efetuada pelo modelo. A tabela completa pode ser visualizada no apêndice B.

Tabela 10 - Valores reais de carga registada em 2020 e valores simulados pelo modelo

Sem	Valores reais 2020 (S&V_040)				Simulação 2020_Vensim					
	Real 2020 (Stop)	Peso real 2020 (t)	ΔPeso 2020	Real SC 2020 (trucks)	Load forecast per week (Stop)	Load forecast per week (t)	Rate of market	SC Vensim (trucks)	Working days per week	
1	3 292	1 290.997	-0.23	16	3 662	1 234.150	-0.30	13	4	
2	5 205	1 694.490	0.01	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
3	4 827	1 769.942	0.05	20	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
4	4 934	1 585.816	-0.06	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
5	4 967	1 573.880	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
6	5 574	1 731.403	0.03	20	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
7	4 680	1 583.104	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
8	5 164	1 584.780	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
9	4 668	1 683.927	0.00	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
40	5 350	1 739.940	0.04	22	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
41	4 657	1 686.635	0.00	27	4 475	1 508.410	0.10	25	4	
42	5 612	1 916.300	0.14	27	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
43	5 451	1 783.619	0.06	27	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
44	5 693	1 898.611	0.13	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
45	5 463	1 777.131	0.06	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
46	5 448	1 799.615	0.07	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
47	5 531	1 812.453	0.08	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
48	5 353	1 863.507	0.11	23	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
49	4 267	1 545.498	-0.08	23	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
50	4 494	1 665.514	-0.01	23	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
51	5 762	1 937.732	0.15	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
52	4 658	1 593.543	-0.05	27	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
53	2 566	1 127.453	-0.33	12	3 255	1 097.020	-0.40	7	4	
2020	260 716	88 962.754	342.164	1 119	266 087	89 681.720	0.00	1 103		
2019	216 854	73 058.446	280.994							
									-> Average load per day	
									21.77% -> Annual growth rate (%)	

	Média sem (Exp)	Média Peso sem (t)	Média Peso /Stop (kg)
2020	4 919	1 678.543	341
2019	4 170	1 404.970	337

-> Average payload per stop (Kg)

A figura 25 apresenta o gráfico com os dados reais da carga (ton) verificados no ano 2020 e os resultados simulados pelo modelo. Pela análise do gráfico é possível constatar discrepâncias em alguns períodos devido aos efeitos dos confinamentos da pandemia durante o ano 2020. Entre as semanas 9 e 12 verificou-se um aumento da carga devido às notícias de possível confinamento, entre as semanas 43 a 52 não se verificou o efeito de sazonalidade do período de natal como ocorreu em 2019. Apesar de 2020 ser um ano atípico e hostil para qualquer modelo de simulação, os resultados da simulação apresentam concordância com os resultados reais, os valores simulados pelo modelo para 2020 (89 681.720 ton) esteve muito próximo da carga real (88 962.754 ton).

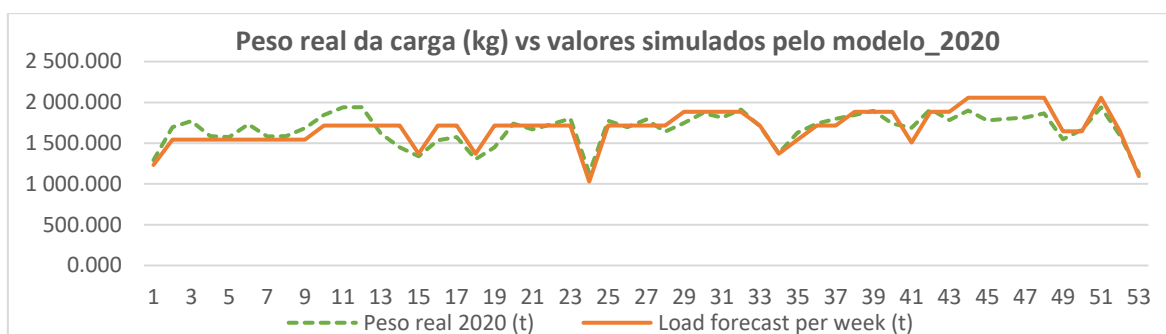


Figura 25 - Gráfico do Peso real da carga (ton) de 2020 e dos valores simulados pelo modelo

A distribuição das entregas (Stops) reais ao longo do ano 2020, são inferiores aos valores simulados pelo modelo, pois o peso médio por stop verificado em 2019 (337 Kg) utilizado como valor da variável “Average payload per stop” do modelo, é inferior ao real verificado em 2020 (341 Kg), porém, o comportamento dos resultados simulados apresentam correspondência com os reais como se pode ver na figura 26.

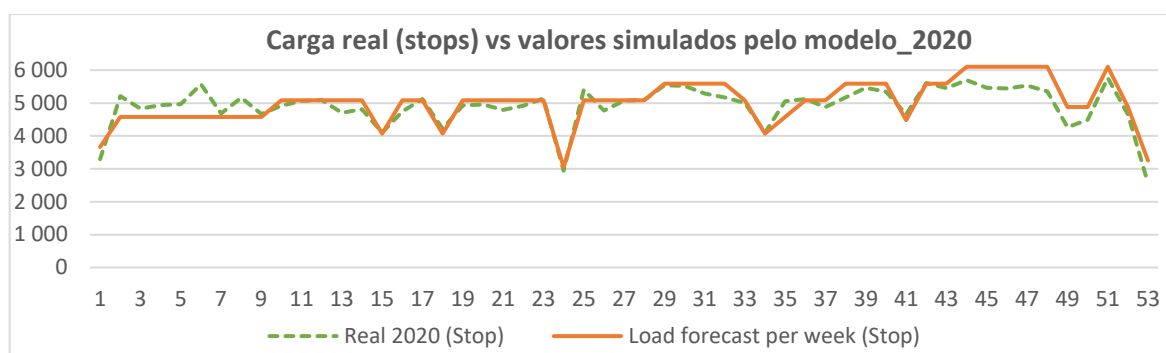


Figura 26 - Gráfico da carga real (stops) de 2020 e dos valores simulados pelo modelo

Quanto à necessidade de subcontratação de Camiões, o modelo deu resultados próximos da quantidade de Camiões subcontratados ao longo do ano 2020 como se pode apurar na figura 27, porém com as mesmas discrepâncias observadas nos gráficos anteriores pelos motivos referidos.

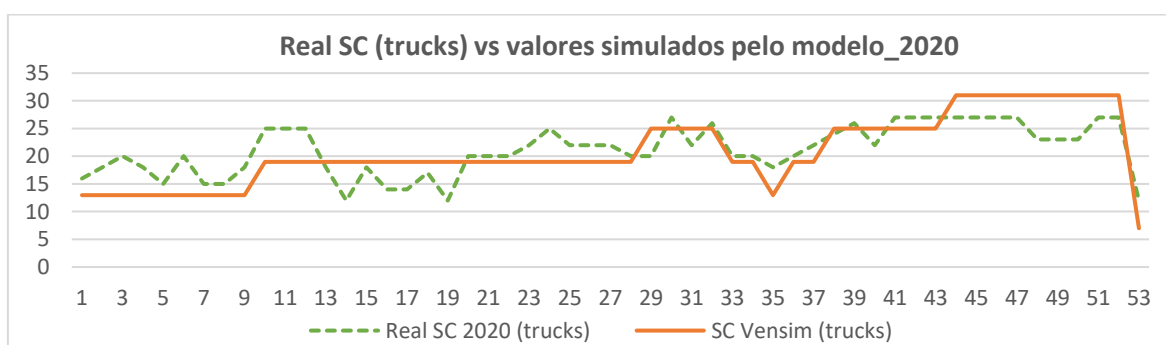


Figura 27 - Gráfico de subcontratados (trucks) em 2020 e dos valores simulados pelo modelo

Foi também possível validar através do modelo, o comportamento dos custos da distribuição por cada tonelada de carga simulada para 2020. O custo médio apurado pelos indicadores da empresa de 2020 utilizada como caso real, é de aproximadamente 40 euros por tonelada. Os valores simulados no modelo, como mostra a figura 28 (gráfico disponibilizado pelo modelo), são inferiores (rondam os 38 euros), ainda assim, o comportamento do resultado apresenta correspondência com o custo real. Contudo, o modelo não considera alguns custos subjetivos como os custos com

reparações de viaturas por acidente, assim como as frequentes oscilações dos preços de combustíveis.

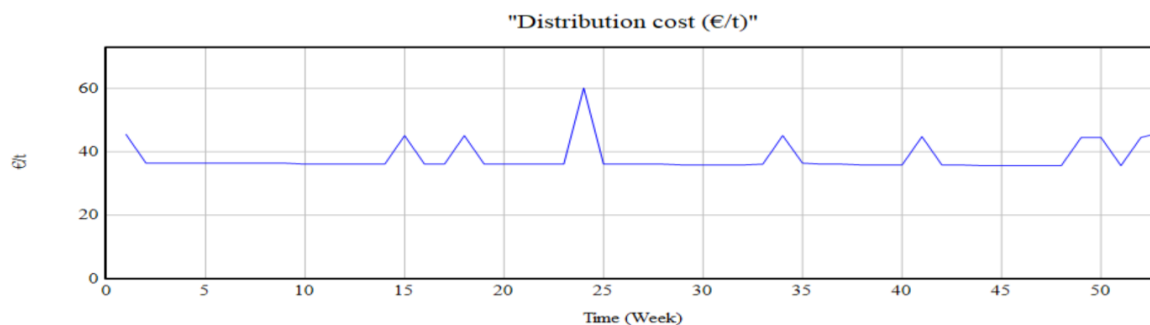


Figura 28 - Custo da distribuição por tonelada de carga em 2020

Os valores mais altos que se verificam no gráfico, são referentes às semanas com redução nos dias úteis de trabalho devido aos feriados. Estes aumentos estão relacionados com o facto de nestas semanas, verificarem-se reduções nas cargas e como os custos fixos são os mesmos, o rácio do custo por tonelada é mais elevado nestes períodos.

Para o ano em curso (2021), foram utilizados os valores das mesmas variáveis do ano 2020 para comparar com os valores reais verificados até à semana 26:

- Carga média diária registada no ano 2020 (*Average load per day* = 342 000 Kg).
- Taxa de crescimento expectável para 2021 (*Annual growth rate* = 21 %).
- Carga media útil por stop (*Average payload per stop* = 341 Kg).

Os valores reais de carga verificados nas primeiras 26 semanas de 2021 são apresentados no apêndice C, assim como os valores simulados pelo modelo tendo por base os valores supra referidos parametrizados na simulação. No anexo A são apresentados os valores extraídos da base de dados da empresa que serve de caso real e que foram utilizados na tabela dos dados de 2021.

A figura 29 apresenta o gráfico com os dados reais da carga (ton) verificados nas primeiras 26 semanas de 2021 e os resultados simulados pelo modelo. Pela análise do gráfico é possível verificar que existe correlação, os dados reais que seguem a tendência dos valores simulados pelo modelo.

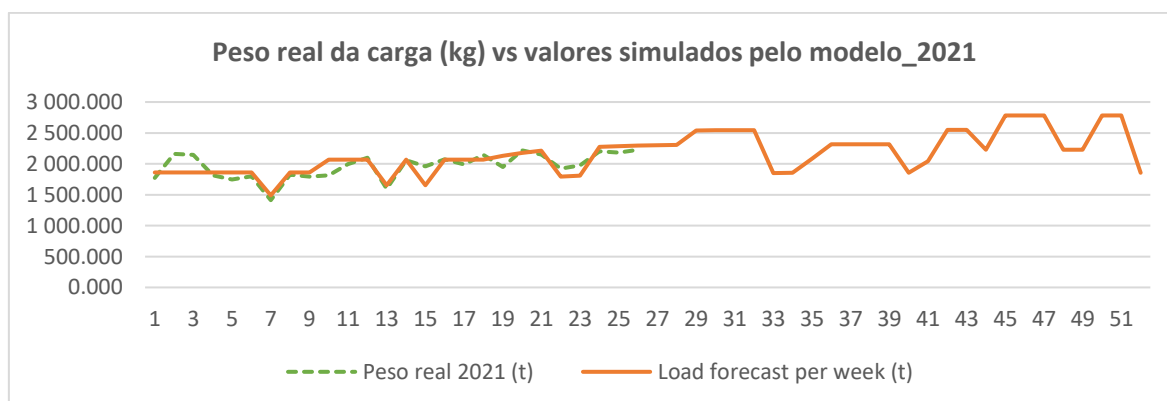


Figura 29 - Gráfico do Peso real da carga (ton) de 2021 e dos valores simulados pelo modelo

Perante os valores reais da carga verificada nos anos 2019 e 2020 e os valores simulados pela ferramenta, pode-se concluir que o modelo é válido face à correspondência que se verifica nos valores. Também no ano 2021 é possível constatar que os valores reais observados nas primeiras 26 semanas, seguem a mesma tendência dos valores calculados pelo modelo.

3.5. Outputs do sistema de apoio à decisão

A ferramenta desenvolvida, é integralmente parametrizada pelo utilizador e o modelo é concebido para se adaptar à realidade de cada empresa. A unidade de tempo do modelo é a semana, sendo o mesmo construído para simular cenários a um ano, por conseguinte, o tempo limite parametrizado no modelo foram 52 ou 53 semanas dependendo do ano. Foi considerada uma variável que representa os dias uteis de trabalho a definir por cada empresa em função da sua atividade. A soma do custo distribuição e do custo operacional que engloba todas atividades de *crossdocking* (cargas, descargas, triagem e conferência), dá origem ao custo total atribuído à atividade da distribuição.

No modelo foram consideradas variáveis com as principais rubricas de custos associadas ao setor dos transportes, nomeadamente ao transporte por grupagem tendo por base o caso real analisado e que serviu de suporte para a validação do modelo.

