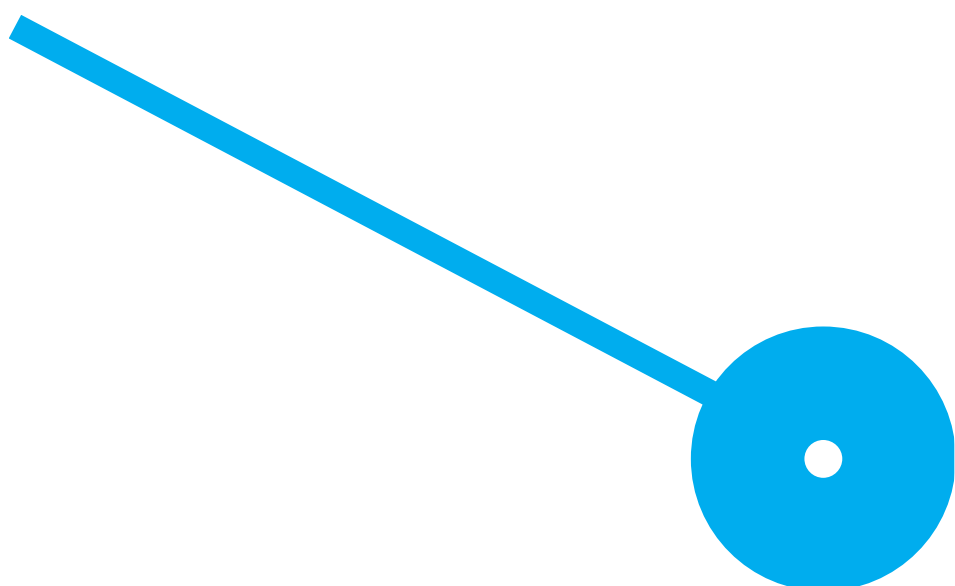
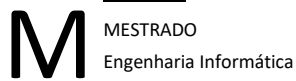


# Sistema de Organização do Conhecimento para Suporte à Circularidade

André Miguel Pereira Ventura

10/2025





# Sistema de Organização do Conhecimento para Suporte à Circularidade

André Miguel Pereira Ventura

8170430

## Orientadores

Professor Doutor Cristóvão Dinis Polido de Sousa

Professora Doutora Carla Sofia Gonçalves Pereira

Dissertação de Relatório de Projeto apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Informática pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico do Porto.

# Declaração de integridade

Eu, **André Miguel Pereira Ventura**, estudante nº **8170430**, do Mestrado **Mestrado de Engenharia Informática** da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico do Porto, declaro que não fiz plágio nem auto-plágio, pelo que o trabalho intitulado “**Sistema de Organização do Conhecimento para Suporte à Circularidade**” é original e da minha autoria, não tendo sido usado previamente para qualquer outro fim. Mais declaro que todas as fontes usadas estão citadas, no texto e na bibliografia final, segundo as regras de referenciação adotadas na instituição.

# Agradecimentos

A concretização desta dissertação representou um percurso de grande aprendizagem e superação, que apenas foi possível graças ao apoio e incentivo de várias pessoas e instituições, às quais expresso o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar o meu profundo reconhecimento aos meus orientadores, Professor Doutor Cristóvão Sousa e Professora Doutora Carla Pereira, pela orientação científica, disponibilidade, rigor e humor que sempre demonstraram. O seu acompanhamento constante e os conselhos valiosos foram determinantes para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. A ambos agradeço pela confiança depositada e pela paciência, e pela oportunidade de crescer tanto a nível profissional como pessoal.

Dirijo também um especial agradecimento à Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) que me acompanhou ao longo do meu percurso académico e que proporcionou as condições ideais para o desenvolvimento do projeto.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha família e amigos, pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento constante. A vossa presença e compreensão foram essenciais para ultrapassar os desafios deste percurso e alcançar este importante objetivo.

A todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo o meu mais sincero obrigado.

Este trabalho foi financiado pela União Europeia, no âmbito do programa *Next Generation Europe Union (EU)*, através de um apoio do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no contexto do projeto *PRODUTECH R3* – “Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização”. Investimento total do projeto: 166.988.013,71 euros; Apoio total: 97.111.730,27 euros.

# Resumo

A transição para a *Economia Circular* (EC) requer uma integração mais eficiente, transparente e interoperável dos dados industriais ao longo de toda a cadeia de valor. A crescente exigência de rastreabilidade e de transparência sobre a origem das matérias-primas, os métodos de fabrico e o impacto ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de infraestruturas digitais capazes de representar, gerir e partilhar informação de forma segura, normalizada e sustentável.

Neste contexto, a presente dissertação propõe e valida uma arquitetura digital baseada no *Asset Administration Shell* (AAS), concebida para estruturar, integrar e operacionalizar informação relevante para a circularidade industrial. O trabalho foi desenvolvido segundo a metodologia *Design Science Research* (DSR) e contempla dois artefactos tecnológicos complementares. O primeiro é um modelo semântico em *LinkML*, que permite representar de forma uniforme ativos, produtos e processos industriais, assegurando coerência estrutural, interoperabilidade e extensibilidade futura. O segundo é um *pipeline* de integração e partilha de dados, implementado sobre o *Eclipse BaSyx* e o Eclipse Dataspace Connector (*EDC*) *Extension for AAS*, que possibilita a atualização dinâmica dos submodelos do AAS em tempo real e a partilha soberana de dados através de *DataSpaces*.

A arquitetura foi validada em ambiente experimental, demonstrando a capacidade de integrar fluxos de dados heterogêneos, alimentar submodelos como *CircularityFeatures*, *ProductData* e *LifeCycleInventory*, e calcular métricas de circularidade como o *Material Circularity Indicator* (MCI). O AAS revelou-se um elemento estruturante para a criação de um *Digital Product Passport* (DPP), permitindo rastrear e consolidar informação sobre o ciclo de vida e a circularidade dos produtos.

Os resultados confirmam o potencial da abordagem proposta para promover a interoperabilidade, a soberania e a inteligência dos dados industriais, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas cognitivos alinhados com os princípios da Indústria 5.0 (I5.0). O conceito de *Cognitive Digital Twin* (CoDT) emerge como uma evolução natural do AAS, permitindo o enriquecimento e a interpretação inteligente dos dados para suportar decisões mais sustentáveis, humanas e circulares.

São ainda discutidas as limitações associadas à maturidade dos componentes utilizados (*BaSyx DataBridge* e *EDC*) e apontadas direções futuras, como a automatização de políticas de partilha e o fortalecimento da camada cognitiva do AAS.

**Palavras-chave:** Circularidade, Passaporte Digital to Produto, Asset Administration Shell, Cognitive Digital Twin, Industria 5.0.

# Abstract

The transition towards a *Circular Economy* (CE) requires a more efficient, transparent, and interoperable integration of industrial data across the entire value chain. The growing demand for traceability and transparency regarding the origin of raw materials, manufacturing processes, and environmental impacts has driven the development of digital infrastructures capable of securely representing, managing, and sharing data in a standardized and sustainable way.

In this context, this dissertation proposes and validates a digital architecture based on the AAS, designed to structure, integrate, and operationalize information relevant to industrial circularity. The research follows the DSR methodology and includes two complementary technological artefacts. The first is a semantic model developed in LinkML, which enables the uniform representation of assets, products, and industrial processes, ensuring structural consistency, interoperability, and future extensibility. The second is a data integration and sharing pipeline, implemented using *Eclipse BaSyx* and the EDC Extension for AAS, which allows the real-time updating of AAS submodels and the sovereign sharing of data through DataSpaces.

The proposed architecture was validated in an experimental environment, demonstrating its ability to integrate heterogeneous data flows, populate submodels such as Circularity-Features, ProductData, and LifeCycleInventory, and compute circularity metrics such as the MCI. The AAS proved to be a foundational component for the creation of a DPP, enabling the traceability and consolidation of product lifecycle and circularity information.

The results confirm the potential of the proposed approach to enhance interoperability, sovereignty, and intelligence in industrial data management, contributing to the development of cognitive and sustainable systems aligned with the principles of I5.0. The CoDT emerges as a natural evolution of the AAS, enabling intelligent data enrichment and interpretation to support more sustainable, human-centered, and circular decision-making.

The dissertation also discusses the current limitations of the implemented components (BaSyx DataBridge and EDC), and outlines future research directions, including the automation of data-sharing policies and the strengthening of the AAS's cognitive layer.

**Keywords:** Circularity, Digital Product Passport, Asset Administration Shell, Cognitive Digital Twins, Industry 5.0.

# Conteúdo

Agradecimentos . . . . .	ii
Resumo . . . . .	iii
Abstract . . . . .	iv
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Listagens</b>	<b>ix</b>
Siglas e Abreviaturas . . . . .	xii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Resultados . . . . .	4
1.3 Estrutura do Documento . . . . .	5
<b>2 Gestão de Informação no Contexto da Economia Circular</b>	<b>6</b>
2.1 <i>Framework</i> Conceptual da Economia Circular . . . . .	6
2.1.1 <i>Economia Circular</i> (EC) . . . . .	6
2.1.2 Indústria 5.0 (I5.0) . . . . .	7
2.1.3 Ciclo de Vida do Produto . . . . .	7
2.1.4 Cadeia de Valor . . . . .	8
2.1.5 Rastreabilidade . . . . .	9
2.1.6 Interoperabilidade . . . . .	9
2.1.7 Governança de dados . . . . .	9
2.1.8 <i>Internet of Things</i> (IoT) . . . . .	10
2.1.9 Desafios e Barreiras . . . . .	10
2.1.10 Oportunidades . . . . .	12
2.2 Modelos para a Gestão de Informação na Economia Circular . . . . .	14
2.2.1 <i>Framework</i> dos R's . . . . .	14
2.2.2 Digital Twin (DT) e Cognitive Digital Twin (CoDT) . . . . .	16
2.2.3 <i>Product Environmental Footprint Category Rules</i> (PEFCR) . . . . .	17
2.2.4 <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) e <i>Life Cycle Inventory</i> (LCI) . . . . .	19
2.2.5 <i>Asset Administration Shell</i> (AAS) . . . . .	20
2.2.6 <i>Digital Product Passport</i> (DPP) . . . . .	23
2.2.7 Normas <i>International Organization for Standardization</i> (ISO) que suportam a transição para a Economia Circular . . . . .	24
2.2.8 <i>Product Circularity Data Sheet</i> (PCDS) . . . . .	26

2.3	Artefactos digitais de apoio à implementação do AAS no contexto da Circularidade . . . . .	29
2.4	Ecosistema para partilha de dados . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Modelos de Gestão de Informação Circular</b>	<b>33</b>
3.1	Abordagem . . . . .	33
3.2	Proposta de modelo para partilha de informação . . . . .	34
3.2.1	<i>Asset Administration Shell Header</i> . . . . .	36
3.2.2	Submodelo <i>Product Circularity Data Sheet</i> (PCDS) . . . . .	37
3.2.3	Submodelo <i>Circularity Features</i> . . . . .	38
3.2.4	Submodelo <i>Supply Chain Data</i> . . . . .	41
3.2.5	Submodelo <i>Traceability</i> . . . . .	42
3.2.6	Submodelo <i>Product Data</i> . . . . .	43
3.2.7	Submodelo <i>Production Data</i> . . . . .	44
3.2.8	Submodelo <i>Life Cycle Inventory</i> (LCI) . . . . .	45
3.2.9	Outros submodelos . . . . .	48
3.3	Modelação semântica dos dados . . . . .	49
3.4	Arquitetura sociotécnica proposta . . . . .	49
3.4.1	Arquitetura de alto nível . . . . .	50
3.4.2	Descrição das Camadas da Arquitetura . . . . .	51
3.4.3	Componentes Principais . . . . .	51
3.4.4	Fluxo de Informação . . . . .	52
3.4.5	Vantagens da Arquitetura . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Metodologia <i>Design Science Research</i></b>	<b>53</b>
4.1	Enquadramento do Trabalho no Âmbito do Projeto <i>Produtech R3</i> . . . . .	53
4.2	Fundamentação de Metodologia DSR . . . . .	54
4.3	<i>Guidelines</i> da DSR . . . . .	54
4.4	Ciclo de Relevância . . . . .	56
4.5	Ciclo de Rigor . . . . .	56
4.6	Ciclo do Design . . . . .	56
4.7	Ciclo de Avaliação . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Validação em Cenários Práticos</b>	<b>58</b>
5.1	Tecnologias e Ferramentas utilizadas . . . . .	59
5.2	Artefacto 1 - Modelo Semântico para Descrição de Ativos Industriais . . . . .	60
5.2.1	Problema e Motivação . . . . .	60
5.2.2	Objetivos de Design . . . . .	61
5.2.3	Desenvolvimento . . . . .	61
5.2.4	Demonstração . . . . .	65
5.2.5	Avaliação . . . . .	67
5.2.6	Discussão . . . . .	68
5.3	Artefacto 2 — Pipeline de Integração e Processamento de Dados . . . . .	68
5.3.1	Problema e Motivação . . . . .	69
5.3.2	Objetivos de Design . . . . .	69
5.3.3	Desenvolvimento . . . . .	69
5.3.4	Demonstração . . . . .	71
5.3.5	Avaliação . . . . .	71
5.3.6	Discussão . . . . .	72

<b>6</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusão . . . . .	73
6.2	Possibilidades de Trabalho Futuro . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>75</b>

# Lista de Figuras

2.1	Interferência da Economia Circular com o ciclo de vida do produto. . . . .	8
2.2	Fluxo de dados ao longo da cadeia de valor. . . . .	12
2.3	Fluxo do ciclo de vida dos materiais nos modelos económicos . . . . .	14
2.4	Tabela das Estratégias de circularidade na cadeia de produção. . . . .	15
2.5	Estrutura dos metamodelos do AAS. . . . .	22
2.6	Fluxo de informação na Economia Linear. . . . .	27
2.7	Agentes que criam o PCDS. . . . .	28
2.8	Agentes que usam o PCDS. . . . .	28
2.9	Interação entre Provider, Consumer e Federator nos <i>Data Spaces</i> . . . . .	31
3.1	Mapa conceptual do DPP estruturado em AAS e os seus submodelos . . . . .	36
3.2	Estrutura do AAS para o DPP . . . . .	37
3.3	Mapa conceptual do submodelo do PCDS e das suas secções. . . . .	38
3.4	Estrutura do submodelo PCDS. . . . .	39
3.5	Mapa conceptual do submodel <i>Circularity Features</i> . . . . .	40
3.6	Estrutura do submodelo <i>Circularity Features</i> . . . . .	41
3.7	Mapa conceptual do submodel <i>Supply Chain Data</i> . . . . .	41
3.8	Estrutura do submodelo <i>Supply Chain Data</i> . . . . .	42
3.9	Mapa conceptual do submodel <i>Traceability</i> . . . . .	43
3.10	Estrutura do submodelo <i>Traceability</i> . . . . .	43
3.11	Mapa conceptual do Submodelo <i>Product Data</i> . . . . .	43
3.12	Estrutura do submodelo <i>Product Data</i> . . . . .	44
3.13	Mapa conceptual do submodelo <i>Production Data</i> . . . . .	44
3.14	Estrutura do submodelo <i>Production Data</i> . . . . .	45
3.15	Mapa conceptual do submodelo <i>Life Cycle Inventory</i> . . . . .	46
3.16	Estrutura do submodelo <i>Life Cycle Inventory</i> . . . . .	47
3.17	Arquitetura de alto nível . . . . .	50
3.18	Fluxo de transformação e normalização dos dados até à representação AAS	51
4.1	Representação das Guidelines da DSR. . . . .	55
5.1	Excerto da modelação do Produto usando LinkML . . . . .	65
5.2	Instância de AAS no repositório BaSyx . . . . .	66
5.3	Excerto de propriedades de submodelos no BaSyx . . . . .	66

# Lista de Tabelas

2.1	Normas ISO e os seus objetivos principais . . . . .	26
2.2	Funções das diferentes entidades . . . . .	32
3.1	Questões de Competência no âmbito da circularidade . . . . .	35
4.1	Diretrizes da Design Science Research e respetivas descrições. . . . .	55
5.1	Resumo de todas as ferramentas e tecnologias usadas . . . . .	60
5.2	Atributos para produtos . . . . .	67
5.3	Resumo dos atributos relacionados ao fabricante . . . . .	67
5.4	Resumo dos atributos relacionados ao local de produção . . . . .	68
5.5	Resumo dos atributos relacionados a URLs do produto . . . . .	68

# Lista de Listagens

5.1	Estrutura semântica da Classe <code>AssetAdministrationShell</code> . . . . .	61
5.2	Estrutura semântica de <code>SubmodelReference</code> . . . . .	62
5.3	Estrutura semântica de <code>Key</code> . . . . .	62
5.4	Estrutura semântica de <code>Submodel</code> . . . . .	62
5.5	Estrutura semântica de <code>SubmodelElement</code> . . . . .	63
5.6	Estrutura semântica de <code>Property</code> . . . . .	63
5.7	Estrutura semântica de <code>SubmodelElementCollection</code> . . . . .	63
5.8	Estrutura semântica de <code>ReferenceElement</code> . . . . .	63

# Siglas e Abreviaturas

<b>CE</b>	<i>Circular Economy</i>
<b>EC</b>	<i>Economia Circular</i>
<b>EL</b>	<i>Economia Linear</i>
<b>DPP</b>	<i>Digital Product Passport</i>
<b>AAS</b>	<i>Asset Administration Shell</i>
<b>IDTA</b>	<i>Industrial Digital Twin Association</i>
<b>DT</b>	<i>Digital Twin</i>
<b>CoDT</b>	<i>Cognitive Digital Twin</i>
<b>PCDS</b>	<i>Product Circularity Data Sheet</i>
<b>MCI</b>	<i>Material Circularity Indicator</i>
<b>RDF</b>	<i>Resource Description Framework</i>
<b>OWL</b>	<i>Web Ontology Language</i>
<b>UI</b>	<i>User Interface</i>
<b>UE</b>	<i>União Europeia</i>
<b>EU</b>	<i>Europe Union</i>
<b>PRR</b>	Plano de Recuperação e Resiliência
<b>HTTP</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>APIs</b>	<i>Application Programming Interfaces</i>
<b>JSON</b>	<i>JavaScript Object Notation</i>
<b>PMEs</b>	Pequenas e Médias Empresas
<b>I4.0</b>	Indústria 4.0
<b>I5.0</b>	Indústria 5.0
<b>ESTG</b>	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
<b>EDC</b>	<i>Eclipse Dataspace Connector</i>

<b>OPC UA</b>	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
<b>MQTT</b>	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
<b>RAMI4.0</b>	<i>Modelo Arquitetónico de Referência para Indústria 4.0</i>
<b>REST</b>	<i>Representational State Transfer</i>
<b>IDS</b>	<i>Intrusion Detection System</i>
<b>MRP</b>	<i>Material Requirements Planning</i>
<b>ILCD</b>	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
<b>BOM</b>	<i>Bill of Materials</i>
<b>LCA</b>	<i>Life Cycle Assessment</i>
<b>WP</b>	<i>Work Package</i>
<b>SM</b>	<i>Submodel</i>
<b>SMC</b>	<i>Submodel Element Collection</i>
<b>SME</b>	<i>Submodel Element</i>
<b>Ref</b>	<i>Reference Element</i>
<b>Prop</b>	<i>Property</i>
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>UE</b>	<i>União Europeia</i>
<b>ERP</b>	<i>Enterprise Resource Planning</i>
<b>MES</b>	<i>Manufacturing Execution System</i>
<b>DSR</b>	<i>Design Science Research</i>
<b>PEF</b>	<i>Product Environmental Footprint</i>
<b>PEFCR</b>	<i>Product Environmental Footprint Category Rules</i>
<b>LCI</b>	<i>Life Cycle Inventory</i>
<b>LCIA</b>	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>
<b>MEL</b>	<i>Ministério de Economia do Luxemburgo</i>
<b>CDI</b>	<i>Circularity Dataset Initiative</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>TBL</b>	<i>Triple Bottom Line</i>
<b>CPPL</b>	<i>Cleaner Production Promotion Law</i>
<b>ML</b>	<i>Machine Learning</i>
<b>YAML</b>	<i>YAML Ain't Markup Language</i>
<b>KPIs</b>	<i>Key Performance Indicator</i>

# Capítulo 1

## Introdução

A transição da Indústria 4.0 (I4.0) para I5.0 representa uma mudança de paradigma que coloca a circularidade no centro das preocupações industriais, aliando inovação tecnológica a objetivos de sustentabilidade. Formalmente introduzida pela União Europeia (UE) em 2021, a I5.0 visa promover uma indústria sustentável e centrada no ser humano [1]. Enquanto a I4.0 se concentrou na automação e na hiperconectividade, a I5.0 destaca a colaboração entre humanos e máquinas inteligentes, equilibrando a eficiência operacional com a responsabilidade ambiental [2]. Este novo enquadramento combina tecnologias avançadas com as competências humanas, reforçando a sustentabilidade, a resiliência e o bem-estar nos processos de produção [3]. Contudo, a adoção deste paradigma introduz desafios significativos, sobretudo para as Pequenas e Médias Empresas (PMEs), que enfrentam dificuldades acrescidas na gestão e utilização eficaz de dados que suportem a circularidade [4].

Segundo *Ivanov* [5], a I5.0 pode ser conceptualizada através de um quadro de viabilidade, que identifica princípios tecnológicos fundamentais como a colaboração, a coordenação, a comunicação, a automação, a análise de dados e a identificação dos ativos digitais, necessários para rastrear e integrar informação entre sistemas. Este enquadramento atua a nível da sociedade, das redes e das plantas industriais, estabelecendo um novo *Triple Bottom Line* (TBL) assente na criação de valor resiliente, isto é, valor capaz de se manter e adaptar perante perturbações, no bem-estar humano e numa sociedade sustentável [5]. O TBL foi proposto por *John Elkington* em 1994 e defende que o desempenho de uma organização não deve ser medido apenas pelo lucro, mas também pelo impacto social e ambiental [6]. Assim, a I5.0 procura alcançar objetivos sociais que vão além da criação de emprego e do crescimento económico, promovendo uma produção que respeite os limites planetários e que coloque o bem-estar dos trabalhadores no centro dos processos produtivos [1].

O conceito de EC tem vindo a ganhar destaque internacional, sendo amplamente promovido por iniciativas de organizações como a *Ellen MacArthur Foundation* [7], que desempenha um papel central na disseminação de práticas e modelos circulares junto de empresas e governos. Atualmente, existe uma necessidade mundial de as empresas implementarem modelos de negócios mais circulares. Existem fatores socioeconómicos que estão a incentivar a adoção de modelos de negócios mais circulares, que estão relacionados com obrigações legais específicas. Aspectos como a sustentabilidade, a responsabilidade social, a pressão dos consumidores, a poupança de recursos, a inovação, a competitividade

e a atratividade para os investidores representam alguns dos ingredientes socioeconômicos dos novos modelos de negócios circulares [8].

A EC tem ganho ao longo dos tempos bastante destaque por diversas partes do mundo, como um modelo alternativo ao tradicional sistema econômico linear de "extrair, produzir, descartar". Os pioneiros no desenvolvimento do conceito de EC foram a China, inserindo este conceito na sua política pública chinesa, com a *Cleaner Production Promotion Law* (CPPL) [9] em 2002, criando e implementando posteriormente a Lei de Promoção da EC, criada pelo governo em 2009 [10, 11], com o objetivo de integrar a EC nas suas indústrias e economia. Esta estratégia foi aplicada em múltiplos níveis: ao nível micro, em empresas e produtos; ao nível meso, em colaboração com outras empresas; e o nível macro, em políticas e programas nacionais de desenvolvimento sustentável [12].

Mais tarde, em 2015, o conceito foi oficialmente adotado pela UE, com publicação do primeiro plano de ação europeu para a EC, que marcou o início de uma estratégia comunitária orientada para a eficiência de recursos e a sustentabilidade [13]. Desde então, a Europa e a China têm vindo a integrar princípios circulares nos seus modelos económicos, enquanto as economias em desenvolvimento continuam a enfrentar dificuldades na implementação destas práticas e na obtenção dos seus benefícios [14, 15].

A implementação chinesa da EC influenciou as direções das políticas da UE [16], o que levou à criação do primeiro memorando internacional de cooperação em economia circular entre a China e a UE [17]. A cooperação internacional é crucial para alcançar uma transição global, uma vez que a circularidade exige alinhamento de políticas e práticas entre diferentes economias. Desde então, a UE tem-se mostrado fortemente empenhada em alcançar objetivos ambiciosos, tais como reduzir a produção de resíduos, aumentar a eficiência no uso de recursos, prolongar o ciclo de vida dos produtos e promover modelos de negócio circulares. Estes objetivos foram consagrados no Plano de Ação para a EC adotado em 2015 [18] e reforçados com o novo plano de ação incorporado no Pacto Ecológico Europeu de 2021 [19, 20]. Apesar destes esforços, desvincular o crescimento económico europeu da geração de resíduos e da degradação ambiental continua a ser um desafio global, e a UE não é exceção, sendo atualmente o segundo maior gerador de resíduos urbanos do mundo [21].

*Kirchherr* e *Van Santen* [22] realizaram uma análise crítica da literatura existente sobre a EC, identificando duas limitações principais no estado atual do conhecimento. Em primeiro, a maioria dos estudos publicados concentra-se na indústria transformadora, deixando de fora outros setores económicos relevantes. Em segundo lugar, observa-se uma escassez de investigações empíricas baseadas em dados reais, o que dificulta a compreensão dos fatores que impulsionam ou dificultam a transição para a EC e limita a formulação de políticas eficazes [23]. Com esta perspetiva, o presente trabalho procura contribuir para a superação dessas limitações, ao propor uma abordagem prática e baseada em dados que visa compreender, de forma empírica, os fenómenos associados à circularidade industrial.