Na figura 30 estão representados todos os comandos de variáveis que podem ser controladas pelo utilizador, estas caixas de parametrização têm limites inferiores e superiores limitados para definir a amplitude que estas variáveis podem tomar e assim mitigar resultados surreais, neste contexto, por exemplo, as caixas relativas às variáveis percentuais estão limitados entre 0 e 1 podendo variar em intervalos de 0.01. Porém, a parametrização de algumas variáveis como por exemplo *Average load per day (kg)*, *Average payload per stop (kg)*, *Truck deliveries per day (kg)*, entre outras, são dependentes da realidade de cada empresa, no modelo estão compreendidas entre respetivamente 100000 Kg e 400000 Kg, 100 Kg e 500 Kg, 4000 Kg e 8000 Kg respetivamente, contudo os valores podem ser ajustados à realidade de cada empresa.

Estão também representados os comandos que permitem ao utilizador definir o início de variação na carga ocorrida por entrada ou saída de clientes que pode ocorrer em qualquer momento durante o ano, assim como o tempo que pode demorar para sentir o efeito dessa variação. Outras variáveis como necessidade de empilhadores e de trabalhadores (*Stacker needs (un)*), *Workers required (un)*), também permitem que o utilizador defina o tempo necessário para adquirir/alugar novos equipamentos ou recrutar e incorporar novos trabalhadores uma vez que estes efeitos não ocorrem imediatamente aquando a identificação das necessidades.

Algumas variáveis do modelo dependem diretamente de outras variáveis como são exemplo as variáveis *Maintenance cost per truck (€)*, *Toll costs per truck (€)* e *Fuel cost per truck (€)* que estão dependentes do valor atribuído à variável *Truck kilometers per month (Km)* pois esta variável interfere diretamente nos resultados das três variáveis anteriores sendo o seu valor definido pelo utilizador dependendo da realidade e do registo de dados de cada empresa.

No modelo são também consideradas variáveis cujos valores apesar de poderem ser definidos pelos utilizadores, sofrem poucas alterações entre as empresas do setor como são exemplo *Average toll fee (€/ km)* que está relacionado com o custo de portagens por quilometro, o *Fuel price (€/Lt)*, *Monthly salary per driver (€)* cujo valor adotado pela maioria das empresas, é o valor legal definido pelo contrato coletivo de trabalho aplicado ao setor.

As variáveis contempladas no modelo, visam simular resultados muito importantes para o setor dos transportes como são exemplo, a carga semanal, a necessidade de subcontratação de Camiões tendo em consideração a capacidade de distribuição da frota própria e os principais indicadores relacionados com custos distribuição por tonelada de carga.

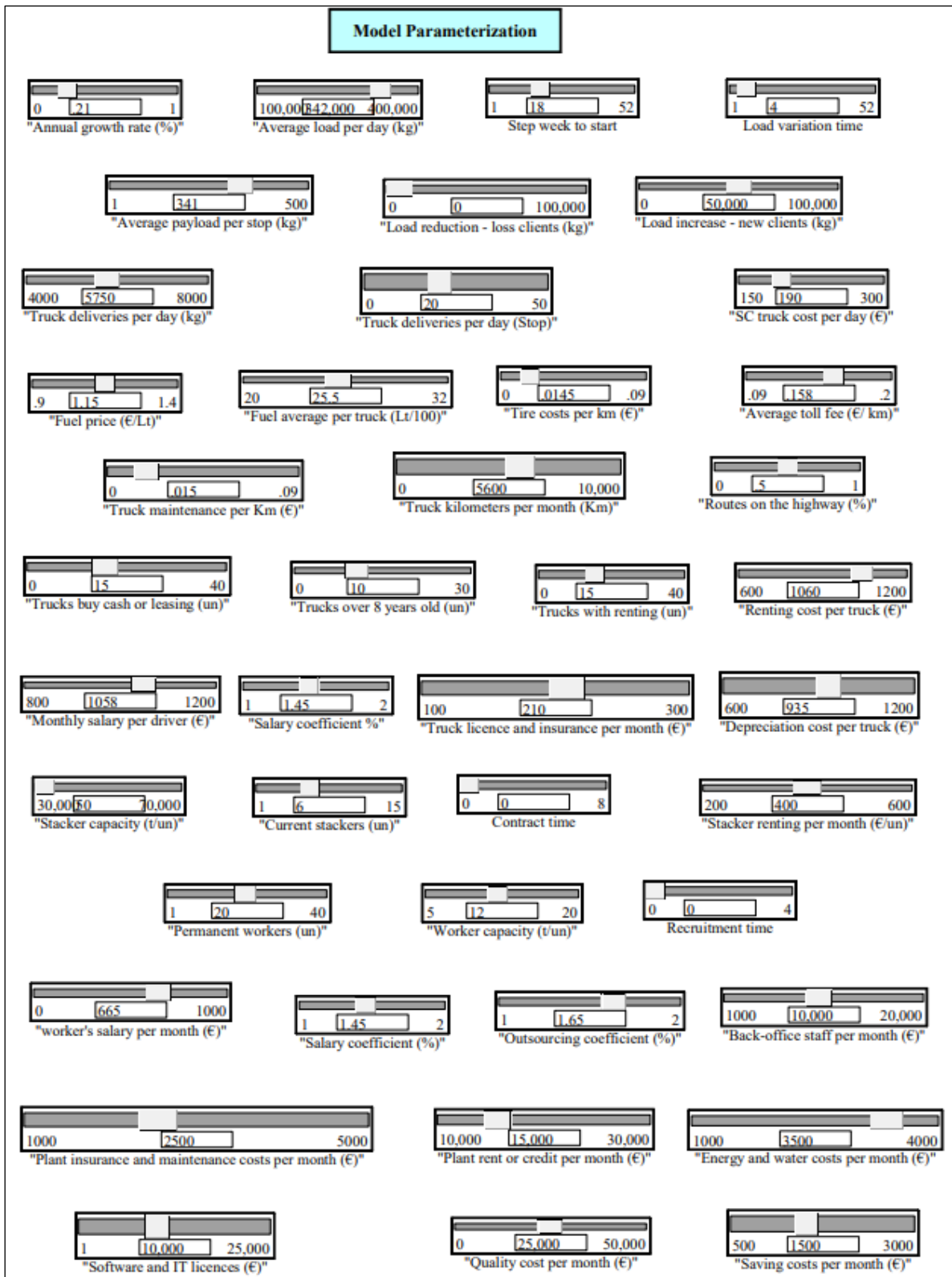


Figura 30 - Parametrização do modelo

Não obstante da parametrização de todas estas variáveis, o utilizador pode simular e verificar em tempo real os impactos destas variáveis no modelo, dado que a ferramenta disponibiliza gráficos dinâmicos que variam prontamente consoante as variações que o utilizador vai inserindo, conforme se observa na figura 31. Este output, apesar de ter uma visibilidade limitada e não permitir obter

valores propriamente ditos, permite verificar o comportamento geral de todas as variáveis nos resultados assim como verificar as alterações face ao resultado inicial.

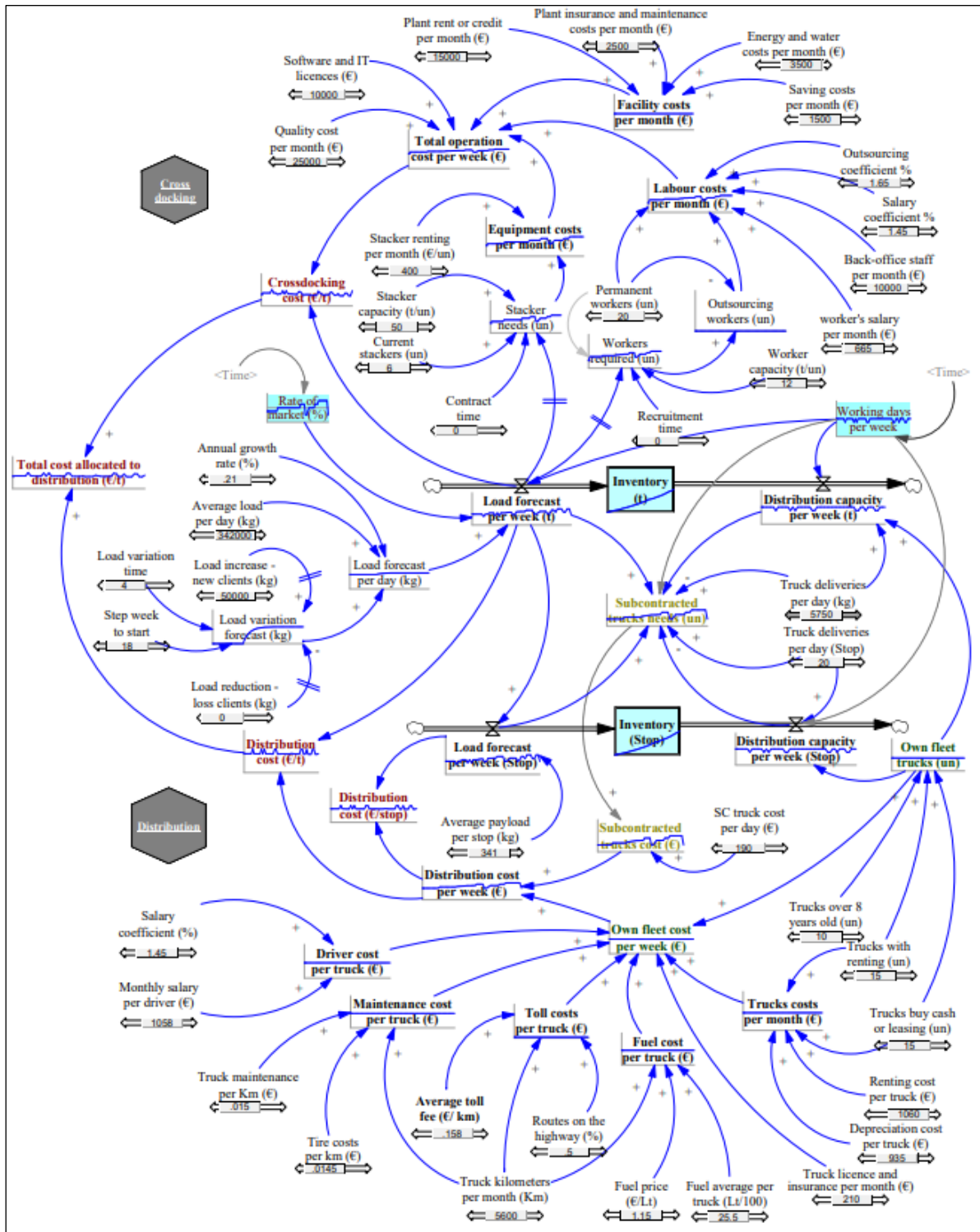


Figura 31 - Gráficos dinâmicos do modelo

Para uma interpretação mais fácil e rápida dos resultados do modelo, a ferramenta também disponibiliza gráficos das variáveis que o utilizador considere mais úteis e importantes analisar como mostra a figura 32. Estes gráficos podem ser analisados nas view 2 e 3 do modelo em conjunto

com os botões que servem para parametrizar o modelo. Sempre que o utilizador considere pertinente criar um novo gráfico de outra variável, pode fazê-lo clicando em *IO Object*, no tipo de objeto seleciona a opção *Output Workbench Tool*, seleciona a variável que pretende e pressiona a opção *Graph*.

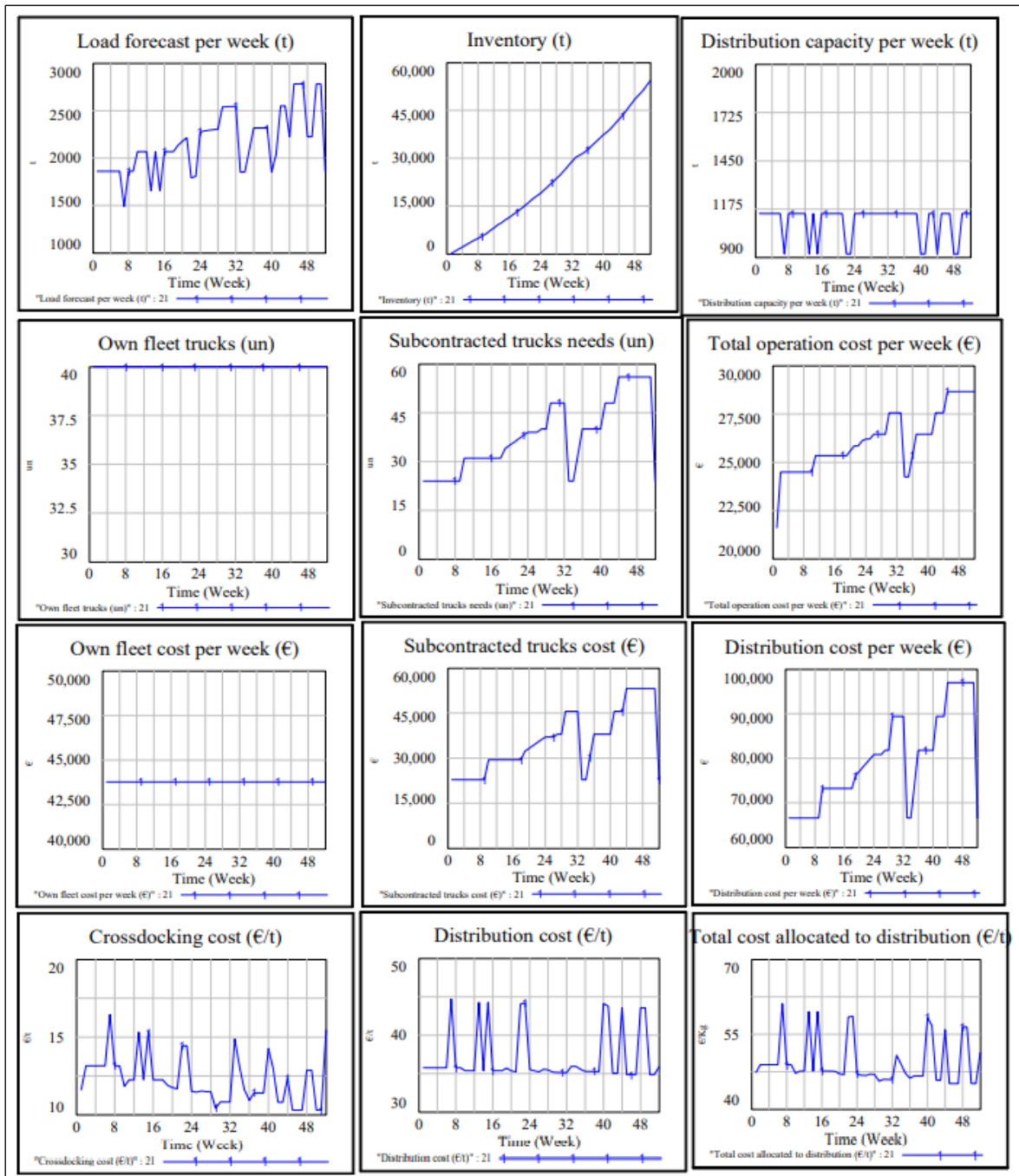


Figura 32 - Gráficos disponibilizados pelo modelo

A figura 33 apresenta mais alguns gráficos com os resultados da simulação executada para o ano 2021 (designada cenário 21) assumindo determinados valores nas variáveis selecionadas e mostradas na figura, valores que podem ser alterados a qualquer momento pelo utilizador através dos botões e desta forma, analisar de imediato as variações nos resultados. O modelo permite assim, simular vários cenários de forma dinâmica alterando os valores das variáveis que são definidas pelo utilizador.

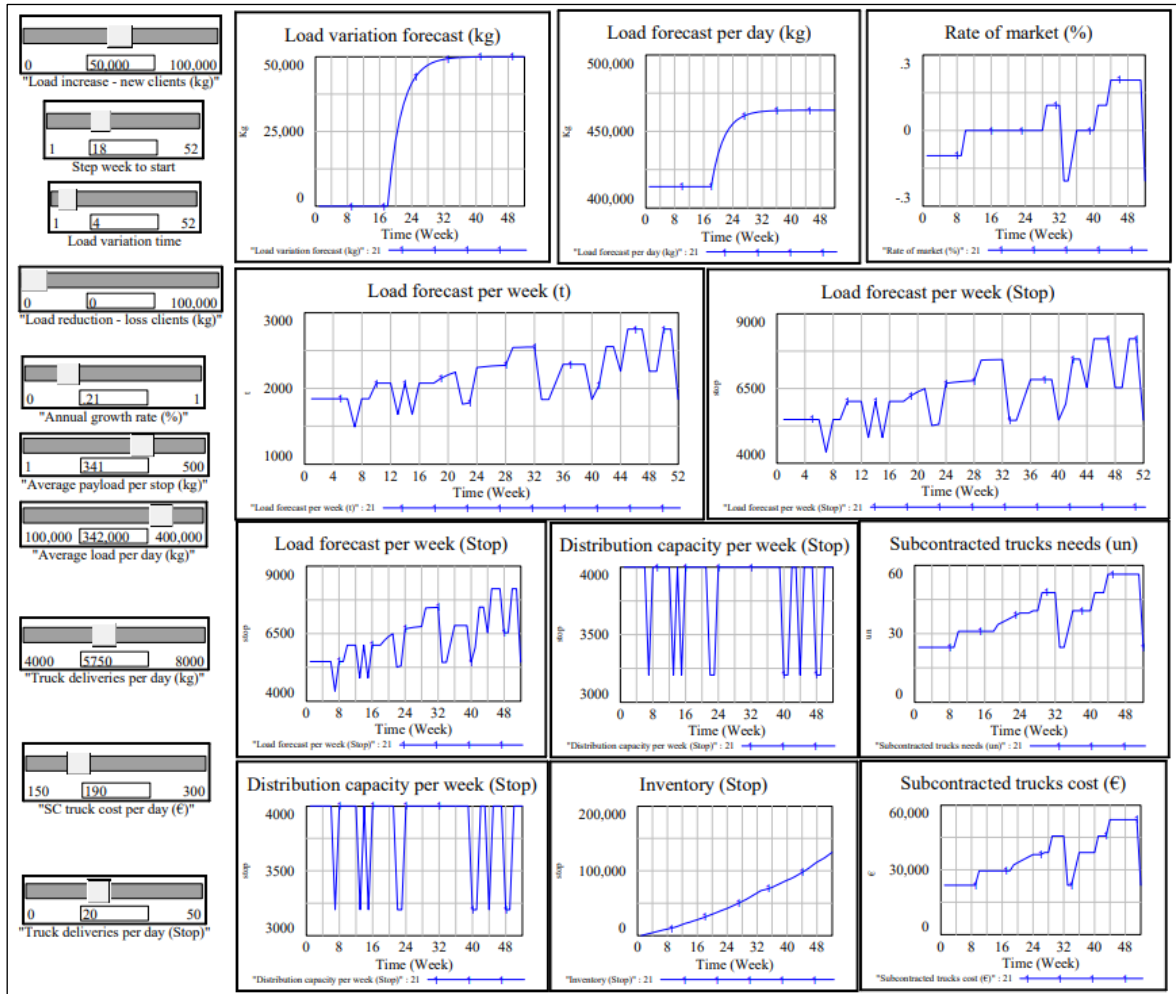


Figura 33 - Exemplo de uma simulação com gráficos dos resultados

A ferramenta permite criar uma representação gráfica da estrutura de um modelo associado à variável escolhida pelo utilizador através da elaboração de diagramas de árvore (*tree diagram*) onde é possível visualizar as relações estruturais de determinada variável e toda informação sobre a estrutura. Estes diagramas podem ser de causas onde são apresentadas todas as variáveis que influenciam determinada variável, sendo apresentados alguns exemplos nas figuras 34 e 35.

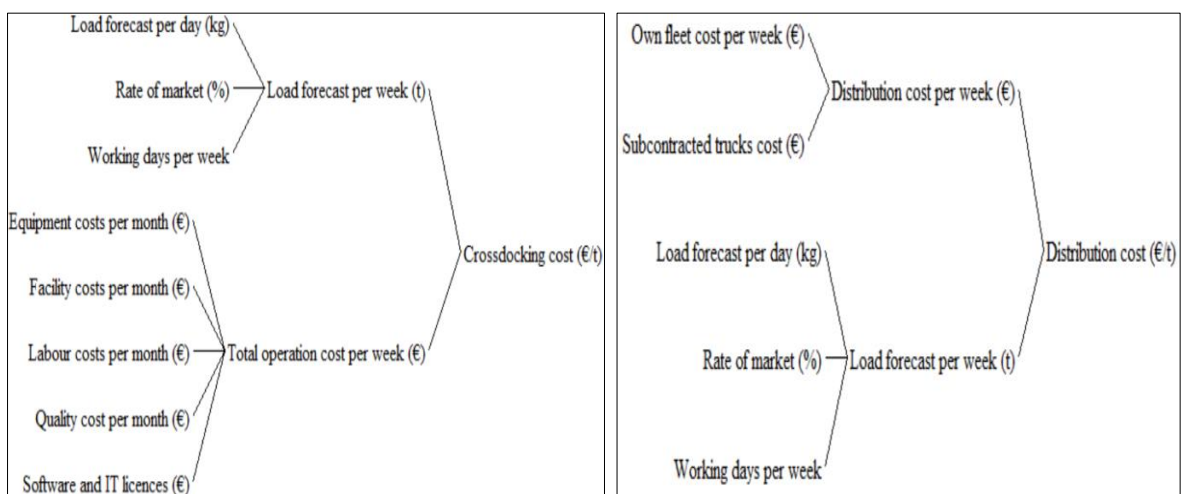


Figura 34 - Causes Tree das variáveis Crossdocking cost e Distribution cost

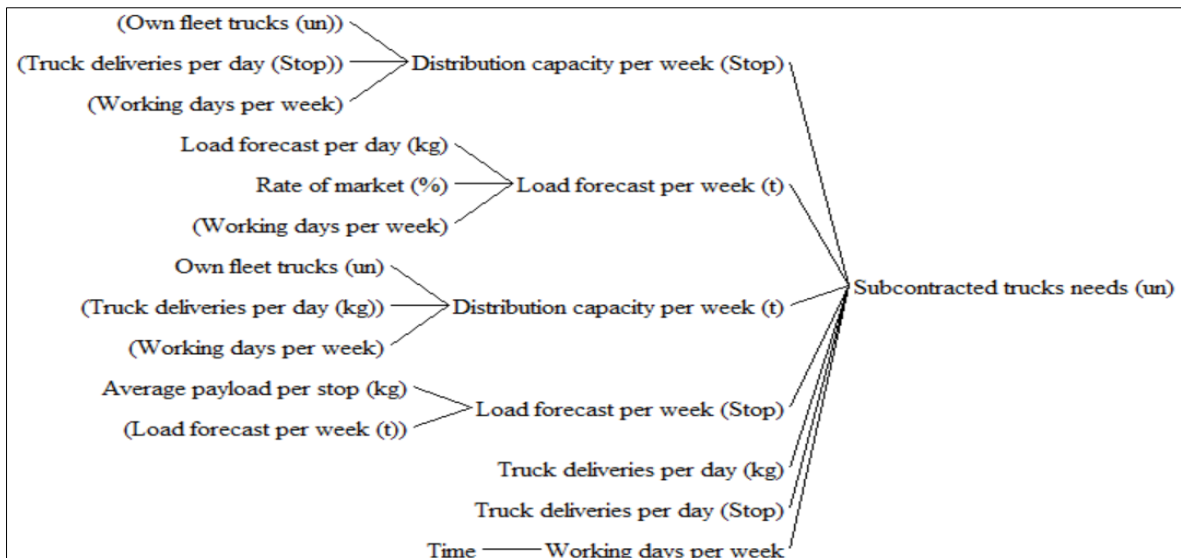


Figura 35 - Causes Tree da variável Subcontracted trucks needs

Os diagramas podem também ser de usos, onde é possível observar quais são as variáveis influenciadas pela variável em estudo. Na figura 34 verifica-se que a variável da carga semanal tem influência sobre as variáveis: inventário, necessidades de empilhadores e trabalhadores, custos de *crossdocking* e distribuição, o número de entregas (stops) e necessidade de subcontratação de camiões. As variáveis custo de *crossdocking* e custo de distribuição apenas influenciam o custo total afeto à distribuição.

Os diagramas de árvore disponibilizados pelo modelo, permitem visualizar a influencia das variáveis até ao terceiro nível, por exemplo, na figura 36 é possível verificar que se analisarmos a variável da carga semanal, esta tem influencia, entre outras, sobre a necessidade de subcontratação de camiões que por sua vez influencia o custo de subcontratação, porém se analisarmos o diagrama da variável da necessidade de subcontratação de camiões já apresenta a sua influencia sobre o custo de subcontratação e esta por sua vez tem influencia sobre o custo semanal de distribuição.

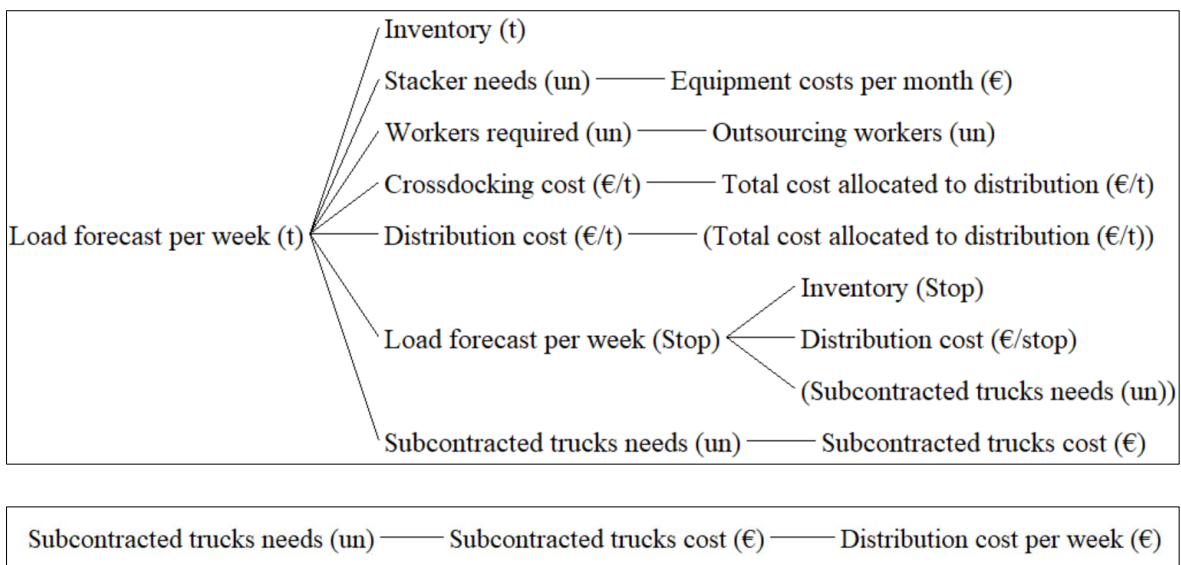


Figura 36 - Uses Tree das variáveis Load forecast per week e Subcontracted trucks needs

Por fim, o modelo disponibiliza ainda os gráficos de causas (*Causes strip*), como se pode ver na figuras 37, a ferramenta disponibiliza os gráficos das variáveis que o utilizador pretende analisar, assim como os gráficos das variáveis que influenciam a variável em análise.