Uma das principais iniciativas da UE para a transição para a EC é o DPP, que promove a digitalização da informação dos produtos e possibilita uma transferência de conhecimento fiável e transparente ao longo da cadeia de valor. O DPP é apontado como um elemento-chave na passagem de uma *Economia Linear* (EL) para uma EC, ao fornecer informação estruturada e interoperável em diferentes níveis. A nível do consumidor, permite decisões de compra mais conscientes e a nível administrativo, facilita a monitorização de práticas empresariais, prevenindo o *greenwashing*, que consiste numa prática de *marketing* en-

ganosa onde as empresas apresentam-se como mais sustentáveis do que realmente são, promovendo uma falsa imagem de responsabilidade ambiental [24].

No entanto, a realidade atual demonstra que os dados necessários para promover a circularidade permanecem fragmentados em silos de dados e descritos de formas heterogêneas. Coexistem diferentes estruturas de dados, protocolos de acesso e sistemas organizacionais, desde a camada operacional (máquinas, sensores, protocolos OT como *OPC UA* ou *MQTT*) até sistemas corporativos (*Enterprise Resource Planning* (ERP), *Manufacturing Execution System* (MES), *Application Programming Interfaces* (APIs), *Representational State Transfer* (REST)) [25, 26]. Esta diversidade gera complexidade e custos elevados na integração, atrasando a implementação de soluções orientadas à circularidade.

A inteligência baseada em dados está a tornar-se um pilar da economia contemporânea. Como referem *Charnley et al.* [27], os dados provenientes de redes sociais, dispositivos móveis, máquinas e produtos, estão a ser explorados através das análises avançadas para gerar novas formas de valor. No contexto das cadeias de valor, a integração e partilha de dados releva-se essencial para reforçar a capacidade de absorção de conhecimento, aumentar a flexibilidade e fomentar a inovação organizacional [28].

Adicionalmente, muitas abordagens recorrem a soluções centralizadas de *Big Data*, como *Data Lakes*, que se revelam limitadas neste contexto. A centralização implica acumular grandes volumes de dados heterogêneos e processá-los em *pipelines* complexos, um modelo pouco adequado quando se exige tomada de decisão distribuída e em tempo real, característica essencial da I5.0 [29, 30].

O problema pode ser sintetizado em três dimensões principais: (i) fragmentação da informação; (ii) heterogeneidade estrutural, tecnológica e informacional; e (iii) limitações das abordagens centralizadas. Estes constrangimentos dificultam a criação de instrumentos digitais de suporte à circularidade, como o DPP ou a LCA, que dependem de dados consistentes, acessíveis e interoperáveis [14, 22].

Assim, torna-se evidente a necessidade de desenvolver novas abordagens para a gestão de informação, capazes de ultrapassar barreiras e criar as bases para uma transição bem-sucedida para a I5.0.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é analisar e desenvolver estratégias que melhorem a gestão de informação no contexto da circularidade do produto, com especial foco nas *frameworks* e modelos que suportam a avaliação do ciclo de vida dos produtos e dos sistemas de produção, contribuindo para uma transição eficaz de uma EL para uma EC [31].

Para alcançar este propósito, propõe-se uma abordagem orientada a dados, suportada em três eixos fundamentais: modelação semântica, interoperabilidade e processamento distribuído. Assim, foram definidos os seguintes objetivos:

1. Analisar a literatura científica sobre a gestão de informação em processos de suporte à circularidade, com foco nas *frameworks* de avaliação de circularidade aplicadas a produtos e sistemas de produção;

2. Identificar os principais *standards* e esquemas de dados relacionados com a avaliação do ciclo de vida e o impacto dos produtos e sistemas de produção na circularidade;
3. Caracterizar as necessidades e fontes de informação relevantes para enriquecer os fluxos de dados associados ao ciclo de vida dos produtos;
4. Desenvolver um modelo semântico de informação para representar um *Digital Twin* (DT) circular, incorporando princípios e requisitos do DPP, que permita reutilizar vocabulários existentes e descrever as várias etapas do ciclo de vida do produto, desde a extração de matérias-primas até ao fim de vida;
5. Implementar uma modelação semântica baseada no AAS, reconhecido como um núcleo semântico extensível para a interoperabilidade entre as diferentes camadas da cadeia de valor;
6. Aplicar conceitos de *Edge Computing* e processamento distribuído, de modo a permitir análises próximas da origem dos dados e superar as limitações das abordagens centralizadas [32, 33];
7. Calcular e analisar métricas e indicadores relevantes derivados dos dados recolhidos, que apoiem a avaliação da circularidade e a tomada de decisão informada em contexto do industrial, do produto e da cadeia de valor;
8. Submeter e disponibilizar o modelo de informação desenvolvido para que possa ser parcial ou totalmente partilhado entre os diferentes agentes da cadeia de valor, promovendo a interoperabilidade e a uniformização na troca de dados industriais;
9. Implementar e validar o modelo proposto com recurso a artefactos desenvolvidos no contexto do projeto.

Esta abordagem visa estruturar e operacionalizar informação relevante para a circularidade, assegurando coerência estrutural, interoperabilidade e extensibilidade futura.

## 1.2 Resultados

O trabalho desenvolvido nesta dissertação contribui para o avanço de instrumentos digitais para a circularidade do produto, centrando-se na criação de soluções que promovam a interoperabilidade, a rastreabilidade e a utilização eficiente dos dados ao longo do seu ciclo de vida.

Os principais resultados esperados podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

1. Modelo semântico de informação: desenvolvido em *LinkML*, que permite representar de forma uniformizada ativos (como produtos, processos, máquinas e pessoas), assegurando coerência estrutural e compatibilidade semântica entre diferentes sistemas e plataformas;
2. Pipeline de integração e partilha de dados: implementado com recursos às tecnologias, como *Eclipse BaSyx EDC Extension for AAS*, que possibilita a troca segura e interoperável de informação entre sistemas distribuídos, assegurando a governança, soberania e a rastreabilidade dos dados circulares;
3. Mecanismo de cálculo e análise de métricas de circularidade: a estrutura de dados desenvolvida permite popular indicadores relevantes, tais como eficiência no uso de

materiais, conteúdo reciclado, potencial de reutilização, entre outros. Contribuindo, assim, para a monitorização contínua e para a tomada de decisão informada no contexto da EC;

4. Submissão e disponibilização do modelo de informação: o modelo proposto é concebido para ser parcial ou totalmente partilhado entre os diferentes agentes da cadeia de valor, promovendo a interoperabilidade e a uniformização na troca de dados industriais;
5. Validação prática através de artefactos: o modelo e o *pipeline* foram implementados e testados em cenários reais, permitindo avaliar a sua aplicabilidade, desempenho e contributo para a transição digital e sustentável da indústria.

De forma integrada, estes resultados demonstram a viabilidade de uma infraestrutura digital capaz de estruturar, analisar e partilhar informação de forma segura, compreensível e padronizada entre sistemas e organizações. Tal abordagem reforça o papel dos dados como elemento central para a implementação da EC e para a concretização dos princípios da I5.0.

### 1.3 Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se estruturado em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

1. **Capítulo 1** - Introdução: apresenta o enquadramento geral do tema, os objetivos da investigação, os principais resultados esperados e a estrutura global do trabalho;
2. **Capítulo 2** - Gestão de Informação no Contexto da Economia Circular: aborda o enquadramento teórico da EC e da I5.0, analisando os principais desafios, oportunidades e modelos de suporte à gestão de informação. São explorados conceitos como o DT, CoDT o AAS, o DPP, o PEFRCR, as normas ISO e o PCDS, bem como iniciativas e ecossistemas que promovem a partilha de dados e a circularidade;
3. **Capítulo 3** - Modelos para Gestão de Informação Circular: apresenta a proposta do modelo conceptual e semântico desenvolvido para assegurar o fluxo de informação ao longo do ciclo de vida do produto. Descrevem-se os submodelos, desenvolvidos que dão apoio aos princípios da circularidade que compõem o AAS, a estrutura de dados adotada, a arquitetura global que suporta a interoperabilidade e a partilha de informação.
4. **Capítulo 4** - Metodologia de Artefactos Circulares: descreve a metodologia de investigação adotada, baseada na abordagem DSR, e apresenta os dois artefactos principais: o modelo semântico e o *pipeline* de integração e processamento de dados.
5. **Capítulo 5** - Validação dos Artefactos: detalha a aplicação prática, implementação e validação dos dois artefactos propostos. Apresenta os resultados obtidos, a discussão crítica e a demonstração da sua aplicabilidade em cenários reais;
6. **Capítulo 6** - Conclusão e Trabalho Futuro: sintetiza as principais conclusões do trabalho desenvolvido, destacando os contributos científicos e tecnológicos alcançados, as limitações identificadas e as oportunidades para uma investigação futura.

# Capítulo 2

## Gestão de Informação no Contexto da Economia Circular

A transição para a EC depende, em larga medida, da capacidade de recolher, estruturar e partilhar dados ao longo de toda a cadeia de valor. A gestão de informação surge, assim, como um elemento central para operacionalizar os princípios da circularidade, permitindo monitorizar fluxos de materiais, energia e produtos [34], bem como avaliar impactos ambientais e sociais [35].

No contexto da I5.0, esta gestão de informação enfrenta novos desafios. Por um lado, a diversidade de fontes e formatos de dados, desde sistemas operacionais de máquinas até plataformas corporativas, exige soluções capazes de superar barreiras de interoperabilidade [36]. Por outro, a crescente complexidade dos requisitos normativos, como os associados ao DPP, ou às normas ISO, reforçam a necessidade de estruturar informação de forma uniformizada, transparente e reutilizável.

Este capítulo apresenta uma revisão crítica dos modelos e *frameworks* que têm sido propostos e aplicados no contexto da circularidade, destacando o seu papel na gestão da informação. Serão ainda exploradas iniciativas internacionais e ecossistemas tecnológicos dedicados à partilha de dados circulares, com o objetivo de identificar os contributos já existentes e as lacunas que a presente investigação procura colmatar.

### 2.1 *Framework* Conceptual da Economia Circular

Para compreender plenamente a aplicação e os impactos da EC, é essencial partir de uma base conceptual sólida. Nesse sentido, a primeira parte deste capítulo dedica-se a explorar os conceitos fundamentais que sustentam essa abordagem. Estes conceitos abrangem tanto aspetos diretamente vinculados à economia circular como elementos que lhe estão indiretamente relacionados, fornecendo a base teórica necessária para analisar os desafios, barreiras, oportunidades e requisitos associados à sua implementação.

#### 2.1.1 *Economia Circular* (EC)

Não existe uma definição concreta sobre o que é a EC, mas em 2015 a CE providenciou uma definição oficial ligando a definição à sua iniciativa *Green Deal*: “A economia circular

é um modelo de produção e consumo que inclui a partilha, o aluguer, a reutilização, a reparação, a renovação e a reciclagem de materiais e produtos existentes, tanto quanto possível. Como resultado, o ciclo de vida do produto é alargado. Na prática, isto significa reduzir os resíduos ao mínimo. Quando um produto chega ao fim da sua vida útil, os seus materiais são mantidos na economia, sempre que possível. Estes podem ser utilizados de forma produtiva vezes sem conta, criando assim mais valor” [37].

A EC surge assim, como resposta ao modelo linear tradicional de “extrair, produzir, utilizar e descartar”, procurando reduzir o crescimento económico do consumo intensivo de recursos naturais. O seu objetivo é manter o valor dos produtos, materiais e recursos na economia pelo maior tempo possível, promovendo simultaneamente a redução de resíduos e emissões. Este paradigma propõe uma mudança sistemática, que abrange desde o design dos produtos até aos modelos de negócio e à gestão dos fluxos de materiais.

Segundo a *Ellen MacArthur Foundation* [7], a EC assenta em três princípios fundamentais: eliminar resíduos e poluição desde a fase de conceção; manter produtos e materiais em uso através da reutilização, reparação e reciclagem; e regenerar os sistemas naturais. Estes princípios exigem uma transformação estrutural das cadeias de valor, apoiada na recolha e gestão de informação fiável sobre o ciclo de vida dos produtos.

### 2.1.2 Indústria 5.0 (I5.0)

A I5.0 reforça o papel das pessoas e da sustentabilidade, promovendo uma colaboração equilibrada entre humanos e máquinas inteligentes. Este novo paradigma dá continuidade à I4.0, mas amplia o seu foco: mais do que automação e eficiência, a I5.0 procura aliar inovação tecnológica à responsabilidade social e ambiental. Esta abordagem torna a gestão de informação ainda mais orientada a dados, ou seja, baseada em decisões sustentadas (abordagem *data-driven*), e numa comunicação compreensível tanto para sistemas técnicos como para utilizadores humanos, *human-machine readable* [38, 22].

A I5.0 traduz-se assim na necessidade de dados partilháveis, interoperáveis e semanticamente consistentes, que suportem decisões ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos e entre múltiplos intervenientes na cadeia de valor.

### 2.1.3 Ciclo de Vida do Produto

O ciclo de vida do produto refere-se ao conjunto de fases pelas quais um produto passa, desde a extração de matérias-primas até ao seu fim de vida e eventual reintegração na economia através de reparação, reutilização, remanufatura ou reciclagem [39]. Este conceito é essencial para compreender como os produtos podem ser concebidos e geridos de forma a minimizar impactos ambientais e maximizar a eficiência de recursos ao longo de todo o seu percurso.

Tradicionalmente, o ciclo de vida era encarado de forma linear, da extração à produção, utilização e descarte. No entanto, no contexto da EC, esta sequência é revista de modo a fechar os fluxos de materiais, promovendo o reaproveitamento e a regeneração de recursos. A circularidade, assim, interfere diretamente em várias fases do ciclo de vida, reintroduzindo produtos, componentes e materiais no sistema produtivo.

Como ilustrado na figura 2.1, o ciclo de vida do produto pode ser descrito em várias etapas interligadas:

1. Recolha de materiais: fase inicial em que se obtêm as matérias-primas necessárias à produção. Na economia circular, privilegia-se a utilização de materiais reciclados e a origem sustentável dos recursos naturais.
2. Produção do produto: envolve a transformação das matérias-primas em produtos acabados. A integração de princípios de design circular, como a modularidade e a reparabilidade, permite prolongar a vida útil e facilitar a desmontagem no fim de vida.
3. Utilização do produto: corresponde ao período de uso pelo consumidor ou pela empresa. Estratégias como a manutenção preventiva, o aluguer ou a partilha contribuem para estender esta fase e reduzir a necessidade de novos produtos.
4. Fim de vida do produto: momento em que o produto deixa de cumprir a sua função inicial. A economia circular propõe aqui diferentes rotas de valorização: reutilização, remanufatura, reciclagem ou, em último caso, descarte controlado. Cada uma destas estratégias evita a perda de valor dos materiais e reduz a pressão sobre os recursos naturais.

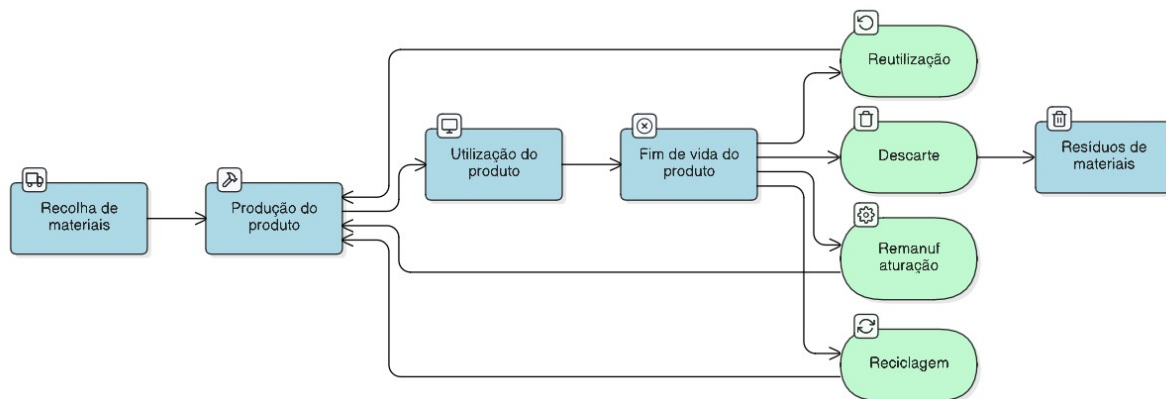


Figura 2.1: Interferência da Economia Circular com o ciclo de vida do produto.

A reutilização prolonga a vida útil do produto sem necessidade de transformação significativa. A remanufatura restaura produtos ou componentes usados a um estado de qualidade equivalente ao novo. A reciclagem converte resíduos em matérias-primas secundárias, reintegrando-as no processo produtivo. O descarte, embora inevitável em alguns casos, deve ser o último recurso, sendo essencial garantir que os resíduos de materiais resultantes são devidamente geridos ou reintegrados no sistema produtivo para evitar perdas de valor e impactos ambientais adicionais.

## 2.1.4 Cadeia de Valor

Uma cadeia de valor é uma rede complexa de organizações, processos e atividades envolvidos na transformação e circulação de materiais, produtos e informação, desde os fornecedores de matérias-primas até aos consumidores finais e centros de reciclagem [40].

A cadeia de valor é central para compreender como os produtos e materiais se movem entre diferentes atores, bem como para identificar onde se gera e onde se perde valor ao longo do processo.

No contexto da EC, as cadeias de valor assumem um papel estratégico, uma vez que a circularidade depende da cooperação e da partilha de informação entre os intervenientes. O objetivo é criar cadeias integradas e sustentáveis, onde os resíduos de um processo se tornam recursos para outro, promovendo ciclos de valor fechados e contínuos. Essa transformação requer transparência, rastreabilidade e interoperabilidade entre sistemas, de modo a garantir que os dados sobre materiais, componentes e fluxos logísticos possam ser compreendidos e utilizados por diferentes organizações.

### **2.1.5 Rastreabilidade**

A rastreabilidade é um conceito transversal que evolui ao longo de diferentes domínios, sendo hoje considerada um elemento-chave para a transparência e circularidade das cadeias de valor. De forma geral, representa a capacidade de seguir ou relacionar produtos, materiais ou informações ao longo de todo o ciclo de vida, desde a origem até ao fim de vida [41]. Segundo *Corallo et al.* [42], esta capacidade permite identificar e monitorizar a história, localização e aplicação de produtos, assegurando qualidade e segurança. No contexto da EC, a rastreabilidade assume uma função estratégica, uma vez que possibilita recolher e partilhar dados sobre fluxos de materiais e produtos, promovendo práticas de reutilização, remanufatura e reciclagem [43, 44, 45].

### **2.1.6 Interoperabilidade**

A interoperabilidade é um conceito multidimensional que se manifesta na capacidade de sistemas, organizações e tecnologias de trocar, interpretar e utilizar dados de forma eficaz. Segundo *Wegner* [46] e *Moon et al.* [47], a interoperabilidade traduz-se na aptidão de diferentes sistemas para partilhar serviços e informação, operando de forma coordenada. Na perspetiva industrial, *Panetoo* e *Molina et al.* [48] acrescentam que a interoperabilidade requer cooperação entre entidades, apesar das diferenças de modelos, linguagens e processos. No contexto da EC é defendido que a interoperabilidade é o elo que conecta dados do ciclo de vida de produtos e materiais, sustentando a reutilização, reciclagem e remanufatura [49]. Assim, a interoperabilidade emerge como um pré-requisito da circularidade e da rastreabilidade, pois permite integrar os diversos agentes e sistemas que compõem a cadeia de valor. Para tal, é necessário atuar em múltiplas dimensões - técnica, semântica, organizacional e legal - garantindo que a informação flui sem barreiras e seja compreendida de forma consistente. A adoção de arquiteturas digitais interoperáveis, como o AAS e o DPP, constitui um passo decisivo para viabilizar ecossistemas industriais conectados, transparentes e sustentáveis.

### **2.1.7 Governança de dados**

A governança de dados constitui o conjunto de estruturas, processos, políticas e tecnologias que permitem gerir os dados como um ativo estratégico e confiável. De acordo com *Panian* [50] e *Khatri e Brown* [51], a governança de dados define as responsabilidades, direitos e mecanismos necessários para assegurar a qualidade, segurança e coerência das

informações. *Otto* [52] reforça o seu papel como função organizacional transversal, garantindo a responsabilidade na gestão e utilização de ativo de dados em toda a empresa. No contexto contemporâneo, *Riggins* e *Klamm* [53] destacam a importância da ética e da conformidade, especialmente face ao crescimento do volume e da sensibilidade dos dados.

No domínio da EC, a governança de dados torna-se essencial para assegurar a integridade e interoperabilidade da informação entre diferentes agentes da cadeia de valor. A CE [54] reconhece a governança de dados como um pilar para a criação de *data spaces* interoperáveis, transparentes e seguros, permitindo a partilha responsável de dados sobre produtos, materiais e processos. Assim, uma governança de dados robusta é condição necessária para a rastreabilidade, a interoperabilidade e a transparência que sustentam a circularidade.

### 2.1.8 *Internet of Things (IoT)*

A IoT é um conceito em rápida evolução que integra dispositivos, objetos e sistemas capazes de comunicar entre si através de redes digitais. Estes elementos físicos são dotados de identificadores únicos e sensores que lhes permitem recolher e trocar dados de forma autónoma ou semiautónoma [55, 56].

No âmbito da economia circular, a IoT constitui um facilitador essencial, ao fornecer dados contínuos sobre o estado, uso e condições dos produtos ao longo do seu ciclo de vida. Esta capacidade de monitorização e conectividade permite melhorar a rastreabilidade, otimizar processos e apoiar decisões orientadas para a reutilização, manutenção e valorização de recursos.

### 2.1.9 *Desafios e Barreiras*

A transição de uma EL para uma EC enfrenta uma série de desafios e barreiras que limitam a sua implementação em larga escala. Esses desafios podem ser categorizados em aspectos tecnológicos, económicos, sociais e regulatórios, sendo o fluxo de informação um dos elementos mais impactados por essas limitações [57, 4, 58].

A nível dos desafios tecnológicos podemos referir a adaptação de tecnologias, as ferramentas e sistemas desenvolvidos para cadeias lineares nem sempre são adequados para atender às necessidades da EC, como a reciclagem e a reutilização dos materiais. A ausência de sistemas padronizados dificulta a integração entre diferentes plataformas de informação, limitando a partilha de dados ao longo da cadeia de valor e comprometendo o acompanhamento do ciclo completo de vida dos materiais e produtos. Por essa razão, a interoperabilidade de dados e a rastreabilidade emergem como grandes desafios neste nível [59, 60, 61, 62].

Um obstáculo transversal é a heterogeneidade informacional. Os dados de que a circularidade precisa têm origens diversas (conceção, fabrico, logística, utilização, manutenção, recolha e reciclagem), naturezas distintas (estruturados, semi-estruturados e não estruturados), níveis de detalhe variáveis (produto, lote, componente) e ritmos diferentes. Cada organização usa o seu próprio vocabulário, nomenclatura, unidades, classificações e critérios de qualidade que não coincidem. E, com frequência, identificadores mudam ao longo do percurso, perdendo-se o seu rastreamento. A acessibilidade também é desigual: informação retida em departamentos, restrições legais/contratuais, receio competitivo e

ferramentas distintas tornam difícil que o interveniente certo tenha os dados certos, no momento certo. Sem uma linguagem comum e regras claras de partida, a informação não flui, e os dados vão se perdendo parcialmente ao longo da cadeia de valor [35, 63].

As barreiras económicas à transição para a economia circular estão frequentemente associadas a fatores sociais e organizacionais. A integração das tecnologias necessárias para suportar práticas circulares implica, em muitos casos, elevados investimentos iniciais e custos de adaptação. Além disso, muitas empresas mantêm-se enraizadas em modelos de negócios lineares, o que requer uma reestruturação profunda, para adotar abordagens baseadas na circularidade. A ausência de incentivos económicos e regulatórios para práticas circulares agrava esta resistência, tornando a transição menos atrativa do ponto de vista empresarial [64, 65, 66].

Uma grande barreira também está inserida a nível cultural e social. Por exemplo, a nível da cadeia de valor, os agentes da cadeia de valor ainda não compreendem os benefícios da EC, o que resulta em resistência à adoção de novas práticas e tecnologias. Os consumidores e empresas frequentemente desconhecem as vantagens económicas e ambientais associadas à circularidade. A transição para a EC exige colaboração entre diferentes setores e empresas, o que pode ser dificultado por interesses divergentes ou falta de confiança [4, 67].

O problema central que queremos abordar na EC é a interoperabilidade e rastreabilidade dos produtos na cadeia de valor. Uma das barreiras para a transição de uma EL para uma EC está no fluxo de dados. Esse fluxo não é contínuo, pois ao longo da cadeia de valor, há perdas de informação e falta de partilha adequada entre os agentes [68].

O objetivo é criar uma estrutura de informação e um mecanismo de partilha que seja, tanto quanto possível, padronizada e alinhada com os standards e princípios já existentes, bem como o conhecimento específico no âmbito da circularidade dos produtos.

Sem dados confiáveis e acessíveis, não será possível promover a interoperabilidade e a rastreabilidade do ciclo de vida do produto ao longo de toda a cadeia de valor. A ausência de um sistema automatizado e mecanizado de partilha de informação entre todos os seus elementos dificulta significativamente a transição para uma economia mais circular, dificultando assim a promoção de modelos de negócios mais circulares.