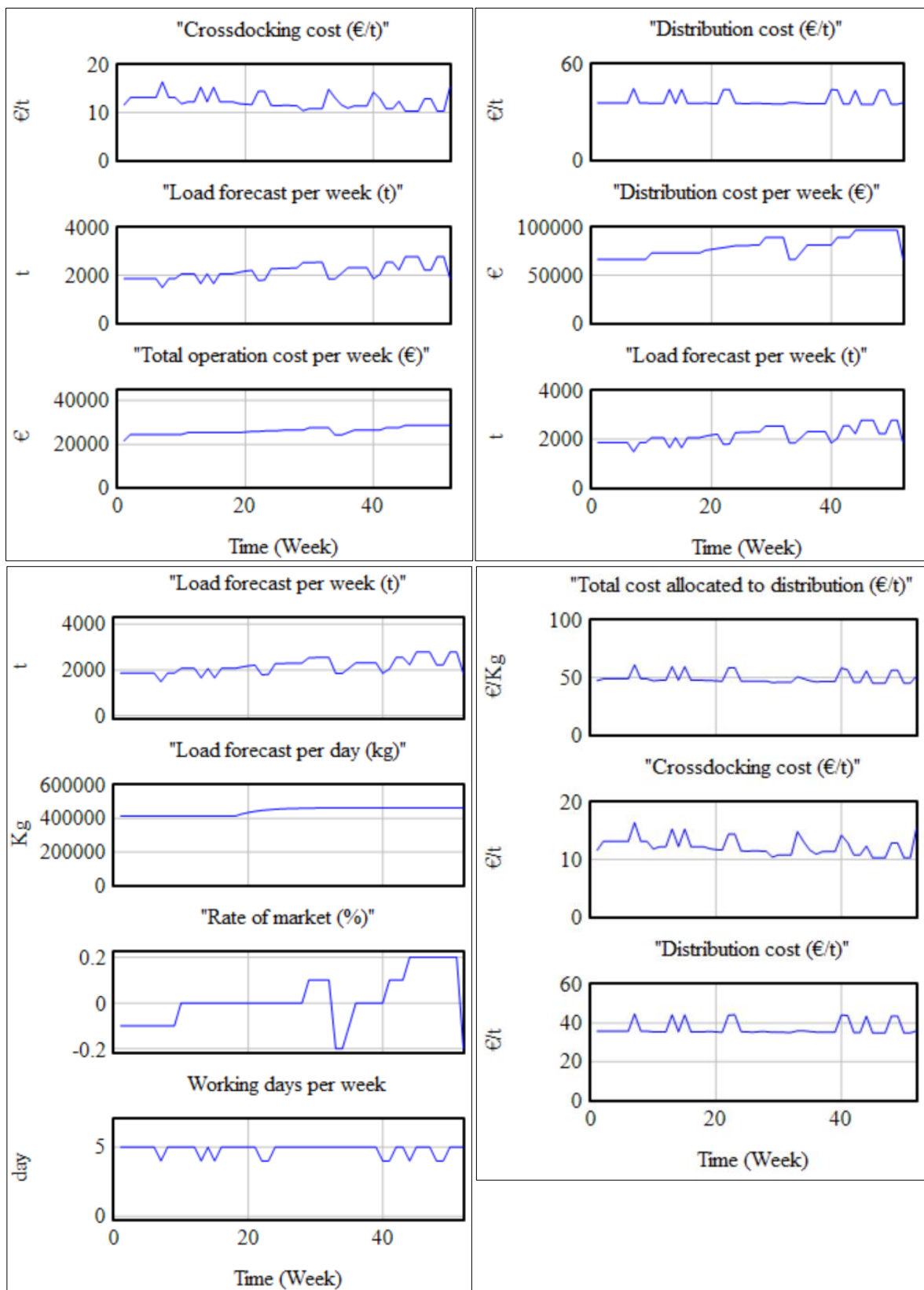


Figura 37 - Exemplos de *Causes strip* disponibilizados pelo modelo

3.6. Análise e comparação de cenários

Além de permitir várias simulações, o modelo dá a possibilidade ao utilizador de comparar o resultado de duas ou mais simulações e assim poder analisar e comparar cenários.

A figura 38 é um exemplo da comparação de dois cenários para ano 2021 cujos valores de duas variáveis foram modificados, nomeadamente:

- Cenário 21 as variáveis “Truck deliveries per day (Kg)” e “Truck deliveries per day (Stop)” apresentam valores de 5750Kg e 20 Stops respetivamente,
- Cenário 22, os valores destas variáveis foram alterados para 7750Kg e 25 Stops.

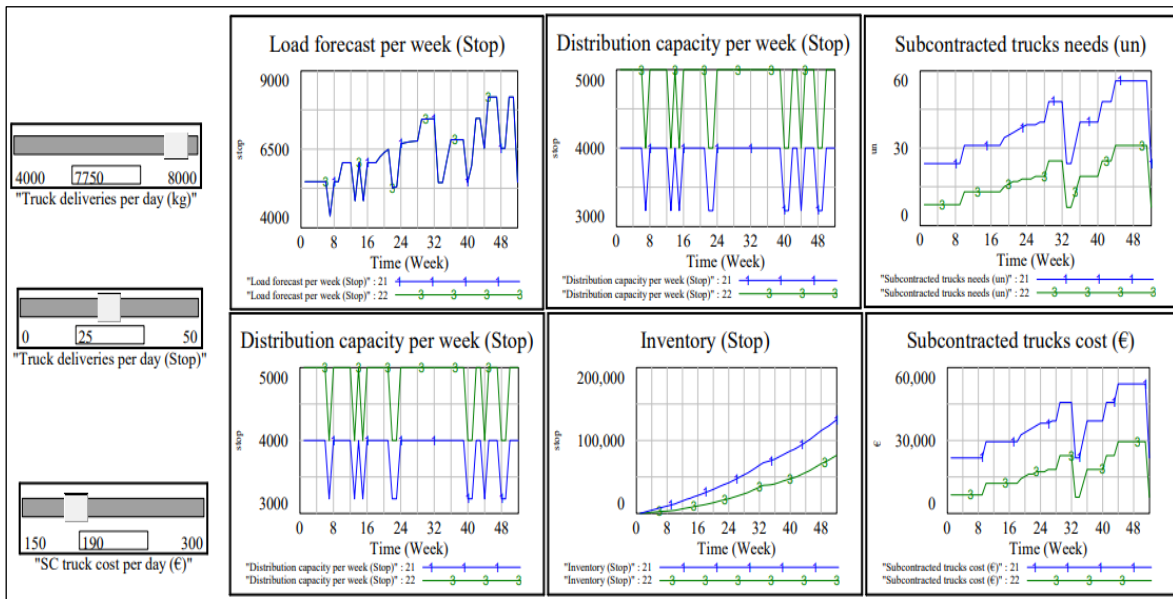


Figura 38 - Comparação de resultados do cenário 21 com o cenário 22

O modelo permite ainda retirar gráficos dos resultados que o utilizador pretenda analisar com mais detalhe e melhor visibilidade como se pode verificar na figura 39.

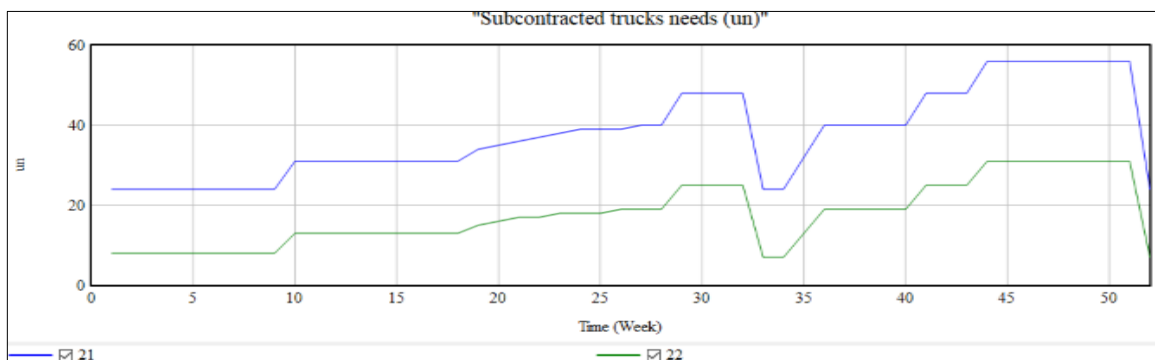


Figura 39 – Gráfico comparativo da subcontratação de camiões simulados nos cenários 21 e 22

A análise dos resultados da comparação do cenário 21 com o cenário 22 é apresentada na tabela 11 de forma resumida.

Tabela 11 - Análise de comparação dos resultados do cenário 21 com o cenário 22

Variáveis	Cenário 21/22	Análise de resultados
Truck deliveries per day (Kg)	5750 / 7750	Aumentando a capacidade de entregas por caminhão, quer em peso quer em stops - clientes, o modelo prevê uma significativa redução do número de caminhões necessários subcontratar e do custo com subcontratação. Este aumento da capacidade tem reflexo no aumento da capacidade distribuição da frota própria o que faz reduzir a subcontratação de caminhões e os custos distribuição.
Truck deliveries per day	20 / 25	
Restantes variáveis	valores iguais	

Foi efetuada uma nova simulação, também para o ano 2021, onde se procedeu alteração dos valores de variáveis que interferem com a carga semanal, nomeadamente a taxa de crescimento (*Annual growth rate*(%)) e a semana de inclusão de novo cliente (*Step week to start*) para se fazer a comparação deste cenário (23) com o cenário anterior (21). Estas variáveis nos dois cenários têm os seguintes valores:

- Cenário 21: *Annual growth rate*(%) = 0.21 e *Step week to start* = 18
- Cenário 23: *Annual growth rate*(%) = 0 e *Step week to start* = 30

Na figura 40 são apresentados gráficos de comparação destes 2 cenários. Nos gráficos é possível verificar o efeito que as alterações nestas duas variáveis causam nos valores simulados para a carga semanal.

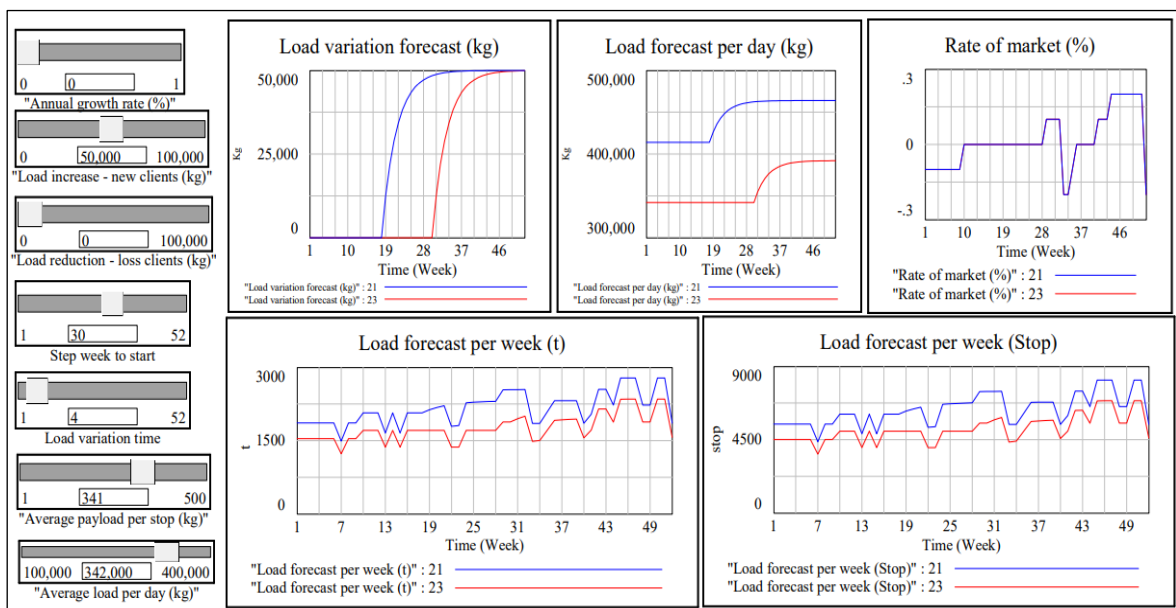


Figura 40 – Gráficos comparativos dos valores da carga semanal simulados nos cenário 21 e 23

A figura 41 representa a mesma informação disponibilizada pelos gráficos da figura 40, mas de forma detalhada e com os valores apresentados em forma de tabela para ser possível ao utilizador saber o valor exato da variável em cada semana. Tal como nos gráficos, também nesta tabela é possível comparar os valores das duas simulações, assim como os efeitos da alteração da semana introduzida no modelo para aumento de carga por inclusão de novo (s) cliente (s).

Time (Week)	"Load forecast per day (kg)"	"Load forecast per day (kg)"	"Load forecast per week (t)"	"Load forecast per week (t)"
15	413820	342000	1655.28	1368
16	413820	342000	2069.1	1710
17	413820	342000	2069.1	1710
18	413820	342000	2069.1	1710
19	426320	342000	2131.6	1710
20	435695	342000	2178.48	1710
21	442726	342000	2213.63	1710
22	448000	342000	1792	1368
23	451955	342000	1807.82	1368
24	454921	342000	2274.61	1710
25	457146	342000	2285.73	1710
26	458814	342000	2294.07	1710
27	460066	342000	2300.33	1710
28	461004	342000	2305.02	1710
29	461708	342000	2539.4	1881
30	462236	342000	2542.3	1881
31	462632	354500	2544.48	1949.75
32	462929	363875	2546.11	2001.31
33	463152	370906	1852.61	1483.63
34	463319	376180	1853.28	1504.72
35	463444	380135	2085.5	1710.61
36	463538	383101	2317.69	1915.51
37	463609	385326	2318.04	1926.63
38	463661	386994	2318.31	1934.97
39	463701	388246	2318.51	1941.23
40	463731	389184	1854.92	1556.74

Figura 41 - Tabelas dos valores de carga disponibilizadas pelo modelo para os cenários 21 e 23

Também é possível verificar o detalhe dos custos da distribuição e de *crossdocking* por tonelada de carga a entregar, assim como a sua variação nos dois cenários – figura 42.