Acreditamos que a falta de um modelo de informação voltado para a gestão e partilha de dados no âmbito da EC possa agravar o problema da interoperabilidade e rastreabilidade dos dados. Sem essa estrutura padronizada de interoperabilidade e rastreabilidade, a colaboração entre os diversos contribuidores na cadeia de valor será comprometida, o que inviabiliza a circularidade. Cada participante da cadeia de valor tem um papel fundamental, fornecendo dados específicos de diferentes fases do ciclo de vida do produto. Por isso, é essencial que haja cooperação e compromisso entre todos eles, para além da estrutura de informação, de modo a garantir o sucesso da transição para a economia circular.

Na figura 2.2, é possível ver o fluxo contínuo a partir de uma perspetiva que permite visualizar o percurso dos dados ao longo da cadeia de valor, bem como os agentes que participam na partilha e visualização destes dados. Estes contribuintes incluem Produtores (que são os que produzem e fornecem a matéria-prima), Coletores (que são os que levam a matéria prima para os fabricantes), Fabricantes (que são os que trabalham com a matéria prima de forma a criar determinado produto), Distribuidores (aqueles que levam o produto para os Retalhistas), Retalhistas (que são os que fornecem determinados pro-

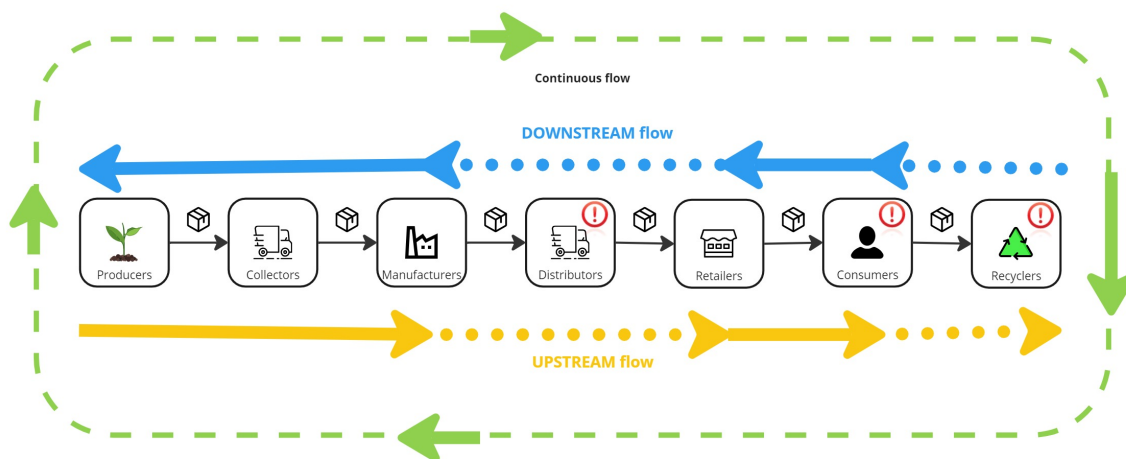


Figura 2.2: Fluxo de dados ao longo da cadeia de valor.

duto aos consumidores), Consumidores (o que utiliza o produto) e Recicladores (aqueles que são encarregues de dismantelar o produto no final do seu ciclo de vida).

Ainda na figura 2.2, é possível identificar o fluxo de dados pela cadeia de valor. A linha contínua representa em que etapas do ciclo de vida do produto o processo de recolha dos dados é de maior facilidade, e a tracejada aponta onde o processo de recolha é mais difícil. De acordo com a imagem, muitos dos dados relativos ao produto perdem-se no processo de distribuição, desde a fábrica até à loja, e após este ser comprado. Alguns dos agentes da cadeia de valor apresentam pontos críticos (que são os que são assinalados com o ponto de exclamação), mostrando que é precisamente nestes pontos que residem os principais desafios para garantir que a informação é partilhada de forma consistente ao longo de toda a cadeia de valor. Estes pontos críticos comprometem a rastreabilidade, a interoperabilidade e a circularidade do ciclo de vida do produto ao longo da cadeia de valor.

Nesta secção enumeramos algumas barreiras e desafios em diferentes níveis, sendo estes: barreiras a nível tecnológico, a nível económico, a nível social e cultural. A nível de tecnológico abordaram-se barreiras na interoperabilidade de dados, dificuldade no rastreamento e na adaptação de tecnologias, A nível económico foi referido os custos de implementação, modelos de negócios lineares e a falta de incentivos. A resistência à mudança, a baixa conscientização e a falta de colaboração fazem parte das barreiras e desafios encontrados a nível social e cultural.

### 2.1.10 Oportunidades

A transição para EC não é apenas um exercício de superação de barreiras, mas é sobretudo, uma janela de oportunidades económicas, ambientais e organizacionais. Ao recentrar a criação de valor na manutenção do valor dos materiais e produtos ao longo do tempo, a circularidade permite reduzir custos, mitigar riscos associados à volatilidade de matérias-primas e abrir novas fontes de receita (reparações, remanufatura, recondicionamento, segunda mão). Estes efeitos são particularmente relevantes para as PME's, que podem diferenciar-se em nichos que valorizem a durabilidade, reparabilidade e conteúdo reciclado [69, 23, 14].

Há também uma oportunidade estrutural que atravessa todas as outras, tratar a informação como um ativo comum da cadeia de valor. Instituir uma linguagem comum e uma estrutura de dados padronizada, simultaneamente legível por humanos e por máquinas, reduz custos de coordenação, evita "traduções" *ad-hoc* entre organizações e torna o fio informacional contínuo entre concepção, fabrico, distribuição, utilização, entre outros. Ao alinhar conceitos, propriedades e relações, isto é, ao promover interoperabilidade semântica, aumentam-se a rastreabilidade e a reutilização dos dados, e ganha-se confiança entre parceiros [70, 32, 71].

A nível da regulação, existe uma oportunidade na transparência da mesma. Iniciativas europeias recentes reforçam a necessidade de dados verificáveis ao longo do ciclo de vida, entre elas, destaca-se o DPP, concebido para disponibilizar informação fiável sobre composição, origem, uso, manutenção e para facilitar a circularidade em escala. Em paralelo, iniciativas como o PCDS propõem perfis mínimos de dados de circularidade, com o objetivo de estabelecer uma base comum para a troca de informação entre diferentes atores da cadeia de valor. Estas propostas contribuem para alinhar expectativas e requisitos entre os diferentes setores, promovendo maior consistência e interoperabilidade nos processos de recolha e partilha de dados [72, 73, 74, 75]. Para as empresas, isso traduz-se em previsibilidade e redução de perdas de informação com clientes, financiadores, fiscalizadores, diminuindo também o risco de *greenwashing*.

Do ponto de vista organizacional, a circularidade incentiva colaboração intersetorial e aprendizagem partilhada. A literatura mostra que partilhar informação de qualidade ao longo da cadeia de valor melhora a aprendizagem organizacional e a flexibilidade operacional, reforçando resiliência perante choques externos (por exemplo, rupturas de abastecimento) [28]. Esta colaboração é facilitada por ecossistemas de partilha de informação com regras claras de confiança, governança e interoperabilidade, os chamados *dataspaces*, que alinham interesses individuais e coletivos e baixam o custo de "ligar" dados entre atores da cadeia de valor [76].

Finalmente, ao medir sistematicamente impactos e melhorias, usando princípios operacionais da economia circular e metodologias tais como LCA/PEFCR, torna-se possível orientar decisões de design e de operação com base em evidências, fechar ciclos de reutilização e reciclagem e materializar ganhos ambientais (redução de extração de recursos, emissões e resíduos) em vantagem competitiva [14, 31]. A disponibilidade de informação relativamente ao produto e ao processo produtivo abre ainda espaço para simulação e análise de cenários de circularidade em contexto industrial [27].

Em síntese, as oportunidades associadas à transição para uma economia circular concentram-se na melhoria da eficiência económica e ambiental, na emergência de modelos de negócio orientado a serviços e à extensão do ciclo de vida dos produtos, na colaboração e resiliência das cadeias de valor, na garantia de conformidade e transparência, e, sobretudo, na valorização da informação como recurso estratégico. Esta última dimensão, que implica o desenvolvimento de uma base de dados comum, padronizada e legível por humanos e máquinas, capaz de tornar a informação compreensível, comparável e reutilizável ao longo de toda a cadeia de valor, constitui o foco dos instrumentos analisados nas secções seguintes (DPP, PCDS, AAS, LCA e PEFCR), aos quais operacionalizam essa dimensão informacional da circularidade.

## 2.2 Modelos para a Gestão de Informação na Economia Circular

A transição para uma EC exige não apenas mudanças nos processos produtivos e nos modelos de negócio, mas também uma base sólida de informação estruturada e interoperável. Para que os produtos, materiais e fluxos de valor possam ser acompanhados ao longo do seu ciclo de vida, é necessário recorrer a modelos conceituais e *frameworks* normativos e tecnológicos que suportem a recolha, organização e troca de dados de forma consistente.

Ao longo desta secção serão apresentados os principais modelos e *frameworks* relevantes para a gestão de informação no contexto da circularidade, partindo de abordagens mais conceituais e gerais, até instrumentos mais normativos e tecnológicos que permitem a sua operacionalização.

### 2.2.1 *Framework* dos R's

Na implementação de estratégias circulares e mais sustentáveis, o *Framework* dos R's tem sido amplamente reconhecido como um instrumento fundamental para medir e orientar o grau de circularidade. Esta abordagem combina a política dos R's com os princípios da EC, propondo 10 estratégias complementares: recusar, repensar, reduzir, reutilizar, reparar, remodelar/renascer, remanufaturar, reutilizar (numa nova função), reciclar e recuperar [77]. Por este motivo, é considerado um dos principais *frameworks* que facilitam a transição da EL para a EC [69, 57, 78].

Atualmente, podemos distinguir três modelos económicos: a Economia Linear, a Economia da Reciclagem e a Economia Circular. A EL, a predominante, caracteriza-se pela lógica "extrair-produzir-usar-descartar", resultando em elevado desperdício [57]. A Economia da Reciclagem introduz um ciclo de retorno parcial em que alguns materiais são reaproveitados no fim de vida dos produtos, reduzindo a quantidade de resíduos. E por fim a EC, que é hoje em dia o modelo mais desejado, ao minimizar ou até eliminar a produção de resíduos, uma vez que todos os materiais podem ser retornados, reparados, reutilizados ou reciclados em diferentes ciclos de valor [78, 7]. Na figura 2.3 ilustra-se esta evolução, evidenciando os diferentes fluxos ao longo do ciclo de vida dos produtos.

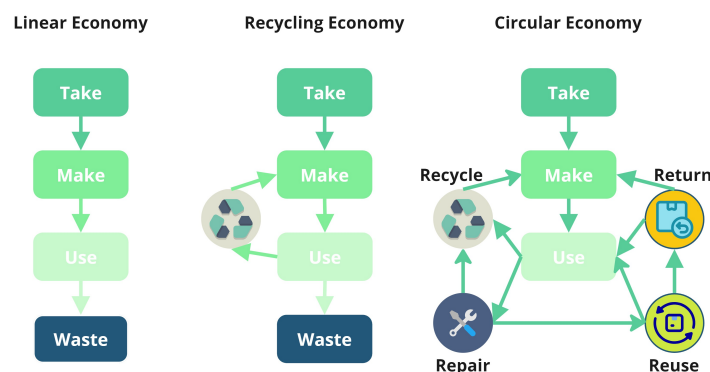


Figura 2.3: Fluxo do ciclo de vida dos materiais ao longo dos diferentes modelos económicos.

[79, 80, 81]

O objetivo da *frameworks* dos R's é, portanto, reduzir o consumo de recursos e materiais na cadeia de valor e prolongar a vida útil dos produtos e componentes, contribuindo para uma economia mais circular [57, 78].

Na figura 2.4 apresentam-se diferentes estratégias, que podem ser classificadas entre alta circularidade (baixo número de R) e baixa circularidade (alto número de R). Existe uma relação inversa entre a posição do R e o grau de circularidade: quanto mais próximo do R0, maior a capacidade de prevenir o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos; quanto mais próximo do R9, menor a circularidade, uma vez que estratégias como a recuperação energética, embora permitam o aproveitamento do conteúdo energético dos resíduos, resultam na perda dos materiais, comprometendo o encerramento do ciclo dos recursos.

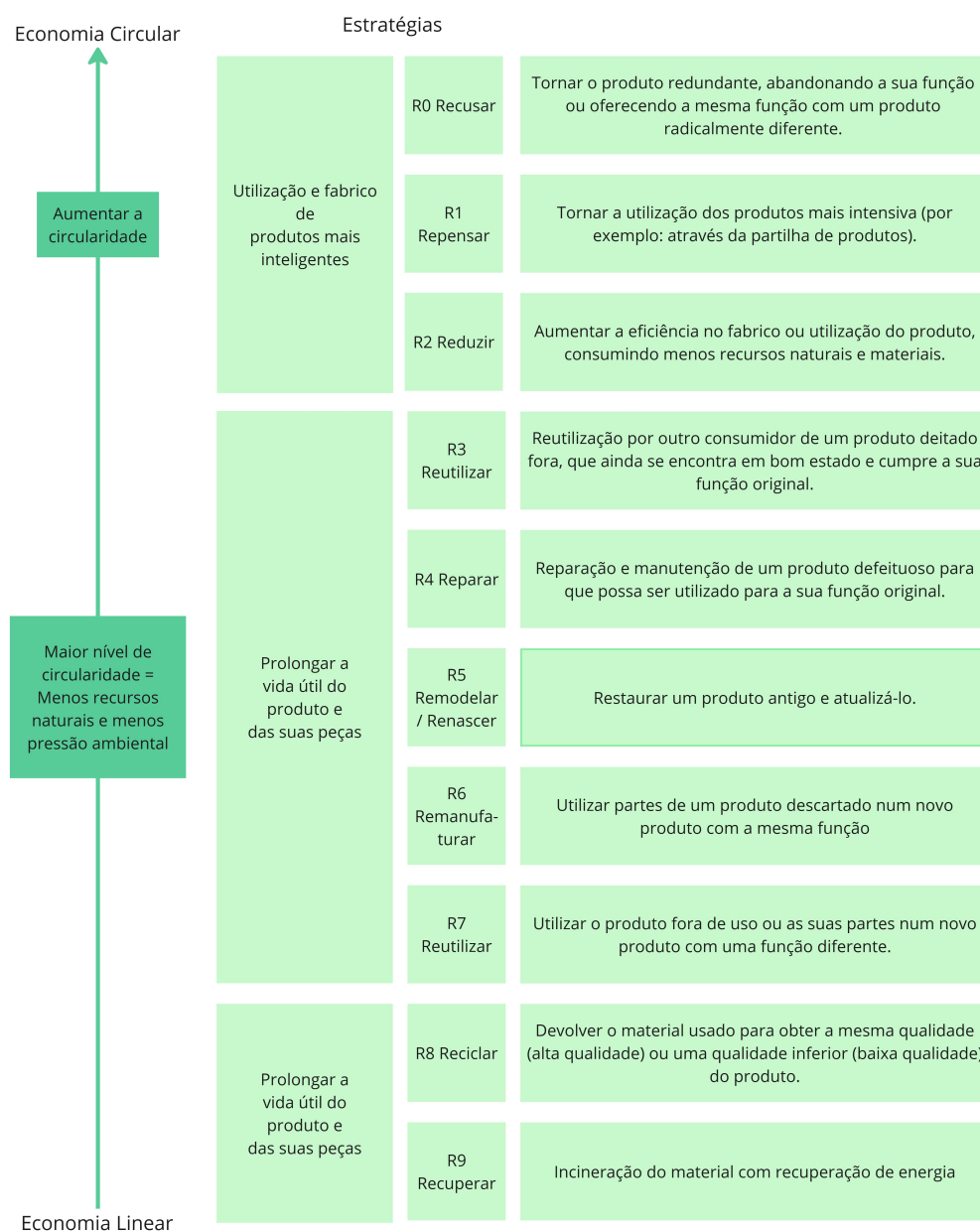


Figura 2.4: Tabela das Estratégias de circularidade na cadeia de produção. [77]

As estratégias iniciais (R0 e R1) não aumentam diretamente a reutilização ou a reciclagem, mas reduzem a necessidade de novos produtos ao incentivar a inovação no design, eficiência no uso de recursos e novos modelos de negócio [77, 82]. Desta forma, são altamente relevantes para a transição para a circularidade, ao mesmo tempo que promovem a adoção de práticas de consumo mais conscientes.

Uma maior circularidade traduz-se no prolongamento do ciclo de vida do produto, que permanece ativo na cadeia de valor durante mais tempo e pode se reutilizado após o descarte, preferencialmente mantendo a qualidade original. Isso reduz a necessidade de extrair matérias-primas virgens e de produzir novos materiais, o que resulta em benefícios ambientais significativos, tais como a diminuição da pegada de carbono e o alívio da pressão sobre ecossistemas. Assim, o *Framework* dos R's constitui um instrumento central de operacionalização da circularidade e tem servido de base para políticas públicas e estratégias industriais a nível europeu e global [57, 78].

### 2.2.2 *Digital Twin (DT) e Cognitive Digital Twin (CoDT)*

Embora a framework dos R's defina as estratégias de maior impacto para reduzir o consumo de recursos, prolongar a vida útil dos produtos e aumentar a circularidade, a sua concretização prática requer ferramentas digitais capazes de recolher, estruturar e interpretar dados em tempo real ao longo de toda a cadeia de valor. Nesse sentido, o DT surge como um modelo fundamental que fornece uma representação virtual de um ambiente composto por ativos físicos (produto, máquina, dispositivo, entre outros), pessoas, sistemas e processos, permitindo monitorizar e otimizar o desempenho desses elementos e apoiar a tomada de decisão baseada em dados [83, 84].

A estrutura geral de um DT é frequentemente composta por três camadas principais: a camada física, a camada digital e uma camada de comunicação, responsável por assegurar a troca de dados entre as duas primeiras. Este modelo pode ser utilizado para múltiplos fins, como por exemplo, representar um produto integrando dados sobre os materiais utilizados na sua conceção e informações recolhidas ao longo do seu processo produtivo. Esta utilização, obviamente, é possível graças à utilização de sensores instalados na linha de produção. Além disso, o DT, no contexto da circularidade, assume um papel relevante ao poder armazenar dados abrangentes sobre o ciclo de vida completo do produto. A partir desses dados, é possível realizar, por exemplo, simulações de alternativas de *design* e de parâmetros de fabrico, que permitem melhorar a funcionalidade do produto, reduzir o impacto ambiental e prever eventuais falhas durante a sua utilização [85, 86].

O CoDT surge como uma extensão do DT, dotada de características semânticas e cognitivas avançadas que lhe conferem a capacidade de detetar e interpretar padrões de evolução nos ativos físicos e no próprio modelo digital. Estas capacidades permitem melhorar a tomada de decisão baseada em dados e compreender as inter-relações dinâmicas entre os diversos DTs que integram o sistema virtual. Ao integrar mecanismos de aprendizagem automática e raciocínio semântico, o CoDT amplia a gestão dos ativos, tornando-a proativa e adaptativa, e responde de forma mais eficiente a problemas complexos e contextuais, através da integração com sistemas baseados no IoT [87, 88].

Esta capacidade de resposta inteligente resulta diretamente da sua arquitetura cognitiva. Os CoDTs possuem um elevado grau de inteligência, permitindo-lhes replicar processos cognitivos humanos e realizar ações conscientes com mínima ou nenhuma intervenção hu-

mana. O núcleo de conhecimento dos CoDT é composto por capacidades avançadas de reconhecimento, aprendizagem, inferência, estimativa e tomada de decisões. Estas capacidades baseiam-se numa série de modelos preditivos e de aprendizagem de *Machine Learning* (ML) desenvolvidos a partir de dados obtidos por diversas fontes [89, 90]. Deste modo, o CoDT pode ser treinado e continuamente aperfeiçoado para representar e descrever o estado atual do ativo físico e o seu funcionamento em tempo real. Adicionalmente, tanto no domínio digital como no físico, o CoDT consegue identificar, analisar, deduzir e prever as ações atuais e potenciais do sistema físico geminado, tomando decisões baseadas na interação entre máquinas e seres humanos [90].

Tal como o DT, o CoDT revela um elevado potencial no contexto da circularidade. Contudo, distingue-se pela sua capacidade cognitiva de aprendizagem e adaptação contínua, que o torna mais eficaz na identificação e otimização de fluxos circulares ao longo do ciclo de vida do produto. A sua retroalimentação permanente permite ajustar o *design* e os processos de fabrico com base em dados em tempo real, promovendo melhoria constante do desempenho ambiental e o alinhamento dinâmico com os princípios da EC. Além disso, o CoDT facilita avaliações automatizadas do ciclo de vida (LCA), deteta oportunidades de reutilização e remanufatura, e apoia a conceção de produtos mais sustentáveis e resilientes. Desta forma, representa uma evolução do modelo tradicional do DT, ao integrar inteligência e capacidade de raciocínio que transformam dados em conhecimento acionável, consolidando o CoDT como um instrumento chave para a transição circular.

### **2.2.3 *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR)***

O PEFCR é uma iniciativa da CE desenvolvida no âmbito da metodologia *Product Environmental Footprint* (*Product Environmental Footprint* (PEF)), com o objetivo de padronizar a forma de como os impactos ambientais dos produtos são medidos e comunicados em toda a UE. O PEFCR define regras específicas para cada categoria de produto, garantindo consistência e comparabilidade entre avaliações realizadas por diferentes organizações e setores [91].

A metodologia do PEFCR baseia-se na abordagem de LCA, segundo as normas ISO 14040 [92] e ISO 14044 [93], considerando todas as fases: extração de matérias-primas, fabrico, distribuição, utilização e fim de vida. Este foco permite às empresas identificar pontos críticos de impacto e oportunidades de melhoria, ao mesmo tempo que fornece aos consumidores informação clara para escolhas mais sustentáveis.

A criação do PEF e do PEFCR surgiu como resposta à fragmentação das metodologias de avaliação ambiental existentes na UE, marcada pela coexistência de diversas abordagens, certificações e rótulos ambientais. No espaço europeu convivem múltiplas interpretações de LCA, metodologias específicas focadas em categorias de impacto, declarações ambientais de produto e esquemas privados de rotulagem, cada um com critérios e métricas próprios. Esta diversidade compromete a comparabilidade e a credibilidade dos resultados, dificultando uma comunicação transparente sobre o desempenho ambiental dos produtos. O problema é particularmente evidente nos setores do vestuário e do calçado, onde a proliferação de sistemas de certificação e indicadores de sustentabilidade gera inconsistências significativas na avaliação e divulgação dos impactos ambientais. Para enfrentar estes desafios, o PEFCR procura estabelecer uma base comum europeia, assegurando avaliações robustas e comparáveis entre empresas e países [91, 94].

O PEF fornece uma estrutura padronizada para avaliar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, cobrindo 16 indicadores ambientais, incluindo alterações climáticas, uso de recursos, poluição da água e do solo, saúde humana, entre outros [95]. A utilização desta metodologia garante uma linguagem comum de comunicação entre empresas, consumidores e reguladores no que diz respeito à sustentabilidade, aumentando assim a credibilidade, transparência e comparabilidade dos resultados.

No âmbito desta metodologia, foram criadas as PEFCR, que adaptam as regras gerais às especificidades de cada setor e categoria de produto [96]. Por exemplo, as PEFCR para os setores do vestuário e calçado foram desenvolvidas por grupos de trabalho *multi-stakeholder*, aprovadas pela UE e sujeitas a consultas públicas e revisões de especialistas. Na prática, resultam num documento que define as regras específicas para 13 subcategorias de produtos (como t-shirts, camisas, calças, vestidos, calçado aberto e fechado, botas, entre outros), estabelecendo critérios claros para a avaliação do seu impacto ambiental.

As principais vantagens do PEFCR incluem a definição de regras específicas para diferentes categorias de produtos, assegurando consistência setorial e promovendo a comparabilidade entre avaliações ambientais. Esta comparabilidade traduz-se na possibilidade de comparar de forma objetiva o desempenho ambiental de produtos semelhantes, uma vez que todas as análises seguem critérios metodológicos e indicadores uniformizados [96, 91]. Além disso, o PEFCR contribui para a otimização de custos, reduzindo o tempo e os recursos necessários para a avaliação, o que beneficia em particular as PMEs [97]. Outro aspeto relevante é o incentivo ao ecodesign, que estimula a inovação em áreas como a durabilidade, a reparabilidade e a eficiência no uso de recursos [91]. Por fim, o PEFCR estabelece um quadro comum europeu, garantindo que todas as marcas utilizam o mesmo referencial [98].

No caso específico do vestuário e do calçado, o PEFCR vai além da análise tradicional e incorpora dimensões diretamente relacionadas com a circularidade. Entre estas destacam-se a durabilidade, considerada essencial para prolongar a vida útil dos produtos e reduzir o seu impacto ambiental; e, a reparabilidade, que promove a reutilização e a manutenção ao longo do tempo [97]. Adicionalmente, o PEFCR contempla a integração de materiais reciclados e estabelece regras para a avaliação de produtos reciclados após o uso. Outro aspeto inovador, é a inclusão do impacto dos fragmentos das fibras (incluindo microplásticos), que, embora ainda avaliado de forma parcial, já surge como informação adicional relevante para a compreensão dos efeitos ambientais destes setores.

Ao alinhar-se com o *European Green Deal* e iniciativas como a *Sustainable Products Initiative*, o PEFCR consolida-se como uma ferramenta essencial para a transição circular, fornecendo métricas quantificáveis e comparáveis que apoiam tanto o ecodesign quanto a rastreabilidade do impacto ambiental no mercado europeu.

A estreita relação entre o PEFCR e a abordagem de LCA demonstra o alinhamento metodológico destas iniciativas com as normas internacionais de avaliação de impacto ambiental. Enquanto o PEFCR fornece regras padronizadas e setoriais, o LCA constitui a base científica que permite quantificar os impactos em todas as fases do ciclo de vida do produto (desde a extração de matérias-primas ao fim de vida). Assim, o PEFCR representa uma aplicação prática e setorial da LCA, assegurando consistência, comparabilidade e robustez científica. Esta integração reforça a ligação entre a medição do impacto ambiental e os princípios da Economia Circular, contribuindo para o cumprimento das metas do *European Green Deal* e de outras políticas europeias de sustentabilidade.

## 2.2.4 *Life Cycle Assessment (LCA) e Life Cycle Inventory (LCI)*

Como apresentado na secção anterior, o LCA constitui a principal metodologia utilizada para analisar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto. Nesta secção aprofunda-se essa abordagem, enquadrando as normas internacionais que a estruturam (ISO 14040[92] e a ISO 14044[93]) e descrevendo as etapas que compõem a sua aplicação prática ao longo das diferentes fases do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até ao fim de vida do produto.

A LCA é composta por quatro fases principais: 1. definição de objetivos e âmbito, onde é estabelecida a unidade funcional, que corresponde ao parâmetro quantitativo utilizado como referência para a comparação entre produtos, como por exemplo, 1 kg de tecido produzido ou 1 par de sapatos produzido em 1 hora. Nesta fase são também definidos os limites do sistema e a finalidade do estudo; 2. o inventário do ciclo de vida (LCI), que consiste na recolha e quantificação dos fluxos de entrada, como recursos, energia e materiais, e dos fluxos de saída, como emissões, resíduos e subprodutos; 3. avaliação de impacto do ciclo de vida (*Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*), na qual os dados recolhidos no inventário são traduzidos em indicadores de impacto ambiental, abrangendo categorias como alterações climáticas, acidificação, eutrofização (fenômeno de poluição hídrica causado pelo excesso de nutrientes) ou toxicidade; e, 4. a interpretação dos resultados, que envolve a análise crítica dos impactos identificados, a avaliação das incertezas e a formulação de recomendações que orientem decisões para a melhoria do desempenho ambiental [92].

No contexto da circularidade, a LCA assume, assim, um papel crucial por três razões principais: 1. permite identificar hotspots ambientais ao longo da cadeia de valor, destacando fases críticas em termos de emissões ou consumo de recursos; 2. apoia o ecodesign, fornecendo informação quantitativa que orienta escolhas de materiais, processos de fabrico e estratégias de fim de vida; e, 3. facilita a comparação entre alternativas de produtos e modelos de negócio circulares, oferecendo uma base objetiva para avaliar benefícios ambientais de práticas como a reutilização, a remanufatura ou a incorporação de materiais reciclados [99, 65, 100].

Entre as quatro fases do LCA, o LCI assume particular relevância no contexto atual, uma vez que a qualidade e disponibilidade dos dados determinam a credibilidade da análise. A recolha de dados primários (específicos da empresa ou do processo) e secundários (base de dados genéricas como *Ecoinvent* ou *Environmental Footprint* da CE) representa muitas vezes um desafio, especialmente em cadeias de valor complexas e globais [101]. A integração de tecnologias digitais, como o DPP, tem vindo a ser proposta como solução para facilitar a recolha automatizada dos dados e a sua interoperabilidade, aumentando a robustez das análises de ciclo de vida [102].

Assim, a LCA e o LCI constituem não apenas ferramentas de avaliação ambiental, mas também instrumentos estratégicos para operacionalizar a circularidade, fornecendo métricas quantitativas que suportam políticas públicas, certificações e iniciativas empresariais. A sua utilização em conjunto com metodologias como o PEF/PEFCR reforça a credibilidade dos resultados [103] e contribui para uma transição mais sustentável e baseada em evidências científicas.

Embora metodologias como o LCA e o PEFCR ofereçam uma base científica sólida para

medir e comparar impactos ambientais, a sua aplicação prática enfrenta um desafio central relacionado com a disponibilidade e interoperabilidade dos dados ao longo da cadeia de valor. É precisamente neste ponto que entram as frameworks digitais como o AAS, que fornecem estruturas normalizadas para a recolha, integração e partilha de informação sobre produtos, processos e recursos. Neste sentido, o AAS é explorado na secção que se segue.

### 2.2.5 *Asset Administration Shell (AAS)*

O AAS é o modelo de representação digital normalizado de um ativo físico ou virtual, desenvolvido no âmbito da I4.0 e enquadrado no modelo de referência Modelo Arquitetónico de Referência para Indústria 4.0 (RAMI4.0), para descrever de forma estruturada todas as suas características, dados e comportamentos ao longo do ciclo de vida. Surge, assim, como um elemento-chave para tornar os dados do ciclo de vida mais acessíveis, organizados e reutilizáveis, permitindo que métricas ambientais possam ser efetivamente operacionalizadas na prática industrial e sustentando a transição para a EC [104, 105].

A arquitetura do AAS assenta uma estrutura modular composta por Submodel (SM), cada um dedicado a uma dimensão específica do ativo (por exemplo, dados técnicos, parâmetros de produção, indicadores de circularidade, entre outros). Cada submodelo é constituído por um conjunto de elementos de submodelo (*Submodel Element (SME)*), que representam as unidades fundamentais de informação. Estes elementos podem assumir diferentes tipos como *Property (Prop)* (valor simples), *Submodel Element Collection (SMC)* (agrupamento lógico de elementos relacionados, por exemplo, dentro dos dados técnicos do produto é possível especificar coleções como por exemplo, identificação do produto, identificação da empresa ao qual o produto pertence, entre outros), *Reference Element (Ref)* (referência a entidades externas, como por exemplo, outros submodelos, propriedades ou até mesmo outros AASs que estejam disponíveis na mesma rede). Tal estrutura permite modelar tanto dados estáticos como comportamentos dinâmicos, assegurando flexibilidade e a extensibilidade do modelo. Além disso, todos os elementos são descritos por metadados normalizados (como identificadores semânticos, tipo de valor e unidade), garantindo que diferentes atores e sistemas conseguem interpretar os dados de forma uniforme e interoperável [106].

No contexto da EC, o AAS desempenha um papel particularmente relevante ao permitir que dados sobre materiais, processos e impactos ambientais sejam capturados, estruturados e disponibilizados de forma interoperável. Por exemplo, um AAS pode conter um submodelo dedicado a indicadores de circularidade (como a percentagem de material reciclado, o consumo energético ou a pegada do carbono), permitindo a sua utilização em processos relativos a LCA ou PEFCR) ou mesmo em ferramentas de tomada de decisão baseadas em dados em tempo real [105, 104].

Para além disso, a capacidade do AAS de se integrar com tecnologias como o DT ou os DPP reforça o seu papel como estrutura de dados confiável. Esta integração ocorre sobretudo ao nível da interoperabilidade semântica e da troca estrutural dos dados, uma vez que o AAS fornece uma descrição normalizada e legível por máquinas dos ativos e dos seus submodelos, que pode ser diretamente consumida ou atualizada por outras plataformas digitais. Enquanto o DT e o CoDT permitem a simulação e a análise preditiva, o AAS garante que os dados subjacentes estão descritos e organizados segundo normas comuns, promovendo a interoperabilidade ao longo da cadeia de valor [107, 108].

Com o intuito de padronizar a implementação e evolução do AAS, a *Industrial Digital Twin Association* (IDTA) publicou uma série de especificações técnicas que definem diferentes aspectos da especificação AAS. Entre as partes mais relevantes destacam-se: a parte 1 [109], dedicada ao metamodelo principal do AAS, descreve a sua estrutura fundamental; a parte 2 [110] define a especificação da *Application Programming Interface* (API), estabelecendo como os dados podem ser acessados e manipulados; a parte 3 [111] apresenta um conjunto de especificações de dados pré-definidos, de modo a facilitar a consistência entre diferentes implementações; a parte 5 [112] especifica o formato de troca *AASX*, que normaliza a forma de armazenamento e partilha de pacotes de dados no AAS, entre outros ficheiros disponibilizados pela IDTA. De seguida são apresentadas de forma detalhada as partes com maior relevância para o desenvolvimento do projeto descrito neste relatório. Neste sentido, a parte 1, assume um papel muito importante para a compreensão do funcionamento do Asset Administration Shell.

Assim, no âmbito deste estudo, o AAS é utilizado com estrutura de informação para a criação de DTs. O DT, é também o principal pivô para a gestão da informação circular, ao ser usado para representar qualquer ativo empresarial no âmbito da I4.0, descrevendo um produto e as suas transformações ao longo do seu ciclo de vida. A informação contida nesta estrutura é alimentada por dados provenientes de *frameworks* descritivas, como o PCDS. bem como por outras estruturas de referência, métricas e indicadores de circularidade. Estes elementos são integrados no AAS com o propósito de construir um modelo de informação normalizado, capaz de representar, de forma coerente e interoperável, os aspectos circulares de cada ativo. O objetivo é reutilizar modelos de referência e vocabulários existentes, atribuindo-lhes uma nova aplicação no contexto da circularidade [105].

Na figura 2.5 é apresentada uma representação esquemática da estrutura do AAS. O modelo é constituído por duas partes principais: o cabeçalho (header) e o corpo (body). O cabeçalho inclui a identificação do ativo e a identificação do próprio AAS, assegurando que cada ativo possui uma identidade digital única. Já o corpo é composto por um conjunto de SM, que organizam a informação do ativo em diferentes dimensões. Cada SM pode conter propriedades, funções e informações associadas, que descrevem desde características técnicas e operacionais até indicadores de circularidade e sustentabilidade. Esta estrutura modular garante a extensibilidade e a interoperabilidade, permitindo que os dados sejam utilizados em diferentes contextos e aplicações industriais, incluindo avaliações ambientais, rastreabilidade e integração com DT [106, 104].

Deste modo, a adoção do AAS demonstrou ter grande potencial no alinhamento dos objetivos de digitalização com os objetivos de sustentabilidade, apoiando tanto a transparência e rastreabilidade de produtos como a eficiência na utilização de recursos [105]. Esta afirmação será comprovada com os resultados apresentados nos capítulos seguintes deste documento.

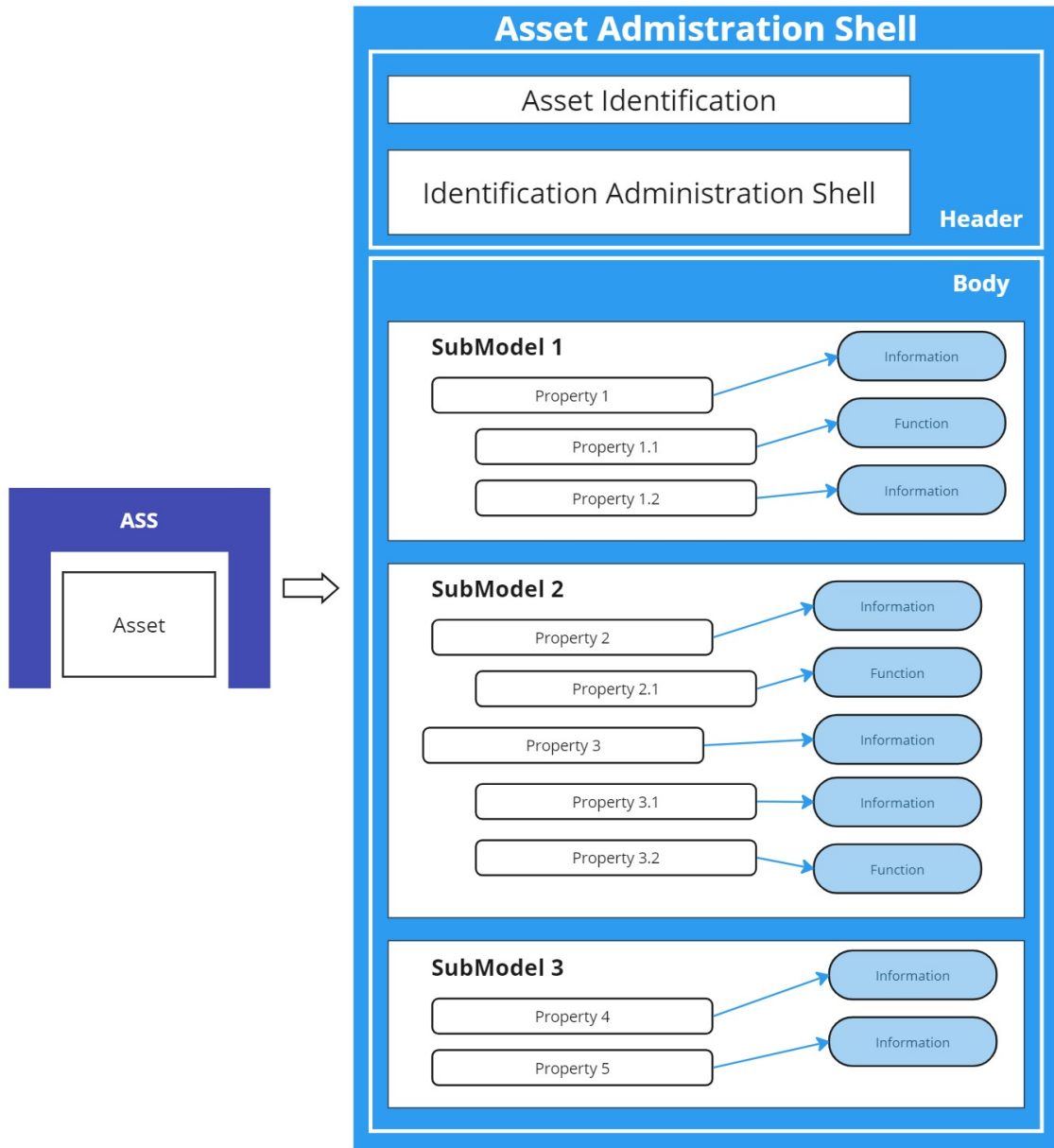


Figura 2.5: Estrutura dos metamodelos do AAS.  
[109]

### 2.2.6 *Digital Product Passport (DPP)*

Enquanto o AAS fornece a base técnica e semântica para estruturar e partilhar informação de forma interoperável ao longo da cadeia de valor, o DPP representa a sua aplicação prática em contexto regulatório e de mercado. O DPP, atualmente em desenvolvimento no âmbito das políticas europeias, tem como objetivo garantir que dados essenciais sobre a composição, origem, circularidade e sustentabilidade de um produto acompanhem esse mesmo produto durante todo o seu ciclo de vida. Neste contexto, a circularidade refere-se à capacidade de manter os materiais e componentes em uso pelo maior tempo possível, através de estratégias como reutilização, reparação ou reciclagem, enquanto a sustentabilidade abrange uma perspectiva mais ampla, incluindo impactos ambientais, sociais e económicos associado ao produto. Assim, o DPP pode ser entendido como uma implementação específica dos princípios do AAS, voltada para a rastreabilidade e transparência, assegurando que fabricantes, consumidores e reguladores dispõem de informação fiável para apoiar decisões sustentáveis e alinhadas com os objetivos do *European Green Deal*.

Do ponto de vista político, o DPP surge como um instrumento central da estratégia europeia para promover a transição verde e digital. Inserido no Pacto Ecológico Europeu [113] e no Plano de Ação para a Economia Circular [114], o seu desenvolvimento reflete a crescente prioridade atribuída pela UE à criação de mecanismos que assegurem a disponibilidade e interoperabilidade dos dados ao longo das cadeias de valor [115]. Assim, o DPP consolida-se como uma ferramenta de política pública destinada a operacionalizar objetivos de circularidade e sustentabilidade, reforçando a coerência entre as iniciativas regulatórias e as soluções tecnológicas propostas no âmbito do AAS.

O DPP atua como uma ferramenta regulatória e operacional que beneficia diversos atores da cadeia de valor [116, 117, 118]. Para os fabricantes, permite documentar de forma normalizada as características ambientais e de circularidade dos seus produtos. Para os consumidores, disponibiliza informação clara e comparável, promovendo escolhas de compra mais sustentáveis e conscientes. Para recicladores e gestores de resíduos, fornece dados técnicos que facilitam processos de desmontagem, triagem e reutilização de materiais. Já para reguladores e autoridades públicas, possibilita a monitorização, o cumprimento das metas ambientais e a implementação de políticas alinhadas com a economia circular [72, 119].

Do ponto de vista técnico, o DPP apresenta fortes sinergias com arquiteturas digitais, como o AAS, Enquanto o AAS organiza os dados de forma padronizada e interoperável, o DPP traduz essa estrutura num instrumento regulatório, assegurando que a informação relevante sobre a circularidade e sustentabilidade esteja disponível em toda a cadeia de valor, em conformidade com requisitos legais europeus [73].

Em termos de conteúdo, o DPP pode integrar uma ampla gama de informação que abrange todo o ciclo de vida do produto. No que diz respeito ao fabrico, inclui dados sobre a composição de cada componente, os materiais utilizados, os processos de produção, bem como propriedades físicas e químicas e informações relativas a substâncias críticas ou potencialmente perigosas para a saúde humana e para o ambiente. Durante a fase de utilização, o DPP pode documentar reparações, substituições de peças e o histórico de manutenção do produto. Já na fase do fim de vida, disponibiliza informações essenciais sobre recolha, triagem e tratamento, fundamentais para possibilitar processos eficientes de reciclagem ou remanufatura. Para além disso, pode ainda conter dados de âmbito global

sobre o ciclo de vida, como o volume de vendas ou fluxos de utilização, que permitem antecipar a quantidade de resíduos e identificar recursos que podem ser recuperados [120, 121, 122].

Para além dos benefícios técnicos e regulatórios apresentados, o DPP também desempenha um papel relevante na esfera do consumo. Ao disponibilizar informação sobre durabilidade, reparabilidade e impacto ambiental, este instrumento permite que os consumidores façam escolhas mais conscientes, contribuindo para a procura por produtos alinhados com os princípios da EC [123].

No entanto, apesar do seu potencial, os DPPs ainda enfrentam desafios significativos. Entre os principais, destacam-se: a dificuldade de criar uma abordagem unificada aplicável a todos os setores industriais; a necessidade de definir mecanismos claros para manter a informação atualizada ao longo de todo o ciclo de vida do produto; e a gestão de questões de confidencialidade de dados e proteção da propriedade intelectual, desafios críticos para garantir a adoção do conceito pela indústria [124].

Assim, embora ainda em fase de implementação, com aplicação prioritária em setores como têxtil, eletrónica, baterias e construção, o DPP representa não apenas um mecanismo regulatório, mas também uma estrutura de dados para a economia circular, consolidando a integração entre inovação digital, sustentabilidade e competitividade no mercado europeu.

### **2.2.7 Normas ISO que suportam a transição para a Economia Circular**

A transição para uma economia circular requer a padronização de práticas e metodologias que promovam a reutilização, a reciclagem e a valorização dos produtos ao longo do seu ciclo de vida. Nesse contexto, diversas normas da ISO têm sido desenvolvidas para apoiar as organizações na implementação de estratégias circulares, ao fornecer diretrizes para a gestão eficiente de recursos, a avaliação de impactos ambientais e a interoperabilidade dos dados. Estas normas desempenham um papel essencial na promoção da sustentabilidade, ao estabelecerem uma linguagem comum que permite alinhar metodologias, métricas e práticas entre setores e países, garantindo consistência científica, credibilidade internacional e integração digital na operacionalização da circularidade.

Entre as mais relevantes encontram-se normas da série ISO 14000, que constituem a base metodológica da avaliação ambiental. Em particular, as normas ISO 14040 [92] e ISO 14044 [93] que definem os princípios, requisitos e diretrizes para a realização do LCA, fornecem a estrutura científica que sustenta a metodologia com o PEFCCR. Complementarmente, normas como a ISO 14020 [125] e as suas extensões orientam a comunicação de informações ambientais em rótulos e declarações, assegurando clareza e confiança na relação com os consumidores.

Mais recentemente, a ISO lançou a série 59000, dedicada especificamente à economia circular. A ISO 59004 [126] estabelece terminologia e princípios fundamentais, a ISO 59010 [127] fornece orientações para implementação de negócios circulares e a ISO 59020 [128] apresenta métricas e indicadores para avaliar o desempenho em circularidade. Estas normas assumem particular relevância ao fornecerem uma base padronizada que permite às empresas medir, comparar e reportar o seu progresso rumo a uma economia mais circular.

Um caso particularmente relevante é o PCDS, recentemente publicado como norma ISO no âmbito de comité técnico ISO 59040 [129] para a EC. O PCDS fornece um modelo de dados estruturado que permite caracterizar de forma normalizada o desempenho circular de produtos, incluindo indicadores como reciclabilidade, reparabilidade e reutilização. Esta normalização internacional garante comparabilidade, entre setores e facilita a integração do PCDS em frameworks digitais como o AAS e o DPP, funcionando como ponte entre métricas ambientais (como as definidas pela LCA e PEFCE) e a gestão interoperável da informação ao longo da cadeia de valor.

Para além da dimensão ambiental e de negócio, a gestão e interoperabilidade de dados são igualmente contemplada em normas ISO que se tornam especialmente importantes no contexto da I4.0. A ISO 10303 [130], por exemplo, define padrões para a representação de dados de produto ao longo do ciclo de vida, sendo amplamente utilizada para integrar sistemas heterogéneos. A IEC 62264 [131], aborda a integração entre sistemas de controlo industrial e sistemas de gestão empresarial, assegurando a ligação entre o chão de fábrica e os níveis estratégicos. Já a ISO/IEC 30141 [132], dedicada à arquitetura de IoT, fornece a base conceptual para tecnologias como o DT e o AAS.

Outras normas complementares incluem ISO 22095 [133], que regula cadeias de custódia (Chain of Custody) essenciais para a rastreabilidade de materiais críticos ou reciclados, e a ISO 8000[134], que define requisitos de qualidade e interoperabilidade de dados, assegurando que a informação utilizada em toda a cadeia de valor é precisa, acessível e confiável.

Deste modo, as normas ISO, tabela 2.1, não apenas apoiam metodologias como o LCA e o PEFCE, mas também reforçam frameworks digitais como o AAS e o DPP, ao fornecerem a base normativa e técnica necessária para que dados ambientais e de circularidade sejam estruturados, comparáveis e utilizáveis à escala internacional.

<b>Norma ISO</b>	<b>Objetivo principal</b>
ISO 14040 [92] / ISO 14044 [93]	Definem princípios e requisitos para o <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)
ISO 14020 [125] (e derivadas)	Orientam a rotulagem ambiental e comunicação transparente ao consumidor
ISO 59004 [126]	Define a terminologia e princípios da economia circular
ISO 59010 [127]	Fornecer diretrizes para modelos de negócio circulares
ISO 59020 [128]	Estabelece métricas e indicadores para circularidade
ISO 59040 [129]	Padronização do PCDS
ISO 10303 [130]	Padrão para representação de dados de produto ao longo do ciclo de vida
ISO/IEC 62264 [131]	Integra sistemas de produção (MES, ERP, SCADA)
ISO/IEC 30141 [132]	Arquitetura de referência para <i>Internet of Things</i> (IoT)
ISO 22095 [133]	Regras para cadeias de custódia (Chain of Custody)
ISO 8000 [134]	Normas de qualidade e interoperabilidade de dados

Tabela 2.1: Normas ISO e os seus objetivos principais

## 2.2.8 Product Circularity Data Sheet (PCDS)

O PCDS surgiu no âmbito da *Circularity Dataset Initiative* (CDI), lançado em 2018 pelo *Ministério de Economia do Luxemburgo* (MEL) em colaboração com parceiros industriais internacionais. O objetivo era criar um modelo de dados aberto, normalizado e não confidencial, capaz de facilitar a partilha de informação essencial sobre a circularidade de produtos ao longo de toda a cadeia de valor [135, 136]. Esta iniciativa tinha três objetivos centrais: fornecer dados básicos sobre a circularidade de um produto; melhorar a eficiência na partilha de dados entre os agentes da cadeia de valor; e incentivar a melhoria contínua do desempenho em termos de circularidade.

Mais recentemente, o PCDS foi normalizado pela ISO como a ISO 59040:2025 [129], no âmbito do comité técnico ISO/TC 323 [137] dedicado à economia circular. Esta oficialização reforça a sua relevância e aplicabilidade a nível internacional, posicionando-o como ferramenta-chave para alinhar os objetivos da política pública, digitalização industrial e economia circular.

De acordo com a definição oficial, o PCDS é uma declaração normalizada da circularidade de um produto, apresentando informações fiáveis que podem ser utilizadas por diferentes partes interessadas, desde fabricantes e distribuidores até recicladores, reguladores e consumidores. Ao contrário de metodologias mais complexas (como o LCA, ou o PEFCE), o PCDS oferece uma versão simplificada, padronizada e digitalmente processável, permitindo que dados essenciais sejam partilhados de forma interoperável sem comprometer informações estratégicas ou confidenciais.

A relevância do PCDS é clara quando comparada a lógica da EL, em que a informação sobre a composição e o ciclo de vida dos produtos é frequentemente fragmentada, confi-

dencial e não normalizada, resultando em perdas significativas de dados (figura 2.6). Isso limita a rastreabilidade e inviabiliza práticas de reutilização ou reciclagem eficientes. Em contrapartida, o PCDS assegura um fluxo de dados transparente e padronizado ao longo da cadeia de valor.