Time (Week)	"Distribution cost (€/t)"	"Distribution cost (€/t)"	"Crossdocking cost (€/t)"	"Crossdocking cost (€/t)"
15	44.2357	45.1919	15.3141	17.2846
16	35.3886	36.1535	12.2513	13.8277
17	35.3886	36.1535	12.2513	13.8277
18	35.3886	36.1535	12.2513	13.8277
19	35.688	36.1535	11.8921	13.8277
20	35.3562	36.1535	11.7524	13.8277
21	35.2238	36.1535	11.6802	13.8277
22	44.0416	45.1919	14.4284	17.2846
23	44.1817	45.1919	14.4422	17.2846
24	35.5326	36.1535	11.519	13.8277
25	35.3596	36.1535	11.4629	13.8277
26	35.231	36.1535	11.5316	13.8277
27	35.5482	36.1535	11.5002	13.8277
28	35.4758	36.1535	11.4768	13.8277
29	35.1944	35.8971	10.4176	12.5706
30	35.1542	35.8971	10.8404	13.0235
31	35.1241	35.6059	10.8311	12.5643
32	35.1016	35.6379	10.8242	12.3671
33	35.9345	36.5473	14.8761	16.9153
34	35.9216	36.6663	13.0817	15.041
35	35.5659	36.1407	11.6251	13.3787
36	35.2819	35.7465	10.9373	12.3442
37	35.2765	36.0332	11.4124	12.7151
38	35.2725	35.8778	11.4111	12.7911
39	35.2695	35.7622	11.4101	12.7499
40	44.0841	44.5949	14.2617	15.8989

Figura 42 - Tabelas dos custos disponibilizadas pelo modelo para os cenários 21 e 23

A tabela 12 apresenta análise dos principais resultados da comparação dos cenários 21 e 23.

Tabela 12 - Análise de comparação dos resultados do cenários 21 com o cenário 23

Variáveis	Cenário 21/23	Análise de resultados
Annual growth rate(%)	0.21 / 0.0	No cenário 21, o aumento da carga começa a partir da semana 18 com um período de crescimento (<i>delay</i>) de 4 semanas, já no cenário 23 o aumento verifica-se a partir da semana 30 com o mesmo <i>delay</i> .
Step week to start	18 / 30	Os valores da carga semanal são superiores no cenário 21 atendendo ao valor da taxa de crescimento de 21% contra 0% do cenário 23.
Restantes variáveis	valores iguais	No cenário 23, os custos de distribuição e <i>crossdocking</i> por tonelada de carga são superiores. Os valores das variáveis dos custos fixos são iguais nos 2 cenários e como no cenário 23 a carga diminui, o modelo prevê aumento nos valores destes rácios para o cenário 23.

Para analisar os efeitos de um possível reforço da frota própria para ter capacidade de entrega da carga semanal e reduzir a dependência da subcontratação, efetuou-se uma simulação onde apenas se alterou a variável do número de camiões comprados a leasing, duplicando a frota própria. Este novo cenário (24) também para 2021 será comparado com o cenário inicial (21):

- Cenário 21: *Truck buy cash or leasing (un) = 15 => Own fleet trucks (un) = 40*
- Cenário 24: *Truck buy cash or leasing (un) = 55 => Own fleet trucks (un) = 80*

Na figuras 43 são apresentados os gráficos com comparação dos resultados destes cenários, onde é possível verificar os efeitos que o aumento da frota própria (pela compra de camiões) tem no custo global com a frota própria, custos com subcontratação e com os custos distribuição.

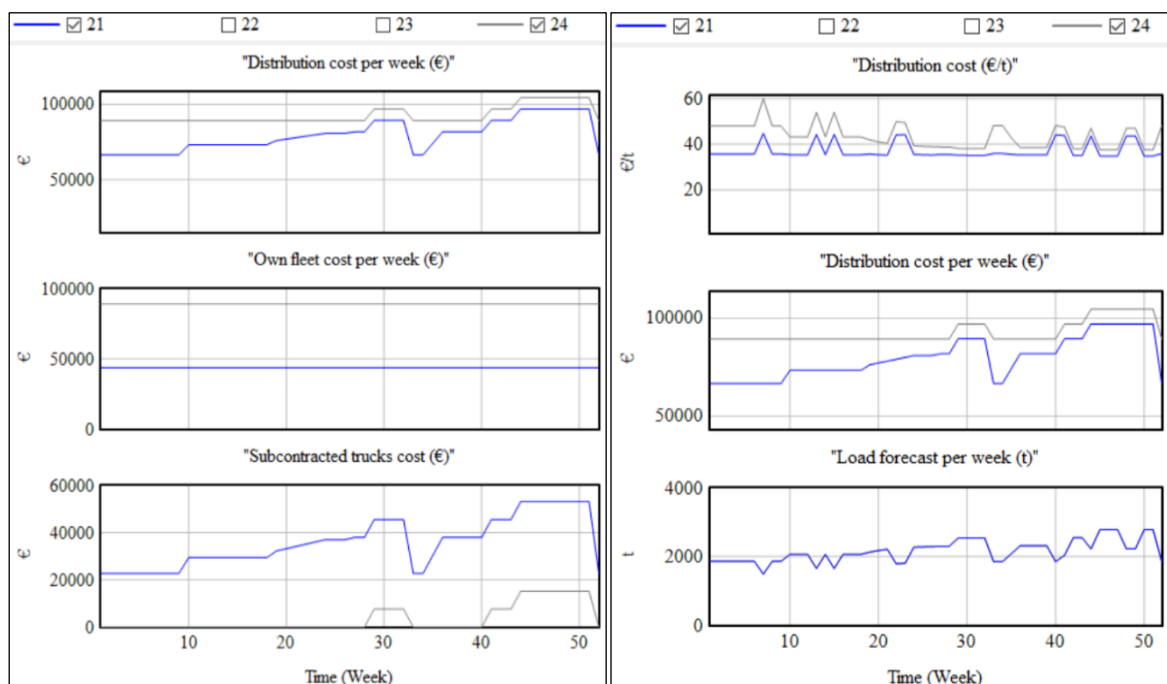


Figura 43 - Gráficos comparativos dos custos do cenário 21 com o cenário 24

A figura 44 apresenta o gráfico de comparação do custo total de distribuição por tonelada de carga calculada pelo modelo para os cenários 21 e 24, com melhor visibilidade dos valores.

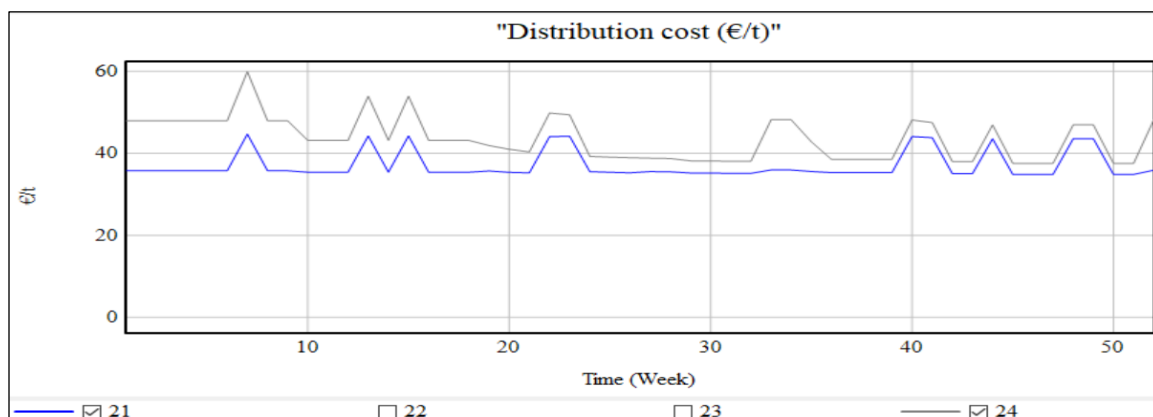


Figura 44 - Gráfico do custo da distribuição do cenário 21 comparado com o cenário 24

Na tabela 13 é realizada uma análise dos principais resultados da comparação do cenário 21 com o cenário 24.

Tabela 13 - Análise de comparação dos resultados do cenários 21 com o cenário 24

Variáveis	Cenário 21/24	Análise de resultados
Truck buy cash or leasing (un)	15 / 55	No cenário 24 verifica-se uma clara redução dos camiões necessários subcontratar ao longo do ano. Neste cenário, até à semana 20 não é necessário subcontratar camiões, assim como entre a semana 33 e 35.
Own fleet trucks (un)	40 / 80	
Restantes variáveis	valores iguais	Os custos com subcontratação no cenário 24 são claramente inferiores ao cenário 21, já os custos com frota própria quase duplicaram no cenário 24 (€84.000 semanais contra €44.000) Os custos de distribuição no cenário 24 são superiores ao cenário 21, assim como o rácio dos custos de distribuição por tonelada uma vez que os valores da carga semanal são iguais para os dois cenários. Na análise dos cenários, conclui-se que o recurso à subcontratação é vantajoso para os custos da distribuição uma vez que permite ajustar os recursos à carga e assim, evitar custos com camiões parados.

Nos quatro cenários analisados, é possível constatar que o modelo além da possibilidade de efetuar várias simulações, permite fazê-lo de forma flexível uma vez que o utilizador pode selecionar e alterar os valores das variáveis que pretende analisar e simultaneamente observar os resultados de forma dinâmica uma vez que o modelo disponibiliza gráficos e tabelas com resultados imediatos.

4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

4.1. Trabalho realizado

O presente trabalho baseado em dinâmica de sistemas, teve como objetivo principal, estudar e desenvolver um sistema de apoio à decisão que permita, de forma rápida e intuitiva, auxiliar os gestores de empresas de transportes de mercadorias, fazer simulações da carga semanal ao longo do ano tendo por base, dados históricos da empresa, o crescimento económico expectável, a entrada ou saída de clientes e a sazonalidade da atividade. Com base nos resultados das simulações da carga semanal, o modelo deve também simular a quantidade de recursos (Camiões) necessários para garantir o cumprimento da entrega da carga considerando os fatores que influenciam o custo da distribuição para tomar as melhores opções em termos económicos, não perdendo o foco no cumprimento do serviço ao cliente.

Assim, com a convicção da utilidade do modelo para as empresas de transportes em grupagem, tendo como objetivo de dar resposta a questão inicialmente colocada na presente dissertação, foi então, no âmbito da dinâmica de sistemas e com recurso ao software *Vensim*, desenvolvido um modelo que considerasse as principais variáveis que permitam simular valores de carga semanal ao longo do ano e apoiar na decisão dos recursos necessários para cumprir com a entrega da carga considerando todos fatores de custo da distribuição.

O modelo, apesar de se apoiar num caso prático de uma empresa de transporte de mercadorias, foi desenvolvido com a preocupação de ser aplicável a qualquer empresa do setor e que fosse acessível a todos utilizadores independentemente dos seus conhecimentos técnicos, podendo ainda ser ajustável em função das necessidades de cada empresa.

Para testar a validade do modelo, foram utilizados dados de um caso real para simular cenários para os anos 2019, 2020 e 2021 e comparar os resultados simulados com os valores reais, tendo-se verificado em todas as análises efetuadas, correspondência entre os valores simulados pelo modelo e os valores reais. De salientar que os valores reais do primeiros semestre do ano 2021 seguem a tendência dos valores simulados pelo modelo.

A ferramenta permite ao utilizador, efetuar as simulações que entender necessárias, comparar cenários recorrendo às facilidades gráficas e visuais disponibilizadas pelo modelo, ajudando nas opções e tomada de decisões sobre os recursos necessários para cumprir com o serviço de entrega e ao mesmo tempo, apoiar na decisão sobre a melhor estratégia para assegurar os recursos (pela subcontratação, por frota própria, ou pelos dois modos) com o objetivo de monitorizar e controlar os custos da distribuição.

Com a pesquisa e o trabalho realizado, foi possível concluir que a dinâmica de sistemas é indiscutivelmente uma ferramenta que auxilia o gestor de uma empresa de transportes, no processo de decisão.

4.2. Contributos técnicos e científicos

A indústria 4.0 aplica-se a vários setores de atividade e o setor dos transportes têm aproveitado o desenvolvimento tecnológico fomentado pelas tecnologias da I4.0 para inovarem a sua atividade. Os transportes, através da I4.0 tem utilizado a inteligência artificial em atividades como a gestão de processos, comunicação e contratação de parceiros, os veículos de transporte contam com tecnologias para otimizarem a sua utilização, facilitarem o trabalho do motorista e melhorar a qualidade do serviço prestado nas entregas, a integração de sistemas suportada na IoT e a partilha de documentos digitais permite que os diversas sistemas utilizados na gestão de transportes funcionem totalmente conectados e com informação partilhada em tempo real, o rastreamento de remessas e da carga com utilização de RFID, GPS e outros sensores conectados permite que a movimentação de cargas seja mais eficiente e controlado.

A I4.0 através de uma das suas tecnologias - a simulação, tem possibilitado uma certa previsibilidade na gestão do transporte uma vez que através desta ferramenta é possível apoiar os gestores a identificar atempadamente necessidades e planejar soluções para as suas operações evitando riscos para a atividade do transporte. A utilização de modelos baseados em dinâmica de sistemas por meio da simulação e análise de cenários para auxiliar os gestores na resolução de problemas intrínsecos ao setor dos transportes, comprova a mais valia que esta ferramenta da I4.0 traz ao setor.