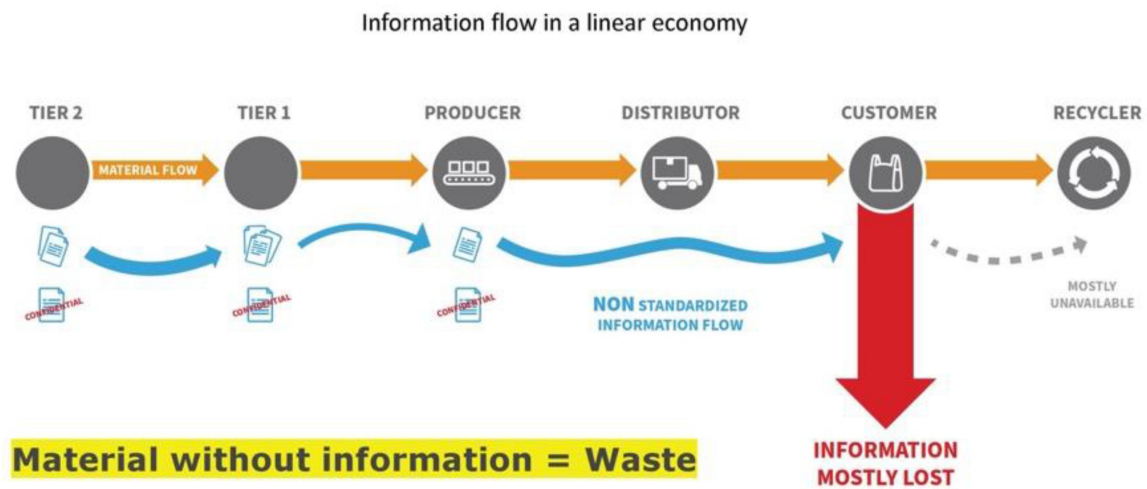


Figura 2.6: Fluxo de informação na Economia Linear.  
[135]

Mais uma vez, é possível observar, na figura 2.6, que é no Consumidor que a maior parte da informação é perdida, o que faz com que a rastreabilidade e o ciclo de vida se tornem desconhecido. De forma a melhorar a eficiência e segurança dos dados do produto ao longo da cadeia de valor, o PCDS resolve esse problema, providenciando informação e uma estrutura standardizada.

O PCDS [75] organiza os dados em cinco categorias principais, que abrangem diferentes aspectos essenciais para a gestão da informação circular do produto. Estas categoriais são:

- **Identificação do produto e da empresa**, esta secção fornece promenores sobre a forma como o produto e o seu local de produção devem ser identificados, especificando também a forma como o nome e as informações de contacto do fabricante do produto devem ser incluídos no PCDS;
- **Composição** dos constituintes/componentes do produto, esta parte descreve pormenorizadamente a composição do produto, incluindo as substâncias químicas, o conteúdo reciclado, os seus contaminantes e os materiais renováveis. Deve também conter informações sobre os possíveis perigos destas substâncias químicas perigosas. Os fabricantes devem guardar documentação que descreva a composição do produto e os perigos relacionados para que outros a possam verificar;
- **Design for Better Use**, esta secção descreve a facilidade de manutenção e de pequenas reparações para conservar, durante o maior tempo possível, o estado original de um produto, incluindo por exemplo, limpeza, lubrificação, revestimento protetor, ajustes, substituição de peças gastas e pequenas reparações;
- **Design for Reuse**, esta secção contém informação sobre a forma de gerir um produto para apoiar eficazmente os ciclos dos recursos, por exemplo, se o produto foi concebido para ser renovado ou refabricado;

- **Design for Disassembly**, esta secção final descreve, em pormenor, as informações que um produto deve ter para ser desmontado.

Um dos princípios centrais do PCDS é que cada agente da cadeia de valor é responsável por criar ou atualizar o documento quando o produto é modificado ou integrado noutro. Assim, o *Tier 1*, *Tier 2*, fabricantes, distribuidores e até os *remanufacturers* geram novos PCDS sempre que necessário, assegurando que a informação acompanha o fluxo do material (figura 2.7).

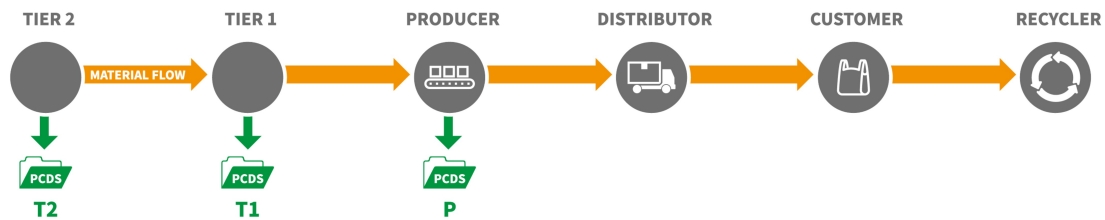


Figura 2.7: Agentes que criam o PCDS.  
[135]

A utilização do PCDS não se limita aos fabricantes: todos os agentes envolvidos em cadeias circulares (distribuidores, recicladores, gestores de resíduos, entre outros) podem beneficiar da informação nela contida. A figura 2.8 evidencia esta lógica de partilha, destacando a troca de dados estruturados de circularidade entre diferentes *stakeholders*.

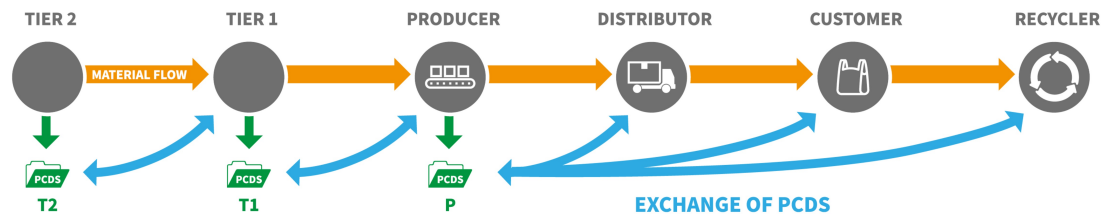


Figura 2.8: Agentes que usam o PCDS.  
[135]

Entre os principais benefícios do PCDS, destacam-se: a criação de uma linguagem comum para descrever características de circularidade; a comparabilidade entre produtos de diferentes fabricantes/setores; a redução de custos com relatórios de sustentabilidade; e o apoio ao ecodesign e a novos modelos de negócio circulares.

Contudo, o PCDS também enfrenta alguns desafios. A sua implementação prática depende fortemente da qualidade e disponibilidade dos dados fornecidos pelos fabricantes, o que pode gerar inconsistência e limitar a comparabilidade entre produtos. Além disso, será essencial garantir a sua integração com o DPP, de modo a evitar redundâncias e sobreposições, assegurando que ambos funcionam como instrumentos complementares e não concorrentes. Por fim, a adoção generalizada do PCDS exigirá ainda uma abordagem

equilibrada à confidencialidade e proteção da propriedade intelectual, de forma a garantir a confiança e o compromisso da indústria.

Assim, o PCDS (agora ISO 59040:2025 [129]) representa uma peça essencial da infraestrutura de dados da economia circular, funcionando como ponte entre normas internacionais, metodologias ambientais e frameworks digitais, e consolidando-se como um instrumento fundamental para a transição de uma EL para uma EC.

## 2.3 Artefactos digitais de apoio à implementação do AAS no contexto da Circularidade

A implementação prática do AAS e de *frameworks* digitais relacionadas tem sido acompanhada pelo desenvolvimento de um conjunto de ferramentas de software e iniciativas colaborativas que visam facilitar a criação, gestão e partilha de dados normalizados. Estas soluções podem ser agrupadas em dois grandes blocos: ferramentas informáticas, que oferecem implementações concretas do AAS, e projetos e iniciativas que exploram a aplicação do conceito em ecossistemas industriais mais amplos. Assim, são apresentados de seguida os principais resultados existentes até ao momento:

- ***Eclipse AASX Package Explorer and Server*** [138], consolidou-se como a ferramenta fundamental para a criação, edição e visualização de pacotes AASX. É amplamente utilizada em ambientes académicos e de investigação, servindo como ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de AAS e para a formação de novos utilizadores. A sua simplicidade de uso e a integração direta com o formato normalizado AASX tornam-se ideal para fases iniciais de modelação e validação, embora a ausência de funcionalidades avançadas de integração limite a sua aplicação em contextos industriais de maior complexidade.
- ***FA<sup>3</sup>ST Server (Fraunhofer AAS Service Tool)*** [139, 140], desenvolvido pelo instituto Fraunhofer IESE, oferece uma implementação modular e extensível do AAS, com enfoque em desempenho e escalabilidade. Surge como resultado direto de atividades no ecossistema alemão de Indústria 4.0, sendo utilizado em diversos projetos de demonstração e plataformas de teste, como o *Smart Factory KL*. Distingue-se pela sua leveza e adaptabilidade, o que o torna adequado para protótipos, simulações e casos de estudo académicos, embora a sua adoção a larga escala ainda dependa da maturidade da documentação e da comunidade de suporte.
- ***NOOVA Asset Administration Shell*** [141, 142, 143], uma iniciativa industrial que visa simplificar o acesso e a utilização do AAS, disponibilizando uma plataforma centrada na experiência do utilizador. A ferramenta procura reduzir as barreiras técnicas associadas à adoção do modelo, oferecendo um ambiente gráfico intuitivo e serviços de integração com outros sistemas industriais. O seu desenvolvimento reflete uma tendência crescente de transpor os conceitos de interoperabilidade do AAS para soluções práticas e acessíveis a pequenas e médias empresas.
- ***AAS Portal*** [144], desenvolvido no contexto de iniciativas colaborativas da IDTA, disponibiliza uma plataforma online para o registo, partilha e pesquisa de instâncias AAS. Este portal funciona como um repositório global e aberto, promovendo a interoperabilidade entre diferentes stakeholders e demonstrando o potencial do AAS

para a criação de ecossistemas digitais interligados. É frequentemente utilizado em projetos de demonstração e testes de integração entre diferentes implementações.

- ***Eclipse BaSysx*** [145], desenvolvido no âmbito da *Eclipse Foundation* e originário de projetos como o *BaSys 4.0* e *BaSys 4.2*, representa a implementação de referência mais madura e amplamente reconhecida do AAS. Disponibiliza um conjunto completo de serviços para instanciar, gerir e integrar AAS em contextos industriais, incluindo suporte a APIs REST, MQTT e OPC UA. A sua arquitetura modular e a forte comunidade de desenvolvimento fazem dele uma plataforma de eleição em projetos-piloto de Indústria 4.0 e iniciativas de digitalização de fábricas, sendo considerado um dos exemplos mais concretos da operacionalização do conceito AAS em ambiente real.

De forma crítica, observa-se que a maior parte destas ferramentas e iniciativas ainda enfrentam desafios práticos, como a fragmentação de funcionalidades, a ausência de integração direta com sistemas industriais ou a falta de maturidade para ambientes industriais reais. Enquanto algumas plataformas oferecem interfaces acessíveis mas pouca robustas, outras possuem maior robustez técnica, mas carecem de simplicidade de utilização ou de documentação adequada. Assim, embora todas desempenhem um papel importante na evolução do ecossistema AAS, é evidente que o nível de maturidade e aplicabilidade prática varia significativamente entre as soluções disponíveis.

## 2.4 Ecossistema para partilha de dados

A transição para uma economia circular não depende apenas da existência de metodologias científicas de avaliação (como o LCA ou o PEFRCR) ou de normas de *reporting* e interoperabilidade (como AAS, o DPP ou o PCDS). Para que estes instrumentos tenham impacto real, é necessário que funcionem dentro de ecossistemas digitais colaborativos, capazes de assegurar a partilha segura, confiável e interoperável de dados entre empresas, setores e regiões. É neste contexto que surgem os chamados Data Spaces, enquanto arquitetura padronizada que fornece tanto a infraestrutura técnica como os mecanismos de governança de dados necessários para promover a troca de informação sem comprometer a soberania dos dados das organizações [146, 76, 147].

Na prática, estes ecossistemas permitem que dados de circularidade, estruturados através de normas internacionais ou frameworks digitais, sejam integrados e disponibilizados ao longo da cadeia de valor. Por exemplo, um PCDS pode ser encapsulado num AAS e disponibilizado através de um Data Space industrial, assegurando que fabricantes, fornecedores, recicladores e reguladores acedem a uma versão fiável e consistente da informação. Do mesmo modo, o DPP, ao se tornar obrigatório em setores estratégicos como têxtil, eletrónica ou baterias, será fortemente dependente da existência de infraestruturas interoperáveis para assegurar que os dados acompanham efetivamente os produtos ao longo do seu ciclo de vida [148, 149].

Os Data Spaces não se limitam a plataformas técnicas: representam verdadeiras infraestruturas de confiança, onde mecanismos de identidade digital, contratos inteligentes e regras de acesso garantem que os participantes mantêm controlo sobre os seus dados enquanto beneficiam de maior transparência e colaboração. Neste sentido, a UE tem vindo a impulsionar iniciativas como o Gaia-X e, em particular, a criação de Data Spaces setoriais (Catena-X para a indústria automóvel, Manufacturing-X para a indústria de produção,

entre outros), que já exploram aplicações diretas para a circularidade e rastreabilidade de materiais [150, 151].

Do ponto de vista técnico, os Data Spaces distinguem-se pela sua flexibilidade: ao contrário de sistemas de integração centralizada, não exigem um *schema* de base de dados comum. Isto significa que diferentes organizações podem disponibilizar dados em formatos distintos, que são depois harmonizados através de conectores e contratos semânticos. Essa característica torna os Data Spaces particularmente adequados para a EC, onde coexistem dados de origens muito diversas (materiais, processos, certificações, indicadores ambientais) e onde a portabilidade e interoperabilidade são requisitos críticos [146, 76].

A arquitetura dos Data Spaces assenta geralmente em três papéis fundamentais; o Data Provider, responsável por disponibilizar dados no ecossistema; o Data Consumer, que acede e utiliza esses dados; e o Federator, que fornece serviços intermediários de confiança, como a catalogação, autenticação e corratagem de fontes de dados. A figura 2.9 ilustra estes papéis e as relações estabelecidas entre eles, destacando como o *federador* assegura a confiança e a soberania de dados dentro do ecossistema.

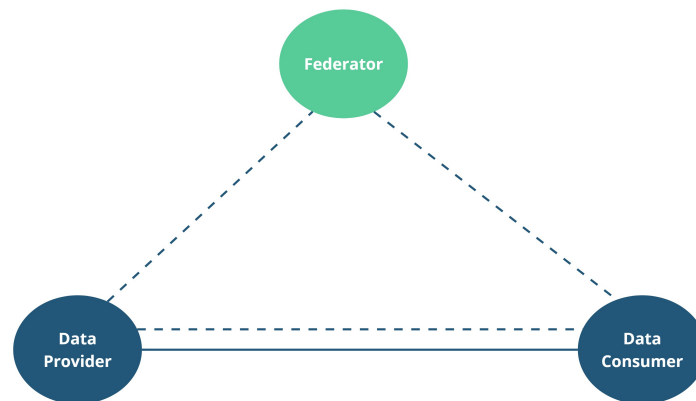


Figura 2.9: Interação entre Provider, Consumer e Federator nos *Data Spaces*

Cada entidade tem responsabilidades específicas dentro do processo de partilha de dados, O *Data Provider* é responsável por publicar e gerir as fontes de dados, bem como por autorizar e definir restrições ao seu uso. O *Data Consumer* tem o papel de procurar, requisitar e utilizar os dados disponibilizados. Já o *Federator* fornece os serviços de confiança e coordenação, assegurando que os registos de participantes e as trocas de dados são auditáveis e estão em conformidade com os princípios de soberania e segurança. A Tabela 2.2 resume estas funções, com R a indicar responsabilidade principal e S a indicar função de suporte.

Desta forma, os ecossistemas para a partilha de dados circulares constituem a camada operacional que liga a normalização técnica à implementação prática, criando o ambiente necessário para que a informação sobre circularidade possa fluir de forma confiável, transparente e escalável.

	Data provider	Data consumer	Federator
Publish data source	R		S
Search for data source		R	S
Register participant	R	R	S
Identify participant	R	R	S
Authorize participant	R	R	
Request data exchange	S	R	
Perform data exchange	R	S	
Log data exchange	S	S	R
Constrain data use	R		
Perform data use		R	

Tabela 2.2: Funções das diferentes entidades

# Capítulo 3

## Modelos de Gestão de Informação Circular

A transição para modelos de negócio mais circular requer a existência de mecanismos eficazes para recolher, estruturar e partilhar informação ao longo de toda a cadeia de valor. A complexidade inerente a este processo torna essencial o desenvolvimento de modelos de dados e de uma arquitetura que permita integrar diferentes fontes de informação, assegurando a interoperabilidade, transparência e a rastreabilidade necessárias para suportar decisões mais sustentáveis.

Neste capítulo é apresentada uma proposta de arquitetura e respetivos modelos de informação criados para gerir dados associados ao ciclo de vida dos produtos, com foco no suporte à operacionalização do DPP. A abordagem adotada tem por base o conceito de AAS, explorando a criação de submodelos específicos que reúnem informações relevantes no âmbito da circularidade, tais como indicadores e métricas de circularidade, dados de produção, LCI, identificação do produto, entre outros.

### 3.1 Abordagem

A gestão da informação ao longo do ciclo de vida do produto representa um dos principais desafios para a implementação de modelos de negócios mais circulares. Os dados encontram-se dispersos na cadeia de valor, registados em formatos heterogéneos e muitas vezes inacessíveis de forma estruturada e útil. Esta fragmentação compromete a interoperabilidade e limita a capacidade de reutilizar, reciclar ou remanufacturar (conforme proposto no Framework dos R's) de forma eficiente. Além disso, existe interesse da UE em recolher esses dados e organizá-los numa estrutura homogénea e posteriormente ficarem disponibilizados numa rede para que os diversos agentes da cadeia de valor possam interagir e agregar mais valor para esta estrutura [57].

Para responder a este desafio, este trabalho propõe um modelo de informação normalizado e standardizado, capaz de integrar e estruturar informação proveniente de diversas fontes. O AAS é o núcleo desta abordagem, uma vez que oferece uma estrutura padronizada e amplamente expansível devido à sua natureza modular e à capacidade de definir submodelos para diferentes aspetos de um ativo físico e/ou virtual. Permite, ainda, a criação de submodelos que encapsulam diferentes domínios de informação. Desta forma, é possível

construir uma representação digital completa de um produto, ao longo do seu ciclo de vida, acompanhando o processo desde a matéria-prima até o mesmo ser descartado no fim da vida [105].

A proposta resultante deste trabalho segue uma lógica modular: cada SM é concebido para armazenar e disponibilizar um conjunto específico de dados relevantes ao nível da circularidade, tendo por base estruturas de informação standardizadas e tecnologias de suporte que promovam a interoperabilidade entre sistemas e o uso de diversas fontes de informação, como é o caso do PCDS, métricas de circularidade, informação do produto e da sua produção, entre outros conjuntos de informação indispensáveis para a circularidade [75].

Esta modularidade facilita a adaptação a diferentes contextos industriais e garante que os dados possam ser reutilizados em diferentes aplicações, desde a avaliação de circularidade até ao cumprimento de requisitos regulatórios, como é o caso do DPP.

Esta proposta, devido à sua capacidade de se estender facilmente independentemente do contexto, uma vez que o AAS facilita a agregação de futuros vocabulários à sua estrutura, reduz significativamente o esforço necessário para recolha de informação estruturada relativamente ao produto e processo produtivo.

Respeita ainda alguns aspetos que consideramos fundamentais: 1. a nível da interoperabilidade, procura assegurar a utilização de standards e vocabulários comuns; 2. a nível da flexibilidade, permite acomodar diferentes fluxos de informação e necessidades setoriais; e a nível da disponibilidade dos dados na rede, promove o uso de DataSpaces como meio para viabilizar a partilhar de forma confiável e descentralizada dos dados do DPP, garantindo que os diferentes intervenientes da cadeia de valor possam colaborar de forma transparente, preservando a confiança, a governança e o controlo sobre quem acede e utiliza a informação.

Assim, com estes princípios e objetivos, o modelo e a arquitetura apresentados nos pontos seguintes procuram demonstrar como a integração entre modelos semânticos, submodelos AAS e mecanismos de partilha de dados pode efetivamente suportar a gestão da informação circular no âmbito da implementação dos DPP.

## **3.2 Proposta de modelo para partilha de informação**

A gestão eficiente da informação circular depende da existência de um modelo que permita estruturar, relacionar e partilhar dados de forma interoperável entre diferentes atores da cadeia de valor. Neste sentido, e tal como já foi referido anteriormente, a solução apresentada nesta dissertação baseia-se na criação de um modelo de informação estruturado usando o AAS como base, que permite a representação de produtos e respetivos atributos ao longo de todo o seu ciclo de vida. Este modelo garante a continuidade e a rastreabilidade da informação, desde as fases de aquisição da matéria-prima, cobrindo também a produção e o uso, manutenção e fim de vida do produto. Para isso recorre a um conjunto de SMs especializados, cada um responsável por armazenar dados relevantes para um domínio específico do produto, desde cálculos de métricas que promovam a circularidade até ao LCI.

Para suportar a construção da estrutura de informação, foram identificadas questões de competência que refletem as necessidades existentes ao nível da rastreabilidade e trans-

---

N. Questões de competência

---

- 1 Que processos o meu produto sofreu ao longo do seu ciclo de vida?
- 2 Quais foram as matérias-primas utilizadas na fabricação deste produto?
- 3 Qual é a origem das matérias-primas?
- 4 O produto contém componentes reciclados?
- 5 Como é que o produto pode ser desmontado para reciclagem ou reutilização?
- 6 Qual é a pegada carbónica do meu produto?
- 7 Quanta energia reciclada foi utilizada?
- 8 Quem foi a empresa que produziu o meu produto?
- 9 Que materiais químicos foram utilizados?
- 10 Quais os certificados de sustentabilidade que o produto e os seus componentes possuem?

Tabela 3.1: Questões de Competência no âmbito da circularidade

parência ao longo da cadeia de valor. Estas questões funcionam como requisitos funcionais [72, 92] para os submodelos do AAS, garantindo que a informação disponibilizada é efetivamente útil para apoiar a circularidade. Estas perguntas mostram a diversidade de dimensões a considerar, desde a composição de materiais até a pegada ambiental e certificações, e servem de base para a definição dos submodelos.

O modelo está organizado em duas categorias: informação passiva e informação ativa. A informação passiva refere-se a dados estáticos que permanecem inalterados ao longo do ciclo de vida (ex.: origem das matérias-primas, composição química, entre outros). E a informação ativa diz respeito aos dados dinâmicos que podem ser atualizados em tempo real ou momentos específicos (por exemplo: métricas de circularidade calculadas durante o ciclo de vida do produto). Esta distinção é essencial para garantir que o fluxo de informação acompanhe a evolução do produto.

De modo a assegurar o adequado fluxo de informação, o modelo apresenta como principais objetivos: 1. centralizar e estruturar informação, sobre os ativos de maneira acessível e interoperável, facilitando a troca de dados entre sistemas; 2. promover a transparência no fluxo de materiais e recursos, permitindo que todos os *stakeholders* compreendam, acompanhem e participem no impacto ambiental e económico das suas decisões; 3. facilitar a tomada de decisão baseada em dados, através da integração de métricas e indicadores de circularidade; e, assegurar a adaptabilidade do modelo a diferentes contextos industriais e escalas de aplicação.

Desta forma, o modelo proposto não se limita a descrever os produtos de forma isolada, mas procura criar um ecossistema de dados interligados, no qual cada elemento pode ser consultado, atualizado e reutilizado ao longo do tempo. Esta visão interligada é essencial para apoiar a tomada de decisão em processos de design, logística, remanufatura, reciclagem, entre outros, contribuindo para aumentar a circularidade e reduzir o impacto ambiental.

Ao longo desta secção, é apresentada toda a lógica que suporta a estruturação do modelo, evidenciando como a sua estrutura responde às necessidades circulares, de interoperabilidade e rastreabilidade.

### 3.2.1 *Asset Administration Shell Header*

Como dito anteriormente, o AAS constitui o elemento central da solução proposta. Trata-se de uma especificação desenvolvida no âmbito da I4.0, e agora muito utilizada para a transição para a I5.0, que define uma estrutura digital padronizada para representar de forma completa um ativo físico ou virtual, agregando todos os dados, metadados e descrições relevantes que permitem caracterizar o produto ao longo do seu ciclo de vida. A principal vantagem do AAS reside na sua capacidade de normalização e modularidade. Por um lado, fornece um formato comum que facilita a interoperabilidade entre diferentes sistemas e organizações; por outro, permite organizar a informação em SMs, que encapsulam domínios de dados específicos, como por exemplo, dados relativos aos consumos utilizados na produção de um produto. Esta estrutura modular assegura que cada SM pode ser reutilizado em diferentes contextos sem comprometer a coerência global do modelo. Não só os SMs podem ser reutilizados, mas também as suas propriedades podem ser referenciadas parcialmente ou totalmente em outros submodelos desde que estes estejam disponibilizados na mesma rede.

No contexto da EC, o AAS assume um papel estratégico ao permitir integrar e disponibilizar dados críticos sobre o produto, abrangendo desde a sua composição até aos processos associados ao seu ciclo de vida. Assim, tornou-se essencial categorizar os conjuntos de dados e respetivos domínios de modo a garantir que estes se encontrem estruturados de forma interoperável entre diferentes sistemas, permitindo uma análise e interpretação facilitadas tanto por pessoas como por máquinas. A figura 3.1 e a figura 3.2 ilustram os SMs que compõem a base do DPP e a forma como estes se relacionam semanticamente com o AAS.