A elaboração deste trabalho ajudou a perceber a importância da simulação no setor dos transportes, através do desenvolvimento de um modelo que aplicado a um caso prático, permite fazer simulações e obter resultados que servem de auxílio para identificar, avaliar e quantificar os recursos necessários e o modo mais vantajoso (camiões próprios, subcontratados ou os dois) com o objetivo de cumprir com o serviço ao cliente e controlar os custos da distribuição.

Os resultados do trabalho são de utilidade inquestionável para a empresa que serviu de caso real e espera-se que possam revelar-se interessantes para outras empresas do setor.

4.3. Dificuldades encontradas

O desenvolvimento deste trabalho e nomeadamente a construção da ferramenta de apoio à decisão, apresentou alguns obstáculos:

- Total desconhecimento inicial do autor pelo software escolhido para criar o modelo – *Vensim*. A falta de conhecimento obrigou a um maior esforço e empenho, constante pesquisa e consulta de manuais e pesquisas online para resolver problemas que foram surgindo.
- Definição das variáveis que interferem com o setor dos transportes, assim como a relação e interação entre as mesmas por forma a obter os resultados desejados.
- A utilização de dados de um caso real para servir de suporte à validação do modelo e dos resultados.
- Conjugação do timing do trabalho com uma atividade profissional muito exigente num período hostil devido às contingências causadas pela pandemia provocada pela Covid-19.

Contudo, as dificuldades encontradas representaram um enorme desafio na medida que permitiram desenvolver conhecimentos numa ferramenta de simulação de grande utilidade em qualquer atividade e concretamente na gestão de transportes, pela sua utilidade no apoio à decisão.

4.4. Limitações do modelo e investigação futura

O trabalho desenvolvido, como qualquer projeto em contexto académico apesar da componente prática envolvida no mesmo, apresenta algumas limitações e tem espaço para desenvolvimentos futuros.

Como limitações do trabalho, podem-se apresentar:

- Os resultados do modelo são influenciados por valores introduzidos em determinadas variáveis que são definidas pelo utilizador e por isso dependem do grau de conhecimento, experiência de cada utilizador.
- O modelo foi construído com base na vasta experiência e conhecimento do setor dos transportes e suportado com um caso real, ainda assim, podem não estar contempladas outras variáveis importantes que interferem com atividade.
- O modelo apenas considera atividade relacionada com a distribuição, não contempla outros serviços que possam ser prestados pelas mesmas viaturas.

O trabalho até agora desenvolvido, apesar da sua evidente utilidade prática no apoio à decisão, não pode ser dado como terminado e abre espaço a novos desenvolvimentos e soluções futuras, sendo abaixo enumeradas algumas propostas:

- Aplicar o modelo a outros casos reais de forma a investigar mais variáveis pertinentes considerar no modelo e/ou outras parametrizações e relações funcionais entre as variáveis.
- Na capacidade de distribuição média por camião (em toneladas e em stops), considerar fatores como características da carga, áreas de distribuição e condições de tráfego para que o modelo seja ajustável a novas unidades de negócio e novas empresas.
- Incluir várias tipologias de veículos, considerar as suas restrições de peso e volume e parametrizar as relações com variáveis do ponto anterior para o cálculo da capacidade de distribuição.
- Integrar esta ferramenta com outras tecnologias como GPS das viaturas por forma a obter dados atualizados das médias e da quilometragem, assim como a partilha com valores reais de uma base de dados e transpor todos estes dados para o modelo por forma a melhorar a fiabilidade dos resultados com atualização dos valores de forma dinâmica.
- Com base no modelo desenvolvido, ajustar para outras atividades de transporte como o transporte de carga internacional em FTL (*Full Truckload*) ou parametrizar para outras unidades físicas como paletes ou contentores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, K. A., & Bell, M. G. H. (1994). System dynamics applicability to transportation modeling. *Transportation Research Part A*, 28(5), 373–390. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90022-1)
- Adamson, G., Wang, L., Holm, M., & Moore, P. (2017). Cloud manufacturing—a critical review of recent development and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(4–5), 347–380. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1031704>
- Al-khatib, I. A., Eleyan, D., & Garfield, J. (2016). A system dynamics approach for hospital waste management in a city in a developing country : the case of Nablus , Palestine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(9), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5487-9>
- Allen, J., Browne, M., & Cherrett, T. (2012). Investigating relationships between road freight transport , facility location , logistics management and urban form. *Journal of Transport Geography*, 24, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.06.010>
- Alves, R., Lima, R. D. S., Pinho, A. F. de, & Holguín-Veras, J. (2019). Modelo de simulação baseada em agentes para avaliar política de distribuição de cargas urbanas do e-commerce. *Transportes*, 27(3), 99–114. <https://doi.org/10.14295/transportes.v27i3.2034>
- APA - agência portuguesa do ambiente. (2019). *Pegada energética e carbónica dos transportes*. REA. <https://rea.apambiente.pt/content/pegada-energetica-e-carbonica-dos-transportes>
- Arnold, F., Cardenas, I., Sörensen, K., & Dewulf, W. (2018). Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0272-6>
- Bahrin, K., Aiman, M., Othman, F., Hayati, N., Azli, N., & Talib, F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78, 6–13.
- Bakhtadze, N., Karsaev, O., Sabitov, R., Smirnova, G., Eponeshnikov, A., & Sabitov, S. (2020). Identification models in flexible delivery systems for groupage cargoes. *Procedia Computer Science*, 176, 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.08.024>
- Barisa, A., Romagnoli, F., Blumberga, A., & Blumberga, D. (2015). Future biodiesel policy designs and consumption patterns in Latvia: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 88, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.067>
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Bartodziej, C. J. (2017). The Concept Industry 4.0. Em *The Concept Industry 4.0* (pp. 27–50). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4>
- Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2017). Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3970–3984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.057>
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>
- Benedettini, O., & Tjahjono, B. (2009). Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1), 191–199. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1686-z>
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.

- <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bernardino, J. P. R., & Van der Hoofd, M. (2013). Parking policy and urban mobility level of service - System dynamics as a modelling tool for decision making. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 13(3), 239–258. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2013.13.3.3001>
- Bokor, Z., & Markovits-Somogyi, R. (2015). Applying Activity-based Costing at Logistics Service Providers. *Transportation Engineering*, 43(2), 98–105. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7700>
- Borenstein, D. (1998). Towards a practical method to validate decision support systems. *Decision Support Systems*, 23(3), 227–239. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(98\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(98)00046-3)
- Bowen, J. T. (2008). Moving places : the geography of warehousing in the US. *Journal of Transport Geography*, 16(6), 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.03.001>
- Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (2007). Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento. Em *Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento* (pp. 594–594). São Paulo: Atlas.
- Brabänder, C., & Braun, M. (2020). Bringing economies of integration into the costing of groupage freight. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 19(6), 366–385. <https://doi.org/10.1057/s41272-020-00237-3>
- Çetinkaya, S., & Lee, C. Y. (2002). Optimal outbound dispatch policies: Modeling inventory and cargo capacity. *Naval Research Logistics*, 49(6), 531–556. <https://doi.org/10.1002/nav.10030>
- Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, 3(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009>
- Chopra, S. (2003). Designing the distribution network in a supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 39(2), 123–140. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(02\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00044-3)
- Cimino, M. G. C. A., Palumbo, F., Vaglini, G., Ferro, E., Celandroni, N., La, D., Bpmn, R. Á., & Workflow, Á. (2017). Evaluating the impact of smart technologies on harbor ' s logistics via BPMN modeling and simulation. *Information Technology and Management*, 18(3), 223–239. <https://doi.org/10.1007/s10799-016-0266-4>
- Closs, Stank, Autry, & Daugherty. (2015). Reimagining the 10 Megatrends That Will Revolutionize Supply Chain Logistics. *Transportation Journal*, 54(1), 7–32. <https://doi.org/10.5325/transportationj.54.1.0007>
- Comissão Europeia. (2011). *Livro Branco dos Transportes - 2050*.
- Correia, A. B., Deus, P., & Baptista, J. R. (2016). Indústria 4.0: Construir a empresa digital. *PricewaterhouseCoopers Portugal*, 1, 1–30.
- COTEC Portugal. (2019). The Impacto of Industry 4.0 on Portuguese SMEs. *COTEC Portugal*.
- Cotteleer, M., & Sniderman, B. (2017). Forces of change: Industry 4.0. *Deloitte Insights*, 18.
- Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 272–288. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00233-7)
- Crainic, T. G., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2009). Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(6), 541–557. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.07.002>
- Creswell, J. W. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications.
- Cruz-Mejía, O., Márquez, A., & Monsreal-Berrera, M. M. (2019). Product Delivery and Simulation

- for Industry 4.0. Em M. M. Gunal (Ed.), *Simulation for Industry 4.0*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04137-3>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204(December 2017), 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Diallo, S. Y., Gore, R. J., Padilla, J. J., & Lynch, C. J. (2015). An overview of modeling and simulation using content analysis. *Scientometrics*, 103(3), 977–1002. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1578-6>
- Decreto-Lei n.º 294/97 de 24 de Outubro, Diário da República, 1ª Série-A (1997). <https://doi.org/10.2307/2317781>
- Decreto Regulamentar n.º 25/2009 de 14 de Setembro, Diário da República, 1.ª série — N.º 178 — 11 de setembro de 2009 6270 (2009). <https://dre.pt/application/conteudo/489774>
- Dong, L., Shi, D., & Zhang, F. (2017). 3D Printing vs. Traditional Flexible Technology: Implications for Operations Strategy. *SSRN Electronic Journal*, 1–58. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2847731>
- Dundović, Č., Bilić, M., & Dvornik, J. (2009). Contribution to the Development of a Simulation Model for a Seaport in Specific Operating Conditions. *Promet-Traffic&Transportation*, 21(5), 331–340. <https://doi.org/10.7307/ptt.v21i5.248>
- Durana, P., Kral, P., Stehel, V., Lazaroiu, G., & Sroka, W. (2019). Quality Culture of Manufacturing Enterprises : *Social sciences*, 8(4), 124.
- Dvornik, J., Munitić, A., & Bilić, M. (2006). Simulation modelling and heuristics optimization of material flow of the port cargo system. *Promet -Traffic&Trasnportation*, 18(2), 123–135. <https://doi.org/10.7307/ptt.v18i2.677>
- Elbert, R., Scharf, K., & Reinhardt, D. (2017). Simulation of the order process in maritime hinterland transportation: The impact of order release times. *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, 53(9), 1689–1699.
- Europeia, C. (2017). *Digital-Transformation-Monitor (2017) País: Portugal “Indústria 4.0”. Relatório técnico, Comissão Europeia*. <https://ati.ec.europa.eu/reports/policy-briefs/portugal-industria-40>
- Ferreira, Luis Pinto, Ares, E., Pelaez, G., Prieto, D., & Chao, A. (2012). Optimisation of a production line using simulation and lean techniques. Em *Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop (SW12)*.
- Ferreira, Luís Pinto, Gómez, E. A., Lourido, G. P., & Salgado, M. (2010). Analysis of the Influence of Conveyor Speed on the Behaviour of an Automobile Assembly Line. *International journal of advanced engineering sciences and technologies (IAEST)*, 2(2), 119–123. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2010.41>
- Ferreira, Luís Pinto, Gómez, E. A., Lourido, G. P., & Tjahjono, B. (2011). Optimization of a multiphase multiproduct production line based on virtual cells. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011, 1*, 616–621.
- Ferreira, Luís Pinto, Pereira, G. A., & Machado, R. J. (2005). Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Montagem de Auto-Rádios. *Investigação Operacional*, 25(1), 37–62.
- Ferreira, W. D. P., Armellini, F., & Santa-eulalia, L. A. De. (2020). Simulation in industry 4 . 0 : A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>

- Forrester, J. (1994). System dynamics, system thinking, and soft OR. *System Dynamics Review*, 10(2–3), 245–256. <https://doi.org/10.1093/clinchem/29.4.741>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210(September 2018), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gajsek, B., Marolt, J., Rupnik, B., Lerher, T., & Sternad, M. (2019). Using maturity model an discrete-event simulation for Industry 4.0 implemntation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 488–499.
- Gerhátová, Z., Zitrický, V., & Klapita, V. (2021). Industry 4.0 Implementation Options in Railway Transport. *Transportation Research Procedia*, 53(2019), 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.003>
- Gerrits, B., Mes, M., & Schuur, P. (2013). A simulation model for the planning and control of AGVS at automated container terminals. *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, 53(9), 1689–1699.
- Gingu, B., Cavalieri, S., & Cavalieri, S. (2017). Produtioon systems Flow modelling using decomposition method and required buffers. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(2), 207–218.
- Gnimpieba, D. R., Nait-Sidi-moh, A., Durand, D., & Fortin, J. (2015). Using Internet of Things technologies for a collaborative supply chain: Application to tracking of pallets and containers. *Procedia Computer Science*, 56(1), 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.251>
- Goleman, D., Boyatzis, R., & Mckee, A. (2017). Indústria 4.0 | Estratégia Nacional para a Digitalização da Economia. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Gružasuskas, V., Baskutis, S., & Navickas, V. (2018). Minimizing the trade-off between sustainability and cost effective performance by using autonomous vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 184, 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.302>
- Haghshenas, H., Vaziri, M., & Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.11.003>
- Hanbazazah, A. S., Abril, L., Erkoc, M., & Shaikh, N. (2019). Freight consolidation with divisible shipments, delivery time windows, and piecewise transportation costs. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.043>
- Hang, W., & Li, X. (2010). Application of system dynamics for evaluating truck weight regulations. *Transport Policy*, 17(4), 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.01.007>
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., & Kohl, H. (2016). Holistic Approach for Human Resource Management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Em *Technische Universitat Dortmund* (Vol. 1, Número 1). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Holguín-Veras, J., & Sánchez-Díaz, I. (2016). Freight Demand Management and the Potential of Receiver-Led Consolidation programs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 84, 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.013>