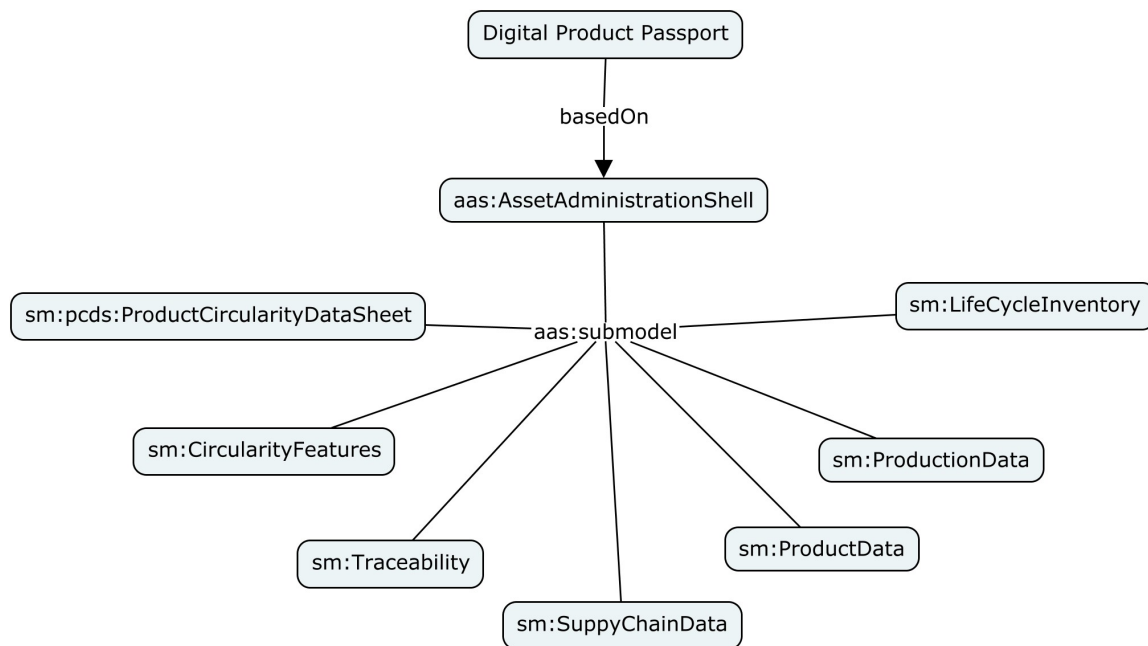


Figura 3.1: Mapa conceptual do DPP estruturado em AAS e os seus submodelos

O PCDS foi o ponto de partida para a definição do modelo proposto neste trabalho, uma vez que é um framework descritivo que define dados relevantes que devem ser considerados quando queremos abordar a circularidade. Assim, nesta perspectiva, foi criado um submodelo dedicado ao PCDS, *Circularity Features*, *Traceability*, *SupplyChainData*, *ProductData* e LCI. Cada um destes SMs será abordado detalhadamente neste documento.

```
AAS DPP
|-- SM ProductCircularityDataSheet
|-- SM CircularityFeatures
|-- SM Traceability
|-- SM SupplyChainData
|-- SM ProductData
|-- SM ProductionData
\-- SM LifeCycleInventory
```

Figura 3.2: Estrutura do AAS para o DPP

A construção do mapa conceptual teve como objetivo orientar a organização semântica da estrutura de dados proposta, que serve de base à criação do DPP. Para atingir esse propósito, foi conduzido um estudo semântico aprofundado do AAS, de modo a compreender como os seus elementos poderiam ser representados e interligados. Com base nesse estudo, o modelo foi formalmente descrito numa linguagem de modelação, permitindo automatizar o processo de criação e instânciação do AAS.

### 3.2.2 Submodelo *Product Circularity Data Sheet* (PCDS)

O PCDS é uma iniciativa desenvolvida para apoiar a recolha e partilha de dados relacionados com a circularidade dos produtos, garantindo maior transparência ao longo da cadeia de valor entre os agentes que nela participam e contribuem. Trata-se de um formato standardizado de comunicação que visa facilitar a partilha de informação entre fabricantes, fornecedores, clientes e entidades reguladoras, reduzindo a fragmentação e a inconsistência dos dados que frequentemente dificultam a avaliação da circularidade.

No contexto deste trabalho, o PCDS é modelado como um SM do AAS, de modo a assegurar a integração na arquitetura digital do produto. Este SM organiza os dados em torno de diferentes dimensões relevantes para a circularidade, tais como: identificação do produto (*ProductIdentifier*), identificação da empresa (*CompanyIdentification*), composição do produto (*Composition*), design para a reutilização (*DesignReuse*), design para a desmontagem (*DesignForDisassembly*) e design para o melhor uso (*DesignForBetterUse*). Estes são os pilares que constituem o PCDS, e foi a partir daí que a solução proposta evoluiu integrando, cada vez, mais vocabulários como mostra a figura 3.3.

Como mostra a figura 3.3, os pilares do PCDS relacionam-se com a semântica do AAS como sendo as SMC do PCDS (*aas:SubmodelElementCollection*).

Na identificação do produto deve constar informação relativa ao nome do produto, à marca do produto, entre outras características. De forma a que esta coleção fosse descrita o mais completa possível foi usado *idta:DigitalNamesplate*, que já é uma estrutura de dados ao qual descreve a identificação do produto. Desta forma, devido à fácil integração de vocabulários no AAS, não só estamos a promover a transparência e a interoperabilidade circular, como também a dar robustez à estrutura que é pretendido criar.

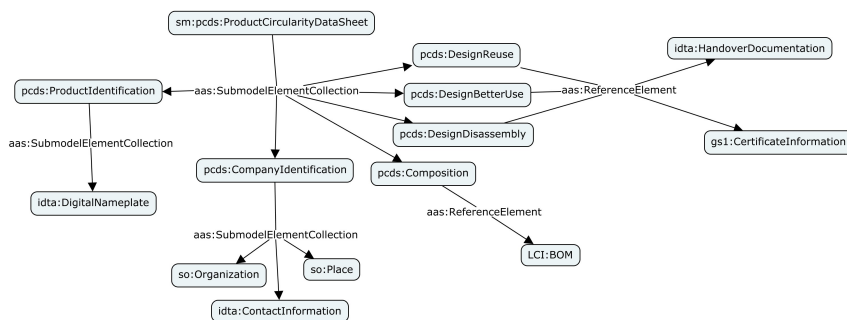


Figura 3.3: Mapa conceitual do submodelo do PCDS e das suas secções.

Como apresentado na figura 3.3, os pilares do PCDS correspondem, na semântica do AAS, a diferentes SMC (*aas:SubmodelElementCollection*) que estruturam a informação de forma modular e organizada. No caso específico do produto, esta secção reúne dados essenciais como o nome comercial, a marca, o número de modelo e outros identificadores relevantes. Para garantir uma representação mais completa e alinhada com práticas normalizadas, foi integrado vocabulários.

A figura 3.4 auxilia o desenho e estruturação do SM, fazendo com que a margem de erro para a sua estruturação seja reduzida. Nela conseguimos ver como está relacionado o submodelo com SMC e as Prop e os Ref. Os elementos de referência são aliados à interoperabilidade, visto que nos facilita referenciar outros conjuntos de dados, já existentes na rede, no SM em que pretendemos adicionar, aglomerando e reutilizando informação já existente, reduzindo a duplicação de dados.

O submodelo do PCDS atua como o bloco central de informação. É a partir dele que é possível uma estruturação rápida e robusta para avaliar o LCA do produto, assegurando que os dados fundamentais sobre a circularidade não apenas são recolhidos, mas também integrados de forma consistente no ecossistema digital dos produtos.

### 3.2.3 Submodelo *Circularity Features*

O SM *Circularity Features* foi concebido para representar, de forma estruturada, os principais indicadores de circularidade associados a materiais e componentes de um produto. Enquanto o PCDS tem uma função mais ampla de *reporting*, este SM aprofunda os aspetos quantitativos e qualificativos relacionados com a circularidade, permitindo análises detalhadas e comparações consistentes entre diferentes produtos ou versões do produto.

Entre os elementos chaves que permitem medir a circularidade, destacam-se: 1. o MCI, métrica que avalia a circularidade de um material considerando a sua origem (virgem ou reciclada) reutilização potencial e destino no fim de vida; 2. percentagem de material reciclado, incorporado no produto, discriminando a origem (pré-consumo e pós-consumo); energia associada à produção e transformação dos materiais, permitindo relacionar a circularidade com impacto ambiental direto; potencial de reutilização ou remanufatura, considerando a integridade do material após o uso; e, pontos críticos a nível de escassez de material, relevante para avaliar riscos de aprovisionamento e dependências de recursos. É com base neste submodelo que a tomada de decisão poderá ser apoiada, dando informação relevante para a transição para um ecossistema mais sustentável.

A modelação deste submodelo segue uma estrutura onde cada material ou fluxo é descrito

```

SM ProductCircularityDataSheet
|-- SMC ProductionIdentification
| |-- Prop A
| |-- SMC DigitalNameplate
| | |-- Prop B
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop C
| \-- Prop ...
|-- SMC CompanyIdentifier
| |-- SMC Organization
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
| |-- ContactInformation
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
| \-- Place
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
|-- SMC CompanyIdentifier
| |-- Ref BOM_X
| \-- Ref BOM_Y
|-- SMC DesignReuse
| |-- Ref HandoverDocumentation
| \-- Ref CertificationInformation
|-- SMC DesignDisassembly
| |-- Ref HandoverDocumentation
| \-- Ref CertificationInformation
\-- SM DesignBetterUse
    |-- Ref HandoverDocumentation
    \-- Ref CertificationInformation

```

Figura 3.4: Estrutura do submodelo PCDS.

como uma entidade autónoma, ligada ao produto por identificadores únicos. Isto permite realizar cálculos compostos, como é o caso do MCI parcial de cada fluxo e depois o MCI global do produto, obtido a partir de combinação ponderada dos valores individuais de cada material. A figura 3.5 demonstra conceptualmente este SM.

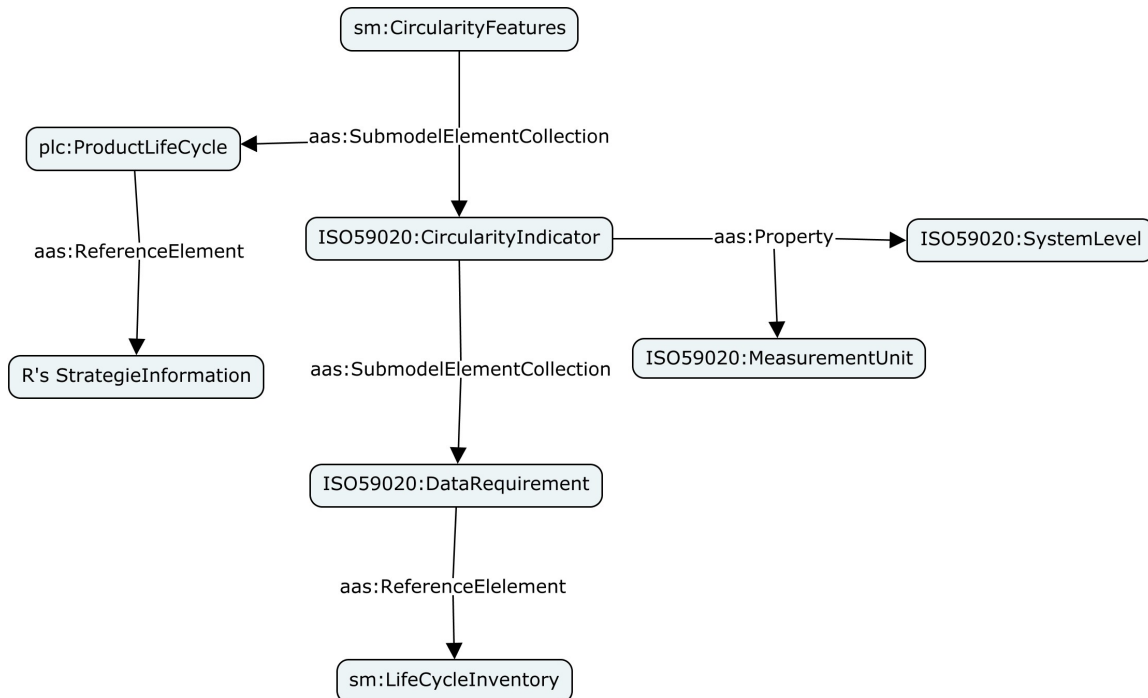


Figura 3.5: Mapa conceptual do submodel *Circulariry Features*.

A figura 3.5 mostra o mapa conceptual criado para dar resposta às necessidades da circularidade. A figura 3.6, apresentada abaixo, mostra de forma visual a estrutura desse modelo de acordo com o AAS. Este SM será constituído por duas coleções de dados, uma para o ciclo de vida do produto e outra para os indicadores da circularidade. A coleção de dados que se centra nos cálculos das métricas tem na sua estrutura propriedades que são descritas na ISO 59020[128]. Esta norma estabelece que, para garantir a consistência e a comparabilidade dos indicadores de circularidade, é necessário especificar a unidade de medida utilizada (por exemplo, quilogramas, gramas, watts, entre outros) e o nível do sistema ao qual a métrica se aplica (podendo este ser regional, interorganizacional, organizacional ou ao nível do produto). A definição explícita destes parâmetros é fundamental, pois assegura a coerência na interpretação dos resultados e permite que diferentes organizações e ferramentas analíticas possam comparar e integrar dados de forma harmonizada dentro da cadeia de valor.

Em termos práticos, este submodelo constitui um instrumento de apoio à decisão, fornecendo dados essenciais para: 1. design sustentável, ao permitir selecionar materiais com maior potencial de reutilização, reciclabilidade e incorporação de conteúdo reciclado, refletindo um desempenho mais elevado em termos de circularidade; 2. avaliação comparativa de produtos, apoiando compras públicas e privadas mais responsáveis e conscientes; 3. a elaboração de relatórios de regulação e de sustentabilidade, alinhados com exigências da União Europeia e padrões internacionais de reporte ambiental e social. Estes relatórios dizem respeito à comunicação do desempenho ambiental e de circularidade dos produtos, que é cada vez mais exigida por normas e políticas europeias para promover a trans-

```

SM CircularityFeatures
|-- SMC Circularity Indicators
| |-- SMC Indicator_X
| | |-- Prop X
| | |-- Prop ...
| | \-- SMC Data Requirements
| | |-- Ref Data_X
| | |-- Ref Data_Y
| | \-- Ref Data_Z
| |-- SMC Indicator ...
| | |-- Prop a
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop b
| \-- SMC Indicator_Z
| |-- Prop ...
| \-- Prop d
\-- SMC ProductLifeCycle

```

Figura 3.6: Estrutura do submodelo *Circularity Features*.

parência e a responsabilidade das empresas [152, 153].

Assim, o SM *Circularity Features* complementa o PCDS ao oferecer uma camada adicional de quantificação e análise, permitindo que a circularidade dos materiais seja medida, monitorizada e melhorada de forma sistemática.

### 3.2.4 Submodelo *Supply Chain Data*

Durante o ciclo de vida do produto, este passa por várias etapas onde vários agentes da cadeia de valor assumem alguma intervenção no mesmo. Assim, este SM tem como principal objetivo promover a transparência para todos os agentes da cadeia de valor. Neste contexto, é importante identificar os agentes que nela intervêm e com que responsabilidade.

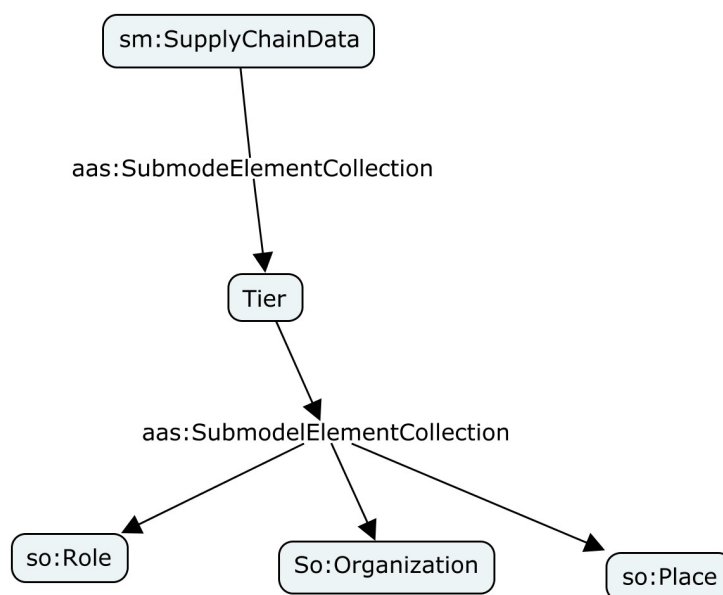


Figura 3.7: Mapa conceitual do submodel *Supply Chain Data*.

Na figura 3.7 e na figura 3.8 mostra como foi estruturada sobre cada interveniente na cadeia de valor. Deste modo o SMC é relevante ao garantir para cada agente: um *role*, onde nele está presente de que forma o agente participa na cadeia de valor, sendo um produtor, manufactura, distribuidor, retailer, cliente, recycler); a identificação da entidade seja ela pessoa ou organização; e, o local. Estruturando um SM desta forma, torna-se explícito o percurso do produto ao longo do seu ciclo de vida.

```

SM SupplyChainData
|-- SMC Tier_1
| |-- SMC Role
| | |-- Prop X
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop z
| |-- SMC Organization
| | |-- Prop a
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop b
| \-- SMC Place
| |-- Prop ...
| \-- Prop d
|-- SMC Tier_2
|-- SMC ...
\-- SMC Tier_X

```

Figura 3.8: Estrutura do submodelo *Supply Chain Data*.

### 3.2.5 Submodelo *Traceability*

Um dos principais desafios identificados desde a I4.0 é a perda parcial ou total de informação sobre o produto à medida que este avança na cadeia de valor. Essa perda tende a ocorrer com maior frequência nas fases de transporte, consumo e reciclagem, devido à fragmentação dos sistemas e à falta de integração entre os intervenientes. De acordo com *Singh, Syed e Sinha* [154], as perdas de informação e coordenação são particularmente evidentes nas etapas intermédias e finais da cadeia de valor, como o transporte, a distribuição e as operações de retorno, refletindo a dificuldade em manter uma rastreabilidade contínua ao longo do ciclo de vida do produto.

De forma a reduzir essa perda, ter um SM dedicado à rastreabilidade é fundamental. A ideia deste SM é que seja um SM dedicado à organização e interligação de informação de uma forma rápida, precisa e concisa. Desta forma, este SM irá referenciar outras estruturas de informação que já estão disponíveis na rede: o SM da *SupplyChainData*, *CircularityFeatures* e o SMC do *Bill of Materials* (BOM) que pertence ao LCI, como demonstra a figura 3.9.

A figura 3.10 demonstra o desenho conceptual do SM dentro do AAS. Semânticamente estão relacionados com o SM *Traceability* como sendo Ref.

O SM de *Traceability* assegura a ligação entre diferentes níveis de informação, estabelecendo referências cruzadas entre *SupplyChainData*, *CircularityFeatures* e BOM. Para além disso, cria associações diretas com SMs de *CircularityFeatures*, que contêm os indicadores e métricas derivados da informação primária.

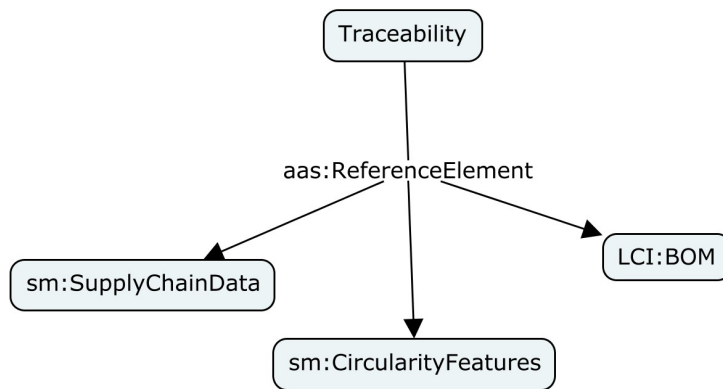


Figura 3.9: Mapa conceitual do submodel *Traceability*.

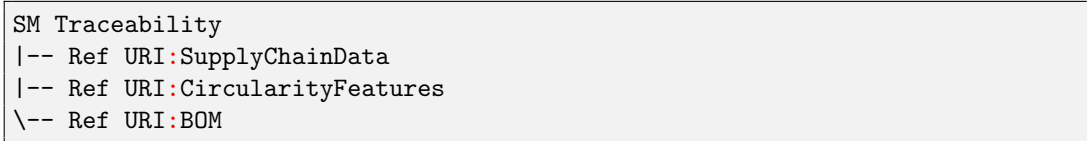


Figura 3.10: Estrutura do submodelo *Traceability*.

### 3.2.6 Submodelo *Product Data*

Para que o cliente, na hora de comprar, faça uma compra informada e com consciência, é necessário saber a real composição do produto e dos seus componentes, ver graus de toxicidade e quais os materiais de reciclagem que constituem o produto. Neste sentido, e promovendo também os pilares do PCDS, foi criado o SM *ProductData*.

Este SM, como demonstra a figura 3.11, terá duas coleções, uma dedicada à sua composição e outra dedicada à composição química, cuja função será descrever os materiais referenciados no BOM (abordado mais tarde).

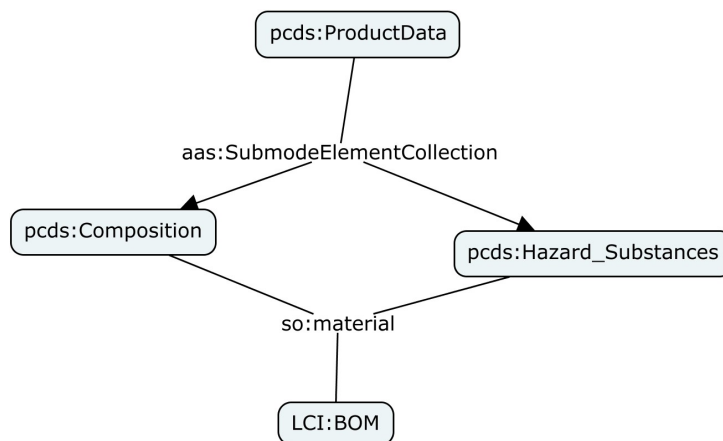


Figura 3.11: Mapa conceitual do Submodelo *Product Data*

Na figura 3.12, conseguimos perceber como será o design deste SM. Este SM servirá como uma lista simplificada onde será possível ver a constituição total do produto. Como faz referência a dados já existentes dentro da rede, depois será possível ver em detalhe mais informações sobre o material em específico.

```

SM ProductData
|-- SMC Composition
| |-- Ref BOM_X
| |-- Ref BOM ...
| \-- Ref BOM Y
\-- SMC Hazard_Substances
    |-- Ref BOM ...
    |-- Ref BOM ...
    \-- Ref BOM ...

```

Figura 3.12: Estrutura do submodelo *Product Data*

### 3.2.7 Submodel *Production Data*

Ao abordar esta temática dos produtos, é essencial compreender que estes não surgem de forma espontânea. Cada produto resulta de um processo de produção cuidadosamente delineado, que envolve diversas etapas, desde a conceção inicial até à concretização final. Este percurso produtivo é determinante para garantir a qualidade, funcionalidade e adequação do produto às necessidades do mercado e dos consumidores.

De forma a promover a transparência dos dados ao nível do chão de fábrica e a garantir a conformidade com os *standards* de circularidade, isto é, normas e modelos de dados que apoiam a recolha, partilha e reutilização de informação ao longo do ciclo de vida do produto, torna-se essencial implementar um submodelo dedicado à produção. Este submodelo permite integrar e organizar dados operacionais de forma coerente, assegurando uma base sólida para análises e avaliações relacionadas com a eficiência e circularidade dos processos produtivos.

O SM *ProductionData* tem como finalidade representar os dados associados ao processo de produção de um produto, permitindo caracterizar as condições em que este foi concebido, fabricado e distribuído. A sua inclusão é fundamental para assegurar a rastreabilidade e a transparência ao longo da cadeia de valor, oferecendo uma visão estruturada sobre o processo produtivo, a localização e a entidade responsável por cada operação.

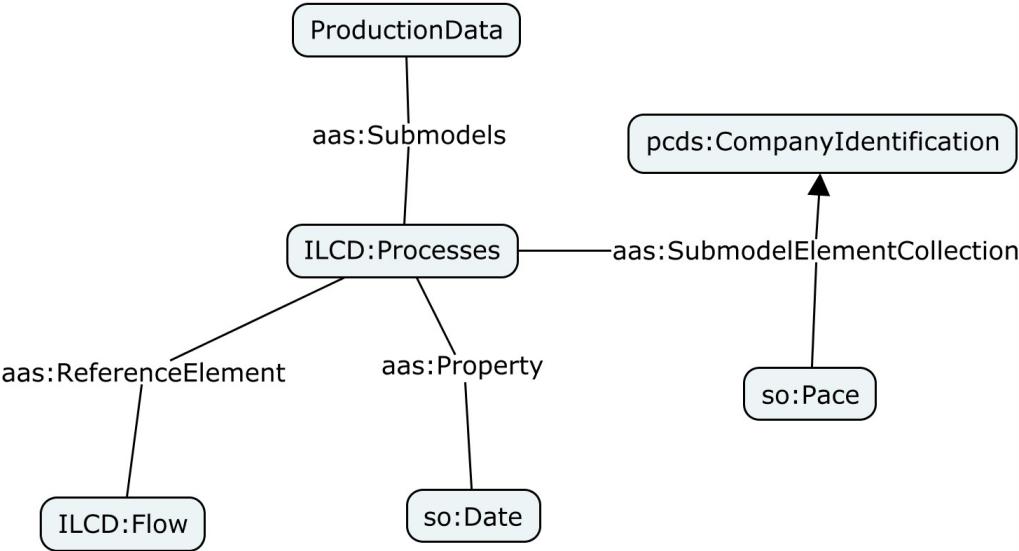


Figura 3.13: Mapa conceptual do submodelo *Production Data*

Como demonstra na figura 3.13, o nosso SM será uma coleção de processos, onde cada processo fará referências aos fluxos que constituem os processos, esses fluxos serão descritos no SM de LCI onde é referenciado.

Na figura 3.14 apresenta a estrutura do SM *ProductionData*, ilustrando a forma como os elementos e coleções estão organizados no modelo.

```

SM ProductionData
|-- SMC Process_X
| |-- Ref Flow_1
| |-- Prop Date
| |-- SMC Place ...
| | |-- Prop ...
| | ...
| | \-- Prop ...
| \-- SMC CompanyIdentification
| |-- Prop ...
| ...
| \-- Prop ....
...
...
...
\-- SMC Process ...
    |-- ....
    ...
    \-- ....

```

Figura 3.14: Estrutura do submodelo *Production Data*

### 3.2.8 Submodelo *Life Cycle Inventory (LCI)*

O modelo desenvolvido exigiu articulação entre diferentes SMs, cada um com uma função específica na representação do ciclo de vida do produto. O SM *ProductData* constitui base informativa, englobando dados gerais. O BOM, é aquele que escreve a composição estrutural do produto. Em complemento, o *ProductionData* introduz uma camada de meta-informação ao contextualizar os processos produtivos, indicando não apenas as operações realizadas, mas também o local de execução e determinadas fases da produção ou mesmo distinções geográficas relevantes (por exemplo, processos realizados em diferentes fábricas ou países).

Apesar dessa granularidade, a análise revelou a necessidade de introduzir o SM LCI, inspirado nos padrões da LCA. Este SM assume um papel central na descrição detalhada de processos, *flows* e constituição do produto. Os processos representam as operações, os fluxos correspondem às entradas e saídas dos materiais e consumo, e, por fim a constituição do produto, como o nome indica, define a especificidade da constituição do produto, desde percentagem de produto reciclado, entre outros.

Assim, como demonstra a figura 3.15, um processo pode ser entendido como uma operação que consome determinados *flows (inputs)* e gera outros (*outputs*). O LCI, ao detalhar esta dinâmica, oferece a profundidade necessária para representar casos complexos, como *remanufacturing*, em que é fundamental conhecer não apenas os materiais envolvidos, mas também a condição do produto, o histórico de utilização e as instruções de montagem,

desmontagem e reparabilidade (o modelo proposto já se encontra preparado para fornecer esta informação).

Como visto na figura 3.15, o LCI será o SM mais completo. Este terá coleções nomeadamente, o BOM, os Processos e os Fluxos. Na figura 3.16 é possível observar a estruturação do SM e como os vocabulários do AAS se interligam com o SM.

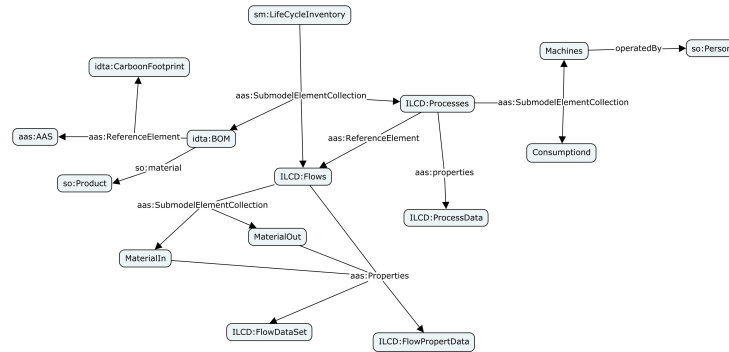


Figura 3.15: Mapa conceitual do submodelo *Life Cycle Inventory*

O BOM inclui propriedades relativas aos materiais que compõem o produto, baseadas em vocabulários já existentes e adequados à descrição de produtos, como o *so:Product*. Para complementar esta estrutura, é também reutilizado o submodelo *lida:CarbonFootprint*, responsável por organizar os dados necessários ao cálculo da pegada de carbono. Esta integração reforça a consistência semântica do modelo e permite que o inventário de ciclo de vida esteja alinhado com métricas ambientais relevantes.

Além disso, de forma a garantir a interoperabilidade do sistema dentro de uma rede de AAS, é fundamental estabelecer referências entre diferentes instâncias. Essas ligações permitem, por exemplo, identificar componentes e produtos que já integraram outros sistemas, promovendo a rastreabilidade e a circularidade da informação. Assim, cada AAS pode referenciar outros existentes na rede — como materiais reciclados ou componentes reutilizados — criando uma cadeia interligada de informação que assegura a continuidade dos dados ao longo de múltiplos ciclos de vida.

A coleção que descreve os *flows* especifica os materiais e recursos consumidos e produzidos em cada processo. Para estruturar essa informação de forma coerente, recorrem-se aos vocabulários do *ILCD*, que fornecem orientações sobre a representação dos fluxos e a sua relação com os processos. Desta forma, é possível modelar entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de forma padronizada, assegurando compatibilidade com modelos de avaliação do ciclo de vida.

Por sua vez, a coleção dedicada aos processos reúne todas as informações técnicas sobre as operações associadas ao produto. Para além das propriedades descritivas de cada processo, incluem-se os fluxos de materiais e energia consumidos, bem como indicadores de desempenho e consumo, como eletricidade, água, energia fóssil ou reciclável, e a distinção entre consumos previstos e reais. Do ponto de vista operacional, o submodelo contempla ainda as máquinas envolvidas e os respetivos operadores, permitindo associar cada processo a um contexto produtivo concreto.

Esta diferenciação entre os submodelos *ProductionData* e LCI estabelece uma hierarquia conceptual clara. Enquanto o primeiro fornece uma visão contextual e geográfica dos pro-

```

SM LifeCycleInventory
|-- SMC BOM
| |-- SMC CarbonFootprint
| | |-- Prop ...
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
| |-- Prop ...
| |-- Prop ...
| ...
| |-- Ref AAS_X
| |-- Ref AAS_...
| \-- Ref ...
|-- SMC Flows
| |-- SMC Material IN
| | |-- Prop ...
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
| |-- SMC Material OUT
| | |-- Prop ...
| | |-- Prop ...
| | \-- Prop ...
| |-- Prop ...
| ...
| \-- Prop ...
\-- SMC Processes
    |-- SMC Consumptions
    | |-- Prop ...
    | |-- Prop ...
    | \-- Prop ...
    \-- SMC Machines
        |-- SMC Machine_X
        | |-- Prop ...
        | |-- Prop ...
        | \-- SMC Operated By
        | |-- Prop ...
        | \-- Prop ...
        \-- SMC Machine ...

```

Figura 3.16: Estrutura do submodelo *Life Cycle Inventory*

cessos produtivos (por exemplo, a operação de extrusão do plástico realizada em Portugal ou em Espanha), o segundo detalha as operações técnicas e os fluxos específicos associados a cada processo. Esta organização é essencial para a interoperabilidade, uma vez que o DPP tende a disponibilizar apenas dados agregados e públicos, enquanto os dados detalhados do LCI podem ser partilhados de forma controlada através de *Data Spaces*.

A granularidade da informação refere-se ao nível de detalhe com que os dados são descritos e estruturados. No âmbito da EC, esta dimensão é particularmente relevante, pois diferentes *stakeholders* necessitam de diferentes níveis de informação. Por exemplo, para efeitos de conformidade, o DPP exige dados agregados, tais como a composição dos materiais, locais de produção e indicadores de circularidade. Em contraste, cenários como reciclagem ou *remanufacturing* requerem uma granularidade muito maior, incluindo inventários completos de processos e fluxos (*inputs* e *outputs* de materiais e energia, resíduos, condições operacionais, histórico de utilização).

Neste trabalho, a granularidade é assegurada através da coexistência de dois níveis de informações: (i) dados agregados, publicados nos DPPs acessíveis ao público, e (ii) dados detalhados, preservados no LCI e partilhados seletivamente via *Data Spaces*. Essa abordagem permite conciliar transparência, confiança e adequação ao contexto, garantindo que cada *stakeholder* acede ao nível de granularidade mais apropriado às suas necessidades.

### 3.2.9 Outros submodelos

Para além dos SMs apresentados anteriormente, é importante reconhecer a existência de outros SMs complementares já existentes, que podem reforçar a gestão da informação circular, dependendo do setor de aplicação e dos requisitos específicos da cadeia de valor.

Entre os mais relevantes destacam-se: o SM da identificação do produto, SM de documentação e certificações, SM de utilização e manutenção, SM de fim de vida, entre outros. No âmbito deste trabalho, só são abordados os quatro primeiros.

O SM de identificação do produto reúne dados básicos de identificação como número de série, códigos *GTIN* ou até mesmo *QR*, versão, fabricante e data de produção. Este SM assegura a rastreabilidade e facilita a integração com sistemas externos, como ERP ou plataformas de logística.

O SM de Documentação e Certificações organiza informações relacionadas com normas de qualidade, certificações ambientais (ex.: ISO 14001 [155], Ecolabel [ref]) e conformidade regulatória. Estes dados são cruciais para promover a transparência, facilitar o reporte e reforçar a confiança ao longo da cadeia de valor.

O submódulo de Utilização e Manutenção armazena informações sobre instruções de uso, ciclos de manutenção, peças de substituição e manuais técnicos. Este tipo de dados promove a durabilidade e a reutilização dos produtos, alinhando-se perfeitamente com o PCDS (*Design for Disassembly, Design for Reuse, Design for Better-Use*).

E por fim, o SM do Fim de Vida do produto, orientado para processos de desmontagem, separação de materiais, reutilização de componentes e reciclagem. Fornece instruções técnicas que permitem otimizar operações de logística inversa e reduzir perdas de valor.

A escolha e implementação destes SMs dependem do contexto de aplicações e das necessidades específicas da indústria. Contudo, a sua integração na arquitetura proposta

contribui para criar um ecossistema de dados mais completo, cobrindo desde a concepção até ao fim de vida do produto.

Em conjunto, estes SMs complementares reforçam a flexibilidade da abordagem, garantindo que a arquitetura pode ser customizada e expandida para responder a diferentes cenários de circularidade, garantindo sempre que a coerência e a interoperabilidade são asseguradas pelo AAS.

### 3.3 Modelação semântica dos dados

A gestão de informação circular não requer apenas a recolha de dados, mas também a sua estruturação semântica, de forma a garantir que podem ser interpretados, reutilizados e integrados entre diferentes sistemas. Neste sentido, houve a necessidade de recorrer a linguagens de modelação de dados, de forma a oferecer mecanismos complementares para definir esquemas, ontologias e relações entre entidades.

O *LinkML*<sup>1</sup> foi adotado como ferramenta principal para a definição dos SMs do AAS, permitindo especificar de forma clara os atributos, tipos de dados, restrições e relações entre entidades. A utilização do LinkML ofereceu várias vantagens: gestão automática, a partir de um artefacto, de diferentes formatos de dados (como *JavaScript Object Notation* (JSON), *YAML Ain't Markup Language* (YAML), *Resource Description Framework* (RDF), entre outros), facilitando a interoperabilidade; definição de *schemas* válidos que asseguram consistência na criação e utilização de diferentes entidades industriais; capacidade de representação hierárquica de coleções de forma estruturada, o que para o AAS é altamente vantajoso; e capacidade para estabelecer relações entre entidades (por exemplo, materiais, produtos, processos, entre outros).

Na prática, a modelação semântica desenvolvida garante que cada propriedade dos ativos industriais é associada a conceitos normalizados, como os disponibilizados pelo *Schema.org* ou pelos referenciais do *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD). Este alinhamento semântico cria uma ponte entre a modelação técnica e a modelação conceptual, assegurando que os SMs podem ser compreendidos tanto por humanos como por máquinas.

Além disso, esta abordagem prepara a arquitetura para integrações futuras com plataformas emergentes de gestão de dados industriais, como os DPPs, onde a interpretação automática e confiável da informação desempenha um papel essencial.

### 3.4 Arquitetura sociotécnica proposta

A arquitetura proposta segue uma abordagem sociotécnica, pois reconhece que a eficácia dos sistemas digitais depende tanto das suas capacidades técnicas como da forma como são integrados nos processos, responsabilidades e práticas organizacionais. Assim, para além dos requisitos tecnológicos, esta abordagem incorpora também requisitos sociais, organizacionais e humanos, assegurando que a solução é não só tecnicamente robusta, mas também compreensível, utilizável e adequada às necessidades reais dos diferentes *stakeholders*.

---

<sup>1</sup><https://linkml.io/>

A arquitetura proposta nesta dissertação foi concebida para assegurar o fluxo de informação circular ao longo de toda a cadeia de valor, desde a recolha e normalização dos dados até à sua integração em ecossistemas distribuídos de partilha de informação. A solução está centrada nos AAS como núcleo digital, permitindo representar de forma padronizada os produtos e os seus atributos.

### 3.4.1 Arquitetura de alto nível

A figura 3.17 apresenta a arquitetura de alto nível da solução desenvolvida, organizada em torno de três blocos principais. O primeiro bloco diz respeito às fontes de dados (máquinas, pessoas e sistemas empresariais como *Material Requirements Planning* (MRP)) que são traduzidas em representações AAS e que passam por um processo de validação. No segundo bloco, estas representações são armazenadas em repositórios dedicados (*AAS Repository Ecosystem*), que asseguram a sua integridade e acessibilidade. Finalmente, no terceiro bloco, é onde a partilha de informação é realizada através de *Intrusion Detection System (IDS) Connectors*, no contexto de um *Data Space*, que inclui funcionalidades de catalogação e transferência de dados. Esta camada garante a interoperabilidade, segurança e controlo de acesso, em conformidade com iniciativas como o IDS e o DPP.

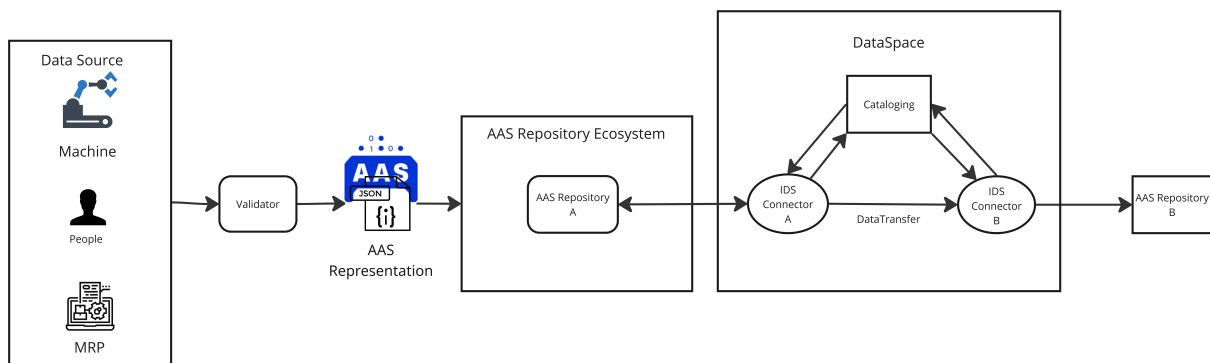


Figura 3.17: Arquitetura de alto nível

De forma complementar, a figura 3.18 detalha o processo de transformação e validação da informação, que antecede a integração nos repositórios. Os dados provenientes de fontes heterogêneas (*Data Sources*) são estruturados com base em especificações de modelos de dados e processados por mecanismos de inteligência artificial. O resultado é convertido em ficheiros compatíveis com o AAS, segundo as especificações formais do modelo (*AAS Model Specification*). Esta etapa assegura a normalização e a qualidade semântica da informação, condição necessária para a sua utilização no ecossistema global da arquitetura.

Assim, as duas figuras complementam-se: a figura 3.17 fornece uma visão holística do funcionamento da arquitetura proposta, enquanto a figura 3.18 descreve, em detalhe, o processo técnico de normalização que garante a consistência das representações AAS. Em conjunto, demonstram como é possível criar um ecossistema digital circular, no qual a informação é capturada, validada, armazenada e partilhada de forma confiável ao longo do ciclo de vida dos produtos.

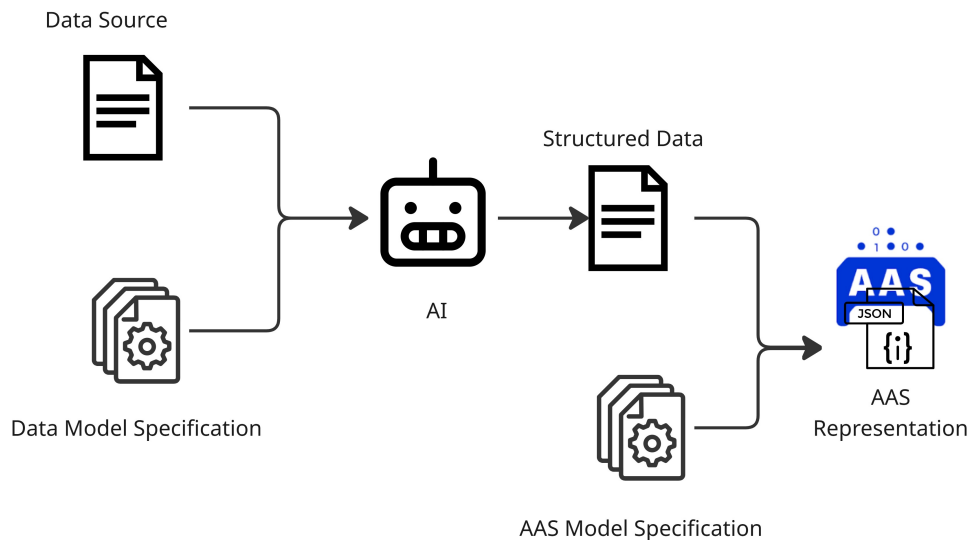


Figura 3.18: Fluxo de transformação e normalização dos dados até à representação AAS

### 3.4.2 Descrição das Camadas da Arquitetura

Esta arquitetura pode ser entendida de forma sistemática através de quatro camadas funcionais:

1. **Camada de Dados (Data Layer):** inclui os SMs do AAS desenvolvidos (*PCDS*, *CircularityFeatures*, *ProductionData*, *LifeCycleInventory*, entre outros), estruturando os dados de acordo com standards reconhecidos.
2. **Camada Semântica (Semantic Layer):** recorre a *LinkML* para atribuir significado formal aos elementos do modelo e assegurar a interoperabilidade semântica.
3. **Camada de Interoperabilidade (Interoperability Layer):** responsável pela partilha de dados através de conectores compatíveis com iniciativas como EDC, assegurando segurança, controlo de acesso e conformidade regulatória.
4. **Camada de Aplicação (Application Layer):** inclui as aplicações que consomem os dados (ex.: plataformas de LCA, dashboards de circularidade, ERP), apoiando a tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

### 3.4.3 Componentes Principais

Esta arquitetura materializa-se através de quatro componentes centrais:

- **Asset Administration Shell (AAS):** núcleo da arquitetura, estruturando os diferentes submodelos (*PCDS*, *ProductionData*, *LifeCycleInventory*, *Traceability*, *SupplyChainData* e *CircularityFeatures*).
- **Dataspace Connector:** gere a partilha controlada de dados detalhados (e.g., LCI), garantindo confiança e soberania de dados em conformidade com os princípios dos IDS.
- **DPP Generator:** extrai dados dos submodelos do AAS e gera *Digital Product Passports*, contendo apenas informação agregada e de acesso público.

- **Protocolos de Comunicação:** asseguram integração com ambientes industriais heterogéneos, suportando *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA), *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP).

### 3.4.4 Fluxo de Informação

O funcionamento da arquitetura segue um fluxo de informação contínuo:

1. **Do processo produtivo ao AAS:** dados recolhidos em ambientes industriais, através de protocolos como OPC-UA e MQTT, são normalizados e organizados em submodelos específicos (ProductData, ProductionData, LifeCycleInventory, Traceability).
2. **Do AAS ao Dataspace:** dados agregados são publicados em DPPs, enquanto dados detalhados permanecem acessíveis apenas via Dataspaces, mediante autorização controlada por conectores.

### 3.4.5 Vantagens da Arquitetura

- **Alinhamento regulatório:** integração com PCDS e capacidade de gerar DPPs em conformidade com as regras impostas pela UE.
- **Flexibilidade no acesso a dados:** distinção clara entre dados públicos (via DPP) e privados (via Dataspaces).
- **Escalabilidade e modularidade:** possibilidade de integrar novos submodelos de forma incremental.
- **Interoperabilidade técnica e semântica:** assegurada pelo AAS e alinhada com vocabulários externos (schema.org, ILCD, PCDS).
- **Robustez tecnológica:** suporte a múltiplos protocolos de comunicação (MQTT, OPC-UA, REST).

Em síntese, a arquitetura proposta oferece um equilíbrio entre conformidade regulatória, proteção da informação estratégica e interoperabilidade entre sistemas. Esta abordagem posiciona-se como um elemento facilitador da digitalização industrial orientada à circularidade, promovendo confiança e colaboração ao longo da cadeia de valor. No capítulo seguinte, é apresentada de forma detalhada a solução tecnológica que implementa esta proposta, bem como os resultados obtidos através da sua aplicação a um contexto de aplicação. Para tal, recorreu-se à utilização de ferramentas de suporte, como LinkML e o *Asset Administration Shell*.

# Capítulo 4

## Metodologia *Design Science Research*

### 4.1 Enquadramento do Trabalho no Âmbito do Projeto *Produtech R3*

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto *Produtech R3*<sup>1</sup>, uma Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias e Produção para a Reindustrialização, que integra 108 organizações entre empresas industriais, fornecedores de tecnologias e entidades do sistema científico e tecnológico.

O projeto *Produtech R3* [156] atua como um ecossistema colaborativo de inovação, estruturado por um conjunto de programas e *Work Package* (WP) que visam o desenvolvimento de 85 novas tecnologias de produção e a sua demonstração em mais de 50 pilotos industriais.

Apresenta como missão a transformação da indústria portuguesa, capacitando-a para responder aos desafios da transição para a economia circular, através de soluções tecnológicas que promovam a eficiência, sustentabilidade e resiliência.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação está enquadrado no WP8 [157], designado "Sistemas de Produção Interoperáveis, Inteligentes e autónomos" (ou Fábrica Digital e Sustentável).

Assim, o trabalho desenvolvido nesta dissertação contribui diretamente para os objetivos da WP8 ao propor e validar soluções digitais interoperáveis que suportam a representação e integração de dados industriais.

O foco principal consistiu no desenvolvimento e avaliação de dois artefactos tecnológicos:

- O **modelo semântico para descrição de ativos industriais**, que permite uniformizar e partilhar informação sobre produtos, processos, máquinas, pessoas, entre outros.
- O ***pipeline* de integração e processamento de dados**, que operacionaliza modelo semântico através de tecnologias que promovem os princípios da circularidade,

---

<sup>1</sup><https://r3.produtech.org/pt>

nomeadamente, rastreabilidade, interoperabilidade e transparência.

As experiências de validação realizadas neste âmbito foram desenhadas e planeadas de forma a poderem ser implementadas em cenários concretos das empresas que participam no WP8 , representando portanto situações concretas de produção e gestão de dados industriais.

A execução e análise destas experiências permite avaliar a utilidade e exequibilidade dos artefactos desenvolvidos no contexto do *Produtech R3*, demonstrando o seu potencial para apoiar a digitalização da indústria e, em particular, apoiar na implementação de práticas de circularidade em ambientes industriais reais.

## 4.2 Fundamentação de Metodologia DSR

A presente investigação adotou a metodologia DSR como enquadramento científico para a conceção, desenvolvimento e avaliação de soluções tecnológicas orientadas para a interoperabilidade de dados industriais e para o suporte à circularidade. A DSR é amplamente utilizada na área dos Sistemas de Informação e sustenta-se na premissa de que a criação de artefactos (por exemplo, modelos, arquiteturas ou *pipelines*), constitui, por si só, um contributo científico válido quando estes respondem a problemas relevantes e são avaliados com rigor [158].

Segundo *Hevner et al.*[158], a DSR assenta três pilares fundamentais: 1. Relevância, que exige que a investigação responda a problemas reais e significativos; 2. Rigor, que implica fundamentar o design em teorias, métodos e conhecimento consolidado; e o 3. Design, que requer a criação e avaliação iterativa de artefactos úteis e inovadores.

## 4.3 *Guidelines* da DSR

Para operacionalizar estes pilares, a tabela 4.1 apresenta as sete *guidelines* fundamentais da metodologia DSR, proposta por *Hevner et al.*[158], que orientam a conceção e execução de investigações centradas no desenvolvimento de artefactos tecnológicos. Estas *guidelines* servem como um enquadramento normativo para assegurar que o processo de design científico seja simultaneamente rígido, relevante e comunicável. Em conjunto, estas *guidelines* descrevem um ciclo que começa pela identificação de um problema relevante (G2), passa pela definição do rigor metodológico (G5), pela construção e avaliação de artefactos (G1 e G3) e culmina na comunicação e consolidação do conhecimento produzido (G4 e G7).

A figura 4.1 complementa esta visão ao ilustrar graficamente o fluxo iterativo entre as *guidelines*, evidenciando o carácter cíclico e dinâmico da DSR. O modelo mostra como “o investigado” pode refressar às fases anteriores sempre que o artefacto não atinge os objetivos definidos, num processo contínuo de aperfeiçoamento. Esta representação reflete o entendimento de que a G6 (Design como um processamento de procura) atua como um elo integrador que conecta as restantes *guidelines*, unindo construção, avaliação e refinamento num processo de aprendizagem e evoluções constantes.