- INE, P. (2020). *Mercadorias transportadas pelas empresas de transporte rodoviário*. <https://www.pordata.pt/Portugal/Mercadorias+transportadas+pelas+empresas+de+transporte+rodoviário+total++nacional+e+internacional+++Continente-3104>
- Inturri, G., Le Pira, M., Giuffrida, N., Ignaccolo, M., Pluchino, A., Rapisarda, A., & D'Angelo, R. (2019). Multi-agent simulation for planning and designing new shared mobility services. *Research in Transportation Economics*, 73, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.11.009>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829–846. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>
- Izadi, A., Nabipour, M., & Titidez, O. (2020). Cost Models and Cost Factors of Road Freight Transportation : A Literature Review and Model Structure. *Fuzzy Information and Engineering*, 00(0), 1–21. <https://doi.org/10.1080/16168658.2019.1688956>
- Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Filho, M. G., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>
- Jacyna, M., & Wasiak, M. (2015). Costs of road transport depending on the type of vehicles. *Combustion Engines*, 162(3), 85–90.
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., & Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business : A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>
- Ji, C., Shao, Q., Sun, J., Liu, S., Pan, L., Wu, L., & Yang, C. (2016). Device data ingestion for industrial big data platforms with a case study. *Sensors (Switzerland)*, 16(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s16030279>
- Junior, D. B., Filho, G. L. T., & Maria Rachel Russo Seydell. (2016). Social, technical-economic, environmental and political assessment for the evaluation of transport modes for petroleum products. *Journal of Transport Literature*, 10(1), 25–29. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n1a5>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion: Berlin, Germany.
- Kersten, W., Blecker, T., & Ringle, C. M. (2015). *Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains: Technologies, Business Models and Risk Management*. Berlin: epubli GmbH.
- Kopfer, H. W., Kopfer, H., & Wang, X. (2011). Limit and Degree of Autonomy in Groupage Systems: Challenges, Chances and Barriers for Horizontal Cooperation in Operational Transportation Planning. Em M. Hülsmann et al. (Ed.), *Autonomous Cooperation and Control in Logistics* (pp. 61–75). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6>
- Kot, S. (2015). Cost Structure in Relation to the Size of road. *Promet – Traffic&Transportation*, 27(5), 387–394. <https://doi.org/10.7307/ptt.v27i5.1687>
- Kovács, G. (2017). First cost calculation methods for road freight transport activity. *Transport and Telecommunication*, 18(2), 107–117. <https://doi.org/10.1515/ttj-2017-0010>
- KPMG Portugal. (2019). *Portugal i4.0 (Indústria 4.0) – Fase II*. <https://cotecportugal.pt/pt/2020/03/18/portugal-quer-estar-entre-lideres-da-inovacao/>
- Krajewska, M. A., & Kopfer, H. (2006). Collaborating freight forwarding enterprises: Request allocation and profit sharing. *OR Spectrum*, 28(3), 301–317. <https://doi.org/10.1007/s00291->

005-0031-2

- Laaper, S., Mussomeli, A., & Gish, D. (2017). The Rise of the Digital Supply network. *Deloitte University Press*, 45(3), 1–21.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & information systems engineering. *The International Journal of WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, 6(4), 239–242.
- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Li, D., Yao, Y., Shao, Z., & Wang, L. (2014). From digital Earth to smart Earth. *Chinese Science Bulletin*, 59(8), 722–733. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0100-x>
- Liao, Y., Deschamps, F., Freitas, E. De, & Loures, R. (2017). Past , present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Liao, Y., Loures, E. R., Deschamps, F., Brezinski, G., & Venâncio, A. (2018). The impact of the fourth industrial revolution: A cross-country/region comparison. *Production*, 28(20), 1–18. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180061>
- Linares, M. P., Montero, L., Lorente, E., Serch, O., Navarro, G., Salmeron, J., & Casanovas, J. (2017). Analytics tool for assessing innovative mobility concepts, vehicles and city policies (CitScale). *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017*, 385–390. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2017.8005702>
- Liu, P., & Mu, D. (2015). Evaluating sustainability of truck weight regulations: A system dynamics view. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1711–1730. <https://doi.org/10.3926/jiem.1593>
- Liu, S., Triantis, K. P., & Sarangi, S. (2010). A framework for evaluating the dynamic impacts of a congestion pricing policy for a transportation socioeconomic system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(8), 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.04.001>
- Liu, X., Grant, D. B., McKinnon, A. C., & Feng, Y. (2010). An empirical examination of the contribution of capabilities to the competitiveness of logistics service providers: A perspective from China. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 40(10), 847–866. <https://doi.org/10.1108/09600031011093232>
- Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., & Liu, Z. (2017). Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4(1), 27–40. <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Lukac, D. (2016). The fourth ICT-based industrial revolution «industry 4.0» - HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. *2015 23rd Telecommunications Forum, TELFOR 2015, March*, 835–838. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377595>
- Makarova, I., Shubenkova, K., Buyvol, P., & Mavrin, V. (2019). Safety Features of the Transport System in the Transition to industry 4.0. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 86(4), 79–99.
- Manohar, G., Rao, K., & Devi, S. (2014). Evaluation of policies to reduce transportation pollution using system dynamics. *Environment Protection Engineering*, 40(4), 143–153. <https://doi.org/10.5277/epe140412>
- Maslarić, M., Nikoličić, S., & Mirčetić, D. (2016). Logistics Response to the Industry 4.0: The Physical

- Internet. *Open Engineering*, 6(1), 511–517. <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0073>
- Mesa-Arango, R., & Ukkusuri, S. V. (2013). Benefits of in-vehicle consolidation in less than truckload freight transportation operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 60, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.05.007>
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N. (2016). Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing. *Procedia CIRP*, 55, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.038>
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., & Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78, 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- Mutanov, G., Ziyadin, S., & Serikbekuly, A. (2020). Application of system-dynamic modeling to improve distribution logistics processes in the supply chain. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 22(3), 29–39. <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.3.29-39>
- Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 657–679. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- Ni, L., & Wang, X. (2021). Load factors of less-than-truckload delivery tours: An analysis with operation data. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150(December 2019), 102296. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102296>
- ODS. (2020). *Objetivos de desenvolvimento sustentável*. <https://www.ods.pt/objectivos/objectivos/?portfolioCats=24>
- Peng, M., Peng, Y., & Chen, H. (2014). Post-seismic supply chain risk management: A system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. *Computers and Operations Research*, 42, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.03.003>
- Pfeiffer, S. (2016). Robots, Industry 4.0 and Humans, or Why Assembly Work Is More than Routine Work. *Societies*, 6(2), 16. <https://doi.org/10.3390/soc6020016>
- Pleszko, J. (2012). Multi-Variant Configurations of Supply Chains in the Context of Synchronodal Transport. *LogForum*, 8(4), 287–295.
- Portugal, B. de. (2017a). *Setor dos Transportes em Portugal | 2017*. Banco de Portugal. <https://www.bportugal.pt/page/infografia-estudo-da-central-de-balancos-analise-das-empresas-do-setor-dos-transportes-2017>
- Portugal, B. de. (2017b). *Setor dos transportes em portugal 2017*. Estudo. <https://www.bportugal.pt/page/infografia-estudo-da-central-de-balancos-analise-das-empresas-do-setor-dos-transportes-2017>
- Quivy, R., & Campenhoudt, L. V. (1998). *Manual de investigação em ciências sociais* (2ª edição). Lisboa: gradiva, 8.
- Ralston, P., & Blackhurst, J. (2020). Industry 4 . 0 and resilience in the supply chain : a driver of capability enhancement or capability loss ? *International Journal of Production Research*, 58(16), 5006–5019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1736724>

- Rassafi, A. A., Jafari, M. O., & Javanshir, H. (2014). An Appraisal of Sustainable Urban Transportation: Application of a System Dynamics Model. *International Journal of Transportation Engineering*, 2(1), 47–66. http://www.ijte.ir/article_6708.html
- Rifkin, J. (2011). *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Palgrave macmillan.
- Ristić, O., Iričanin, B. D., & Mijailović, V. (2016). Dynamic modeling and simulation of power transformer maintenance costs. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 13(2), 285–299. <https://doi.org/10.2298/SJEE1602285R>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016a). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2), 1–11. <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016b). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2). <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. Em *Organizacija* (Vol. 50, Número 3). <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
- Rodrigue, J. (2006). Challenging the Derived Transport Demand Thesis: Issues in Freight Distribution. *Environment & Planning A*, 38(8), 1449–1462.
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). The geography of transport systems. Em *The Geography of Transport Systems*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
- Roy, D., Nigam, S., de Koster, R., Adan, I., & Resing, J. (2019). Robot-storage zone assignment strategies in mobile fulfillment systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 119–142. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.11.005>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *Boston Consulting*, 9(1), 54–89. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Sá, J., Ferreira, L. P., Dieguez, T., Sá, J. C., & Silva, F. J. G. (2021). Role of the Industry 4.0 in the Wine Production and Enotourism Sectors. Em J. V. de Carvalho, Á. Rocha, P. Liberato, & A. Peña (Eds.), *Advances in Tourism, Technology and Systems. ICOTTS 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 208, pp. 171–180). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4256-9_16
- Sá, J., Ferreira, L. P., Dieguez, T., Sá, J., Silva, C., & Da Silva, F. J. G. (2022). Industry 4.0 in the Wine Sector – Development of a Decision Support System Based on Simulation Models. Em M. Filomena, S. Justyna, & T. Vitalii (Eds.), *Innovations in Industrial Engineering* (pp. 371–384). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78170-5>
- Sadler, I. (2007). *Logistics and supply chain integration*. Sage.
- Santos, M. Y., Oliveira e Sá, J., Andrade, C., Vale Lima, F., Costa, E., Costa, C., Martinho, B., & Galvão, J. (2017). A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, 37(6), 750–760. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012>
- Santos, P., Ferreira, L. P., Dieguez, T., & Tjahjono, B. (2019). Supporting Strategic Management Decisions at a Casino using System Dynamics. *Modeling and Simulating Business Dynamics. Selected Papers on System Dynamics Collection*, 156–170.
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). Chapter 4: Understanding research philosophy and approaches to theory development. Em *Research Methods for Business Students* (Número January, pp. 128–171). www.pearson.com/uk

- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25–35. <https://doi.org/10.1080/02286203.2016.1219806>
- Scheidegger, A. P. G., Fernandes Pereira, T., Moura de Oliveira, M. L., Banerjee, A., & Barra Montevechi, J. A. (2018). An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. *Computers and Industrial Engineering*, 124, 474–492. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.046>
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R. C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P. (2015). Industry 4.0 - Potentials for creating smart products: Empirical research results. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 208, 16–27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19027-3_2
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond*. World Economic Forum.
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2016). Virtual Engineering Factory: Creating Experience Base for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, 47(1–2), 32–47. <https://doi.org/10.1080/01969722.2016.1128762>
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Toro, C., & Szczerbicki, E. (2015). Virtual engineering object (VEO): Toward experience-based design and manufacturing for industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, 46(1–2), 35–50. <https://doi.org/10.1080/01969722.2015.1007734>
- Shepherd, S. P. (2014a). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2(2), 83–105. <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>
- Shepherd, S. P. (2014b). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B*, 2(2), 83–105. <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>
- Silva, V., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., Tjahjono, B., & Ávila, P. (2021). Simulation-Based Decision Support System to Improve Material Flow of a Textile Company. *Sustainability*, 13(5), 2947. <https://doi.org/10.3390/su13052947>
- Singh, S., Kumar, R., Panchal, R., & Tiwari, M. K. (2020). Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1792000>
- Sodhi, M. S., & Tang, C. S. (2017). Supply Chains Built for Speed and Customization. *City Research Online*, 37(9), 1591–1601.
- Speranza, M. G. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 830–836. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.032>
- Spiegler, V. L. M., & Naim, M. M. (2014). The impact of freight transport capacity limitations on supply chain dynamics. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 17(1), 64–88. <https://doi.org/10.1080/13675567.2013.838012>
- Sterman, J. D. (2002). *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Em *Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division Working Paper Series*.
- Sternad, M. (2018). Metrics of Logistics Costs in Slovenian Companies. *Business Logistics in Modern Management*, 18, 125–134.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business.

Multinational Business Review.

- Sundmaeker, H., Guillemin, P., Friess, P., & Woelfflé, S. (2010). Vision and Challenges for Realising the Internet of Things. *Cluster of european research project on Internet of Things, European Commision*, 3(3), 230.
- Sung, T. K. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 132(October 2017), 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005>
- Tang, C. S., & Veelenturf, L. P. (2019). The strategic role of logistics in the industry 4.0 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129(June), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.004>
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- Thamsen, P. U., & Wulff, S. (2016).ACHEMA-Nachbericht: Industrie 4.0 und aktuelle Trends in der Pumpenindustrie - Ein Rückblick auf dieACHEMA 2015. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 88(1–2), 15–19. <https://doi.org/10.1002/cite.201690002>
- Tonelli, F., Demartini, M., Loleo, A., & Testa, C. (2016). A Novel Methodology for Manufacturing Firms Value Modeling and Mapping to Improve Operational Performance in the Industry 4.0 Era. *Procedia CIRP*, 57, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.022>
- Uden, L., & He, W. (2017). How the Internet of Things can help knowledge management: a case study from the automotive domain. *Journal of Knowledge Management*, 21(1), 57–70. <https://doi.org/10.1108/JKM-07-2015-0291>
- Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61, 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>
- Vecchio, P. Del, Secundo, G., Maruccia, Y., & Passiante, G. (2019). A system dynamic approach for the smart mobility of people: Implications in the age of big data. *Technological Forecasting and Social Change*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119771>
- Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. (2016). Virtualization of food supply chains with the internet of things. *Journal of Food Engineering*, 176, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009>
- Vrecko, I., Kovac, J., Rupnik, B., & Gajsek, B. (2019). *Using queuing simulation model in production process innovations* (Vol. 18).
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 16(20), 7373–7380. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2565621>
- Wang, J. F., Lu, H. P., & Peng, H. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 83–89. [https://doi.org/10.1016/s1570-6672\(08\)60027-6](https://doi.org/10.1016/s1570-6672(08)60027-6)
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
- Wang, X., Disney, S. M., & Wang, J. (2012). Stability analysis of constrained inventory systems with transportation delay. *European Journal of Operational Research*, 223(1), 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.014>
- Wen, L., & Bai, L. (2017). System Dynamics Modeling and Policy Simulation for Urban Traffic: a Case

- Study in Beijing. *Environmental Modeling and Assessment*, 22(4), 363–378. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9539-x>
- Westerweel, B., Basten, R. J. I., & van Houtum, G. J. (2018). Traditional or Additive Manufacturing? Assessing Component Design Options through Lifecycle Cost Analysis. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 570–585. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.015>
- Witkowski, K. (2017). Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering*, 182, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.197>
- Xu, L. Da, He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>
- Xu, L. Da, Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0 : state of the art and future trends. *International Journal of Productions Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Xu, M., David, J. M., & Kim, S. H. (2018). The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. *International Journal of Financial Research*, 9(2), 90–95. <https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>
- Yao, H., & Chen, D. (2005). A System Dynamics Model for Urban Sustainable Transportation Planning. Em *2015 23rd International Conference on Geoinformatics* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-613-4_5
- Yeo, G. T., Pak, J. Y., & Yang, Z. (2013). Analysis of dynamic effects on seaports adopting port security policy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 49, 285–301. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.039>
- Yin, R. K. (2003). Designing case studies. Em L. Maruster & M. J. Gijsenberg (Eds.), *Qualitative Research Methods* (pp. 359–386). SAGE. <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=KdneDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA359&dq=Designing+case+studies.+Qualitative+Research+Methods,+RK+yin&ots=gOomzrx8eX&sig=Jn1xeFCVDyFJDtdrWQuNJNt6TAg#v=onepage&q=Designing+case+studies. Qualitative+Research+Methods%25>
- Zheng, C., Liu, Z., Wang, C., Wang, X., & Xu, B. (2009). A system dynamics model of the interaction of aviation logistics with regional economy development in guangxi faced to CAFTA. Em *2009 International Conference on E-Business and Information System Security* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EBISS.2009.5137909>
- Zhou, G., Hui, Y. Van, & Liang, L. (2011). Strategic alliance in freight consolidation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(1), 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.07.002>
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2016). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015*, 2147–2152. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

APÊNDICE A - TABELA COM VALORES REAIS DE 2019 E VALORES SIMULADOS NO MODELO

Sem	Valores reais 2019 (S&V_040)			Modelo simulação 2019_Vensim			
	Real 2019 (Stop)	Peso real 2019 (t)	ΔPeso 2019	Load forecast per week (Stop)	Load forecast per week (t)	Rate of market (Vensim)	Working days per week
1	1 634	777.578	-0.45	2 429	789.600	-0.30	4
2	4 049	1 382.196	-0.02	3 904	1 269.000	-0.10	5
3	4 125	1 402.157	0.00	3 904	1 269.000	-0.10	5
4	3 889	1 186.553	-0.16	3 904	1 269.000	-0.10	5
5	4 169	1 279.499	-0.09	3 904	1 269.000	-0.10	5
6	3 922	1 181.908	-0.16	3 904	1 269.000	-0.10	5
7	4 021	1 370.375	-0.02	3 904	1 269.000	-0.10	5
8	4 044	1 227.787	-0.13	3 904	1 269.000	-0.10	5
9	4 193	1 222.518	-0.13	3 904	1 269.000	-0.10	5
10	3 213	1 073.261	-0.24	3 470	1 128.000	-0.25	4
11	4 196	1 221.327	-0.13	4 338	1 410.000	0.00	5
12	4 189	1 372.069	-0.02	4 338	1 410.000	0.00	5
13	4 333	1 359.709	-0.03	4 338	1 410.000	0.00	5
14	4 395	1 392.085	-0.01	4 338	1 410.000	0.00	5
15	4 098	1 264.489	-0.10	4 338	1 410.000	0.00	5
16	3 431	1 042.661	-0.26	3 470	1 128.000	-0.25	4
17	2 835	1 052.639	-0.25	3 470	1 128.000	-0.25	4
18	3 733	1 242.881	-0.12	4 338	1 410.000	0.00	5
19	4 484	1 352.218	-0.04	4 338	1 410.000	0.00	5
20	4 396	1 454.336	0.04	4 338	1 410.000	0.00	5
21	4 645	1 431.089	0.02	4 338	1 410.000	0.00	5
22	4 498	1 496.852	0.07	4 338	1 410.000	0.00	5
23	4 537	1 562.336	0.11	4 338	1 410.000	0.00	5
24	3 605	1 100.200	-0.22	3 470	1 128.000	-0.20	4
25	3 646	1 313.790	-0.06	4 338	1 410.000	0.00	5
26	4 250	1 426.255	0.02	4 338	1 410.000	0.00	5
27	4 675	1 528.279	0.09	4 772	1 551.000	0.10	5
28	4 651	1 488.934	0.06	4 772	1 551.000	0.10	5
29	4 503	1 454.060	0.03	4 772	1 551.000	0.10	5
30	4 426	1 532.324	0.09	4 772	1 551.000	0.10	5
31	4 536	1 574.566	0.12	4 772	1 551.000	0.10	5
32	4 333	1 641.368	0.17	4 772	1 551.000	0.10	5
33	2 887	1 050.098	-0.25	3 470	1 128.000	-0.20	4
34	3 572	1 393.902	-0.01	4 338	1 410.000	0.00	5
35	3 588	1 445.814	0.03	4 338	1 410.000	0.00	5
36	3 989	1 480.077	0.05	4 338	1 410.000	0.00	5
37	4 258	1 508.965	0.07	4 338	1 410.000	0.00	5
38	4 988	1 475.302	0.05	4 338	1 410.000	0.00	5
39	4 974	1 485.189	0.06	4 338	1 410.000	0.00	5
40	4 681	1 457.797	0.04	4 338	1 410.000	0.00	5
41	5 023	1 464.940	0.04	4 338	1 410.000	0.00	5
42	4 991	1 654.801	0.18	4 338	1 410.000	0.00	5
43	5 066	1 536.196	0.09	4 338	1 410.000	0.00	5
44	4 000	1 422.279	0.01	3 470	1 128.000	0.20	4
45	4 952	1 788.971	0.27	5 423	1 762.500	0.25	5
46	4 978	1 749.234	0.25	5 423	1 762.500	0.25	5
47	4 876	1 840.752	0.31	5 423	1 762.500	0.25	5
48	4 873	1 917.106	0.36	5 423	1 762.500	0.25	5
49	4 540	1 624.160	0.16	5 423	1 762.500	0.25	5
50	4 622	1 744.137	0.24	5 423	1 762.500	0.25	5
51	4 486	1 721.968	0.23	5 423	1 762.500	0.25	5
52	1 856	888.459	-0.37	2 429	789.600	-0.30	4
2019	216 854	73 058.446	280.994	223 277	72 572.700	0.00	
2018	180 728	58 640.773	225.541	-> Average load per day			
			24.6%	-> Annual growth rate (%)			
	Média sem (Exp)	Média Peso sem (t)	Média Peso (Stop) (kg)				
2019	4 170	1 404.970	336.902				
2018	3 476	1 127.707	324.470	-> Average payload per stop (Kg)			

APÊNDICE B - TABELA COM VALORES REAIS DE 2020 E VALORES SIMULADOS NO MODELO

Sem	Valores reais 2020 (S&V_040)				Simulação 2020_Vensim					
	Real 2020 (Stop)	Peso real 2020 (t)	ΔPeso 2020	Real SC 2020 (trucks)	Load forecast per week (Stop)	Load forecast per week (t)	Rate of market	SC Vensim (trucks)	Working days per week	
1	3 292	1 290.997	-0.23	16	3 662	1 234.150	-0.30	13	4	
2	5 205	1 694.490	0.01	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
3	4 827	1 769.942	0.05	20	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
4	4 934	1 585.816	-0.06	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
5	4 967	1 573.880	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
6	5 574	1 731.403	0.03	20	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
7	4 680	1 583.104	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
8	5 164	1 584.780	-0.06	15	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
9	4 668	1 683.927	0.00	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
10	4 916	1 846.656	0.10	25	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
11	5 066	1 940.213	0.16	25	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
12	5 096	1 941.115	0.16	25	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
13	4 700	1 618.627	-0.04	18	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
14	4 809	1 450.410	-0.14	12	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
15	4 098	1 339.297	-0.20	18	4 069	1 371.280	-0.20	19	4	
16	4 740	1 536.749	-0.08	14	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
17	5 121	1 572.735	-0.06	14	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
18	4 214	1 303.597	-0.22	17	4 069	1 371.280	-0.20	19	4	
19	4 925	1 448.741	-0.14	12	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
20	4 956	1 740.345	0.04	20	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
21	4 794	1 670.411	0.00	20	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
22	4 915	1 731.346	0.03	20	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
23	5 137	1 801.678	0.07	22	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
24	2 940	1 136.178	-0.32	25	3 051	1 028.460	-0.40	19	3	
25	5 408	1 772.746	0.06	22	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
26	4 772	1 694.488	0.01	22	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
27	5 075	1 791.471	0.07	22	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
28	5 097	1 641.563	-0.02	20	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
29	5 542	1 746.637	0.04	20	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
30	5 519	1 867.237	0.11	27	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
31	5 292	1 813.471	0.08	22	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
32	5 169	1 912.642	0.14	26	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
33	5 006	1 706.724	0.02	20	5 086	1 714.100	-0.20	19	5	
34	4 101	1 379.834	-0.18	20	4 069	1 371.280	-0.20	19	4	
35	5 058	1 630.673	-0.03	18	4 577	1 542.690	-0.10	13	5	
36	5 121	1 738.834	0.04	20	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
37	4 875	1 798.464	0.07	22	5 086	1 714.100	0.00	19	5	
38	5 173	1 846.342	0.10	24	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
39	5 465	1 897.639	0.13	26	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
40	5 350	1 739.940	0.04	22	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
41	4 657	1 686.635	0.00	27	4 475	1 508.410	0.10	25	4	
42	5 612	1 916.300	0.14	27	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
43	5 451	1 783.619	0.06	27	5 594	1 885.510	0.10	25	5	
44	5 693	1 898.611	0.13	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
45	5 463	1 777.131	0.06	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
46	5 448	1 799.615	0.07	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
47	5 531	1 812.453	0.08	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
48	5 353	1 863.507	0.11	23	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
49	4 267	1 545.498	-0.08	23	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
50	4 494	1 665.514	-0.01	23	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
51	5 762	1 937.732	0.15	27	6 103	2 056.920	0.20	31	5	
52	4 658	1 593.543	-0.05	27	4 882	1 645.540	0.20	31	4	
53	2 566	1 127.453	-0.33	12	3 255	1 097.020	-0.40	7	4	
2020	260 716	88 962.754	342.164	1 119	266 087	89 681.720	0.00	1 103		
2019	216 854	73 058.446	280.994							
			21.77%		-> Average load per day					
					-> Annual growth rate (%)					

	Média sem (Exp)	Média Peso sem (t)	Média Peso /Stop (kg)	
2020	4 919	1 678.543	341.225	
2019	4 170	1 404.970	336.902	-> Average payload per stop (Kg)

ANEXO A – VALORES DE 2021 RETIRADOS DA BASE DE DADOS DA EMPRESA (CASO REAL)

SQLQuery - VenSim.sql - 192.168.11.16\MSoft.SEV (SVLIS)\sigestao (558)* - Microsoft SQL Server Management Studio (Administrator)

File Edit View Query Project Tools Window Help

Object Explorer

Connect - 192.168.11.16\MSoft (SQL Server 12.0.6433.1 - SVLIS)\sigestao

- Databases
- Security
- Server Objects
- Replication
- Always On High Availability
- Management
- Integration Services Catalogs
- SQL Server Agent
- XEvent Profiler

```

31
32 set datefirst 1;
33 SELECT
34 SUM(Unidades) As Unidades,
35 COUNT([Data Registro]) As Expedições,
36 SUM([Peso Bruto]) As Peso,
37 datepart(week,[Data Registro]) As Semana
38 FROM #TempVensim
39
40 Where DestinoCOD in (40,44)
41 AND Estado <> 'Anulada'
42
43 GROUP BY datepart(week,[Data Registro])
44 ORDER BY Semana
45
46 DROP TABLE #TempVensim

```

129 %

Results Messages

	Unidades	Expedições	Peso	Semana
1	58.00	35	2635,00	1
2	12675.00	4216	1770361,016	2
3	17435.00	5426	2162442,965	3
4	18723.00	5104	2143517,462	4
5	15198.00	4850	1814834,745	5
6	15417.00	5216	1744616,583	6
7	15510.00	5277	1797338,174	7
8	12515.00	4389	1412080,493	8
9	14040.00	5415	1822870,515	9
10	15092.00	5412	1791254,222	10
11	16274.00	5807	1813654,433	11
12	15995.00	5668	1994065,158	12
13	17034.00	6028	2100842,084	13
14	13494.00	4809	1597679,089	14
15	16708.00	5853	2056087,752	15
16	16827.00	5964	1959581,792	16
17	18456.00	5965	2072205,746	17
18	15213.00	5794	1988055,70	18
19	18026.00	6193	2145650,648	19
20	17290.00	5969	1949933,257	20
21	19507.00	6476	2216433,763	21
22	17684.00	6269	2148984,347	22
23	14740.00	5373	1922544,312	23
24	14383.00	5405	1975036,9718	24
25	19474.00	6689	2200901,953	25
26	16478.00	6076	2180272,413	26
27	18671.00	6469	2227383,912	27
28	18348.00	6530	2173174,115	28

Query executed successfully.