Deste modo, tanto a tabela como a figura ajudam a enquadrar a metodologia utilizada nesta dissertação, reforçando a ideia de que o desenvolvimento dos artefactos descritos nas

Diretriz	Descrição
<b>G1: Design como Artefacto</b>	A investigação em design science deve produzir um artefacto viável sob a forma de um construto, modelo, método ou instância.
<b>G2: Relevância do Problema</b>	O objetivo da investigação em design science é desenvolver soluções baseadas em tecnologia para problemas empresariais importantes e relevantes.
<b>G3: Avaliação do Design</b>	A utilidade, qualidade e eficácia de um artefacto de design devem ser demonstradas de forma rigorosa através de métodos de avaliação bem executados.
<b>G4: Contribuições da Investigação</b>	Uma investigação eficaz em design science deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas do artefacto de design, das fundações do design e/ou das metodologias de design.
<b>G5: Rigor da Investigação</b>	A investigação em design science baseia-se na aplicação de métodos rigorosos tanto na construção como na avaliação do artefacto de design.
<b>G6: Design como um Processo de Procura</b>	A procura por um artefacto eficaz requer a utilização dos meios disponíveis para alcançar os resultados desejados, respeitando as leis do ambiente do problema.
<b>G7: Comunicação da Investigação</b>	A investigação em design science deve ser apresentada de forma eficaz tanto a públicos orientados para a tecnologia como a públicos orientados para a gestão.

Tabela 4.1: Diretrizes da Design Science Research e respectivas descrições.

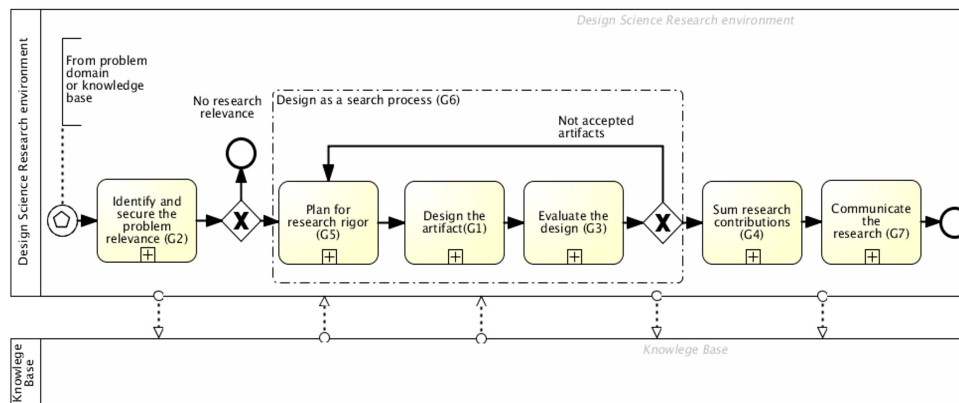


Figura 4.1: Representação das Guidelines da DSR.

[158]

secções seguintes resulta de um processamento sistemático e iterativo de design, guiado por princípios científicos e práticos da DSR.

## 4.4 Ciclo de Relevância

O ciclo de relevância estabelece a ligação direta entre os desafios do contexto industrial e os requisitos que orientam a criação dos artefactos. No âmbito do projeto *Producec R3*, e mais especificamente do WP, foram analisadas as necessidades das empresas parceiras, os seus fluxos reais de dados e as dificuldades existentes ao nível da interoperabilidade, rastreabilidade e gestão de informação ao longo da cadeia de valor. A observação destes cenários permitiu identificar problemas concretos, como a heterogeneidade dos dados industriais, a ausência de estruturas semânticas padronizadas e a dificuldade em integrar diferentes sistemas.

A análise destas necessidades resultou na formulação do problema central de investigação e na definição da questão que orienta a presente dissertação. A partir dessas constatações foram também extraídos os requisitos funcionais e não funcionais necessários para o desenvolvimento dos artefactos. Assim, o ciclo de relevância forneceu não apenas a motivação prática, mas também os objetivos e critérios que os artefactos deveriam cumprir para responder de forma eficaz aos desafios identificados nas empresas MUVU e Plasoeste.

## 4.5 Ciclo de Rigor

O ciclo de rigor introduz a fundamentação científica e tecnológica que suporta o processo de design dos artefactos. Para isso, foi realizada uma revisão aprofundada da literatura sobre modelação semântica, ontologias, interoperabilidade industrial, métricas de circularidade, modelos digitais e partilha soberana de dados. Foram incorporadas diretrizes e especificações de referência, como o metamodelo do AAS, normas e vocabulários semânticos amplamente aceites (PCDS, *Schema.org*, entre outros), e princípios associados aos *Data Spaces* e ao DPP.

Este conjunto de conhecimentos permitiu estabelecer uma base sólida e criteriosa para guiar o desenvolvimento dos artefactos, assegurando consistência metodológica e alinhada com práticas reconhecidas internacionalmente. O ciclo de rigor serviu também como mecanismos de validação conceptual, garantindo que as decisões de design seguissem padrões formais de modelação e interoperabilidade.

## 4.6 Ciclo do Design

O ciclo de design corresponde ao processo iterativo em que os artefactos são concebidos, construídos e refinados. Neste trabalho, este processo envolveu três iterações principais, cada uma delas com objetivos específicos e melhorias incrementais.

Numa fase inicial foi realizada a definição conceptual dos artefactos, incluindo a identificação das entidades, propriedades e relações essenciais para a representação de ativos industriais e das interações previstas no *pipeline* de integração. Em seguida, procedeu-se ao alinhamento semântico e estrutural com referenciais externos, assegurando compatibilidade com o metamodelo do AAS e a possibilidade de extensão para diferentes casos de uso. Finalmente, numa fase de implementação técnica, foram testadas diferentes estratégias de instanciação, transformação e partilha de dados, integrando tecnologias como *Eclipse BaSyx*, *Eclipse BaSyx Databridge*, *Node-RED* e o *EDC for AAS*.

Deste processo de design emergiram os dois artefactos desenvolvidos nesta dissertação: (1) um modelo semântico para descrição de ativos industriais, que estrutura e uniformiza dados relevantes para circularidade e interoperabilidade, e (2) um pipeline de integração e processamento de dados, responsável por aplicar esse modelo em contextos reais, capturando, transformando e partilhando informação ao longo da cadeia de valor.

## 4.7 Ciclo de Avaliação

O ciclo de avaliação teve como objetivo demonstrar a utilidade, exequibilidade e aplicabilidade prática dos artefactos desenvolvidos. A avaliação foi conduzida em cenários reais e semicontrolados, incorporando dados e necessidades das empresas do WP8. Foram definidos casos de uso específicos que permitiram observar o comportamento dos artefactos perante dados heterogêneos, fluxos de produção e requisitos de interoperabilidade.

Durante esta fase foram recolhidas observações discretas que evidenciam o funcionamento correto dos artefactos, como a criação e atualização de submodelos no AAS, a transformação semântica de dados brutos, cálculos de métricas e indicadores e a disponibilização e partilha segura de informação via EDC. Estas observações comprovaram que o *pipeline* é capaz de operacionalizar o modelo semântico, mantendo coerência estrutural e semântica ao longo dos diferentes níveis de sistema. Os resultados obtidos, discutidos no capítulo seguinte, confirmam a utilidade dos artefactos e validam a abordagem proposta.

# Capítulo 5

## Validação em Cenários Práticos

No contexto do WP8 da *Produtech R3*, foram desenvolvidos dois artefactos tecnológicos principais, concebidos de forma iterativa e avaliados através de experiências práticas em cenários industriais reais.

A construção dos artefactos desenvolvidos nesta dissertação segue as guidelines da metodologia DSR, conforme descrito por *Henver et al.* [158], e aprofundado por *Goldkuhl e Cronholm* [159].

A DSR propõe que a criação de artefactos tecnológicos constitui um meio válido de gerar conhecimento científico aplicável, desde que esses artefactos sejam projetados para resolver problemas relevantes e avaliados, quanto à sua utilidade, exequibilidade e contribuição.

Neste contexto, foram desenvolvidos dois artefactos tecnológicos principais, concebidos e avaliados de forma iterativa no âmbito do projeto *Produtech R3*, e mais concretamente no WP8:

- Um modelo semântico para descrição de Ativos Industriais, que uniformiza e estrutura dados sobre produtos, processos e materiais.
- Um *pipeline* de Integração e Processamento de Dados, que operacionaliza esse modelo e demonstra a sua aplicabilidade prática em cenários industriais.

A validação dos artefactos desenvolvidos neste trabalho foi conduzida de acordo com os princípios da DSR, em particular a *guideline Design Evaluation* proposta por *Henver et al.* [158].

Enquanto o capítulo 4 descreveu o processo de conceção e construção dos artefactos, o presente capítulo detalha a forma como estes foram testados, observados e avaliados, através de experiências de demonstração que simulam a integração e partilha de dados industriais interoperáveis.

A avaliação adotou uma abordagem qualitativa e empírica, baseada na observação de *outputs* discretos, correspondentes a estados do sistema e resultados mensuráveis, como coerência de dados, desempenho, interoperabilidade e qualidade semântica.

Esta fase teve como objetivo demonstrar a utilidade, exequibilidade e relevância dos artefactos num contexto realista, reproduzindo cenários industriais, representativos das empresas MUVU e Plasoeste.

## 5.1 Tecnologias e Ferramentas utilizadas

A validação da arquitetura proposta exigiu a utilização de um conjunto de ferramentas tecnológicas que permitiram, em conjunto, representar o AAS de forma estruturada, disponibilizá-los no contexto do AAS, integrar diferentes fontes e fluxos de dados, e disponibilizá-los na rede para os partilhar. Estas ferramentas foram selecionadas não apenas pela sua adequação técnica, mas também pela sua relevância em contextos industriais, garantindo a reprodutibilidade e alinhamentos com práticas de interoperabilidade.

A modelação semântica do AAS e dos seus submodelos foi realizada com recurso ao *LinkML*, uma linguagem de modelação baseada em YAML, que permite definir esquemas formais e exportá-los para diferentes formatos (JSON, RDF/*Web Ontology Language* (OWL)). Para além dos submodelos, foram também especificados outros vocabulários, nomeadamente o de Produto e as respectivas propriedades, alinhados com vocabulários externos já existentes (por exemplo, o *Schema.org*<sup>1</sup>), garantindo um léxico comum e reutilizável em todo o ecossistema. Em complemento, recorreu-se ao *OntoGPT*<sup>2</sup> para extração automática e normalizada de dados a partir de fontes heterogêneas, mapeando os termos detetados para as classes e atributos no esquema. Este processo facilitou o preenchimento consistente dos submodelos e reforçou a consistência semântica e a extensibilidade da solução. Estas ferramentas revelaram-se fundamentais para estruturar os seus atributos e as relações hierárquicas entre si, assegurando consistência semântica e extensibilidade futura.

O *Eclipse BaSyx* foi utilizado como plataforma de suporte ao AAS, permitindo a criação, gestão e consulta de instâncias de submodelos e de outros AASs. Esta solução assegurou a conformidade com os standards da I4.0 e proporcionou serviços de persistência, consulta e interação com os submodelos e outras ferramentas. Além do BaSyx, também foram exploradas outras ferramentas de apoio, como o *FAAAS Service*, o *NOVAAS*, o *AAS Portal* e o *AASX Package Explorer Service*, que se mostraram úteis nas fases iniciais de modelação. Contudo, à medida que o trabalho evoluiu e surgiram novos requisitos, o Eclipse BaSyx destacou-se por oferecer a cobertura mais completa face às necessidades do projeto.

Para a partilha dos dados recorreu-se ao EDC que garante a implementação de políticas de soberania de dados, em conformidade, com os princípios dos IDS. O EDC foi essencial para a partilha completa ou parcial dos dados entre entidades interessadas em informações específicas.

A integração de dados e a coordenação dos fluxos foram apoiadas pelo *Node-RED* utilizado para testar a comunicação via MQTT, simulando a publicação de dados que, posteriormente, eram consumidos pelo *Eclipse BaSyx DataBridge*. Este componente aplicava as transformações necessárias e alocava os valores diretamente nos submodelos do AAS, assegurando o correto mapeamento da informação. A execução dos diferentes módulos decorreu em ambiente containerizado com Docker, garantindo portabilidade, reprodutibilidade e facilidade de replicação.

Os protocolos industriais OPC UA e MQTT desempenharam um papel central na injeção de dados nos submodelos do AAS, reproduzindo cenários reais de comunicação máquina-máquina. No caso do MQTT, a integração com o *Databridge* demonstrou a capacidade da

---

<sup>1</sup><https://schema.org/>

<sup>2</sup><https://next.monarchinitiative.org/tools/ontogpt>

arquitetura em lidar com fluxos de dados heterogêneos, transformando "mensagens" em tempo real e refletindo-as de forma estruturada no AAS.

O *Eclipse BaSyx Databridge* foi um dos elementos centrais da arquitetura, atuando como mecanismo de integração entre protocolos industriais e o AAS. Este componente permite estabelecer *pipelines* de dados que ligam diferentes fontes (por exemplo, MQTT, OPC UA, bases de dados ou serviços REST) aos submodelos do AAS, aplicando regras de transformação e normalização durante o processo. No contexto do caso de uso, o *DataBridge* foi utilizado para consumir mensagens enviadas via MQTT (simuladas no *Node-RED*), aplicar transformações específicas e alocar os valores resultantes diretamente nos submodelos, esses valores foram nomeadamente cálculos de métricas e de indicadores ao suporte à circularidade. Desta forma, demonstrou-se a capacidade de solução em lidar com fluxo de dados heterogêneos e em suportar a atualização automática do AAS em tempo real.

Ferramenta/ Tecnologia	Função Principal
<i>LinkML</i>	Modelação semântica dos submodelos; exportação para formatos interoperáveis (JSON, RDF).
<i>Eclipse BaSyx</i>	Criação e gestão de instâncias do AAS; suporte a submodelos e serviços associados.
<i>Eclipse BaSyx Databridge</i>	Integração de dados industriais com o AAS; consumo de mensagens (MQTT, OPC UA, etc.), aplicação de transformações e injeção nos submodelos.
<i>Eclipse Dataspaces Connector</i>	Partilha seletiva de dados; implementação de políticas de soberania de dados.
<i>Node-RED</i>	Integração e orquestração de fluxos de dados; transformação e encaminhamento de informação.
<i>Docker</i>	Execução containerizada dos diferentes módulos da arquitetura; portabilidade.
OPC UA/ MQTT/ HTTP	Protocolos de comunicação industrial para recolha e troca de dados.

Tabela 5.1: Resumo de todas as ferramentas e tecnologias usadas

## 5.2 Artefacto 1 - Modelo Semântico para Descrição de Ativos Industriais

Este artefacto materializa um modelo semântico em *LinkML* para representação padronizada de dados industriais no contexto de AAS e respetivos submodelos. O desenvolvimento foi conduzido segundo a metodologia DSR, estruturando em: (i) problema e motivação; (ii) objetivos de design; (iii) desenvolvimento; (iv) demonstração; (v) avaliação; e (vi) discussão.

### 5.2.1 Problema e Motivação

A transição para modelos mais circulares depende da capacidade de representar, integrar e reutilizar dados industriais de forma consistente e interoperável ao longo da cadeia de

valor. Contudo, a heterogeneidade sintática e semântica entre sistemas e plataformas resulta em fraca capacidade de troca e interpretação automática de informação. Falta um vocabulário mínimo coerente que: (i) alinhe-se com o metamodelo do AAS e respetivos submodelos; (ii) permita instanciação consistente de produtos e seus atributos principais; (iii) seja exportável para ecossistemas semânticos (RDF/OWL) e validável por máquina.

## 5.2.2 Objetivos de Design

Foram definidos os seguintes objetivos:

1. **Interoperabilidade semântica:** definir um esquema formal em *LinkML* que represente o AAS, os seus submodelos e a entidade *Produto*, com mapeamentos para vocabulários amplamente aceites (por exemplo, *Schema.org*, *GS1*).
2. **Conformidade com o AAS:** manter alinhamento estrutural com o metamodelo do AAS (classes, *submodel elements*, referências) e estruturar um esquema semântico para ele.
3. **Exportabilidade e validação:** permitir que o modelo resultante da primeira etapa seja exportado e validado num formato adequado para o seu repositório
4. **Extensibilidade:** garantir um núcleo mínimo que possa ser expandido com novas entidades e atributos (pessoas, máquinas, processos, etc.).
5. **Operacionalização:** possibilitar consumo por ferramentas de extração/normalização (por exemplo, *OntoGPT*) e posterior instância em repositório AAS (*BaSyx*).

## 5.2.3 Desenvolvimento

### Modelação AAS em *LinkML*

O primeiro passo consistiu na modelação do AAS em *LinkML*, estabelecendo a estrutura semântica necessária para representar o AAS principal, as suas ligações a submodelos e os diferentes tipos de elementos que os compõem. Esta modelação assegura que a representação do AAS segue os princípios definidos pela I4.0, mas com a vantagem de estar formalizada em *LinkML*, o que permite tanto a validação sintática como a exportação para ambientes semânticos.

A classe *AssetAdministrationShell*, representada na listagem 5.1, constitui o núcleo da estrutura, pois representa a instância principal do AAS. O excerto de código seguinte mostra a sua definição:

```
1 AssetAdministrationShell:  
2   description: AAS principal  
3   attributes:  
4     idShort:  
5       range: string  
6     id:  
7       range: string  
8     submodels:  
9       range: SubmodelReference  
10    multivalued: true  
11    inlined: true
```

Listagem 5.1: Estrutura semântica da Classe *AssetAdministrationShell*

Esta classe define três atributos fundamentais: *idShort*, um identificador curto; *id*, que assegura a exclusividade global; e *submodels*, que permite referenciar múltiplos submodelos através da classe *SubmodelReference*.

A definição de *SubmodelReference* (listagem 5.2) e *Key* (listagem 5.3) garante que as referências a submodelos seguem a estrutura padrão da especificação AAS, como mostra o código:

```
1 SubmodelReference:
2   attributes:
3     type:
4       range: string
5     keys:
6       range: Key
7       multivalued: true
8       inlined: true
```

Listagem 5.2: Estrutura semântica de *SubmodelReference*

```
1 Key:
2   attributes:
3     type:
4       range: string
5     idType:
6       range: string
7     value:
8       range: string
```

Listagem 5.3: Estrutura semântica de *Key*

O *SubmodelReference* agrupa um conjunto de chaves (*keys*) que especificam o tipo e o identificador do submodelo, permitindo que os AAS estabeleçam ligações consistentes e reutilizáveis.

Os próprios submodelos foram definidos na classe *Submodel*, representado na listagem 5.4, que descreve atributos básicos como *idShort*, *id*, *kind* e *modelType*, além de incluir a lista de elementos que o compõem:

```
1 Submodel:
2   attributes:
3     idShort:
4       range: string
5     id:
6       range: string
7     kind:
8       range: string
9     pattern: " ^Instance$"
10    modelType:
11      range: string
12      pattern: " ^Submodel$"
13    submodelElements:
14      range: SubmodelElement
15      multivalued: true
16      inlined: true
```

Listagem 5.4: Estrutura semântica de *Submodel*

Cada submodelo pode assim conter um ou mais elementos definidos pela classe *SubmodelElement* (5.5). Esta última funciona como um invólucro genérico que admite três especializações: *Property* (5.6), *SubmodelElementCollection* (5.7) e *ReferenceElement* (5.8):

```

1 SubmodelElement:
2   description: A wrapper to Property and SubmodelElementCollection
3   union_of:
4     - Property
5     - SubmodelElementCollection
6     - ReferenceElement

```

Listagem 5.5: Estrutura semântica de *SubmodelElement*

```

1 Property:
2   attributes:
3     modelType:
4       range: string
5       required: true
6       pattern: "^Property$"
7     idShort:
8       range: string
9     valueType:
10      range: string
11     value:
12      range: string

```

Listagem 5.6: Estrutura semântica de *Property*

```

1 SubmodelElementCollection:
2   attributes:
3     modelType:
4       range: string
5       required: true
6       pattern: "^SubmodelElementCollection$"
7     idShort:
8       range: string
9     value:
10      range: SubmodelElement
11      multivalued: true
12      inlined: true

```

Listagem 5.7: Estrutura semântica de *SubmodelElementCollection*

```

1 ReferenceElement:
2   attributes:
3     modelType:
4       range: string
5       required: true
6       pattern: "^ReferenceElement$"
7     idShort:
8       range: string
9       required: true
10    value:
11      range: SubmodelReference
12      required: true
13      inlined: true

```

Listagem 5.8: Estrutura semântica de *ReferenceElement*

Desta forma, um *Property* representa atributos simples de tipo valor; o *SubmodelElementCollection* permite organizar hierarquicamente grupos de elementos; e o *ReferenceElement* estabelece ligações a outras entidades ou submodelos, assegurando reutilização e interconexão.

É importante salientar que para a experiência realizada, foi estruturado apenas o vocabulário fundamental necessário para viabilizar a representação e instanciação do AAS e dos seus submodelos. Esta escolha permitiu focar nos elementos essenciais para a validação da arquitetura, sem comprometer a clareza nem a coerência semântica.

É importante salientar que, para a experiência realizada, apenas o vocabulário fundamental foi estruturado, garantindo a viabilidade da representação e instanciação do AAS e dos seus submodelos. Esta escolha permitiu validar a arquitetura de forma clara e coerente, sem sobrecarregar a modelação. Contudo, uma das principais vantagens do *LinkML* reside na sua extensibilidade: novas estruturas ou elementos adicionais do AAS podem ser facilmente incorporados, tornando a modelação progressivamente mais completa e alinhada com a totalidade do metamodelo definido. Desta forma, o desenvolvimento mantém-se aberto a evoluções futuras, como a inclusão de atributos mais avançados.

## Modelação do Produto

Os dados relativos ao Produto foram modelados em *LinkML*. Atributos desta modelação usam vocabulários já existentes que servem para descrever esta entidade. Este vocabulário foi pensado para ser consumido pelo *OntoGPT* na extração e normalização de dados a partir de fontes heterogêneas (documentação técnica, páginas web, fichas de produtos, entre outras). O objetivo foi cobrir o vocabulário fundamental para viabilizar a experiência, mantendo a estrutura extensível para evoluções futuras, no que diz respeito a integrar mais atributos que enriqueçam o produto.

O esquema de produto foi estruturado em *LinkML* com base em vocabulários externos já consolidados, principalmente o *Schema.org* e o *GS1*, assegurando alinhamento semântico e interoperável. A classe *Product* foi definida como raiz do modelo, representando produtos físicos ou comerciais e funcionando como ponto de entrada para os restantes elementos relacionados.

A figura 5.1 mostra os principais atributos do produto: *name*, *brand*, *model*, *gtin*, *category*, *material*, *color*, *size*, *description*. E depois temos entidades relacionadas, que são entidades compostas que nos auxiliam a ter mais informação do produto. A tabela 5.2 mostra com mais detalhes esses atributos usados para descrever o produto. Nas Tabelas 5.3, ?? e 5.5 são apresentados os atributos utilizados para descrever o fabricante, o local de produção e outros dados relacionados com o produto.

Para esta entidade, o Produto, o *OntoGPT* usa este *schema*, como padrão de extração: as *slots* definidas funcionam como campo-alvo para *prompting* e *parsing* das fontes de dados. Os mapeamentos ajudam a reconhecer sinónimos e estruturas já padronizadas (como a ajuda dos vocabulários existentes), enquanto restrições como (*GTIN*) e outros atributos de modelação (*multivalued*, *inlined*) orientam a validação e a normalização do resultado.

Para esta experiência, apenas os vocabulários fundamentais foram estruturados. Graças à extensibilidade do *LinkML*, é simples: adicionar campos e modelar novas entidades

O schema desenvolvido cobre os atributos essenciais para identificar, descrever e con-

```

classes:
  Product:
    tree_root: true
    description: A physical or commercial product.
    exact_mappings:
      - schema:Product
    slots:
      - name
      - brand
      - model
      - gtin
      - category
      - material
      - color
      - size
      - description
      - manufacturer
      - site_information
      - manufacturer_site

```

Figura 5.1: Excerto da modelação do Produto usando LinkML

textualizar produtos em ambientes digitais, com possibilidade de extensão futura. Este vocabulário foi ainda consumido pelo *OntoGPT*, que utilizou a estrutura para extrair automaticamente dados de fontes textuais, e posteriormente foi mapeado para criar o AAS e os seus submodelos.

### 5.2.4 Demonstração

O modelo foi operacionalizado em dois passos:

1. **Extração e normalização com *OntoGPT***: o esquema *LinkML* serviu como *padrão de extração*, onde as *slots* funcionaram como campos-alvo para *prompting* e *parsing* de fontes heterogêneas (documentação técnica, páginas web, fichas de produto). As restrições (por exemplo, o *regex* do *GTIN*) e marcadores (*multivalued*, *inlined*) orientaram a validação e a normalização.
2. **Instanciação no repositório AAS (*BaSyx*)**: as instâncias geradas foram mapeadas para o AAS e seus submodelos. No repositório, cada AAS mantém identificador global e referencia os submodelos via API, garantindo persistência (por exemplo, o MongoDB) e navegação via *user interface*. A Figura 5.2 mostra um AAS com submodelos relevantes (por exemplo, *CircularityFeatures*, *LifeCycleInventory*, *PCDS*, *ProductData*, *ProductionData*, *SupplyChainData*, *Traceability*); a Figura 5.3 ilustra propriedades ao nível dos *submodel elements*.

SM	CircularityFeatures
SM	LifeCycleInventory
SM	PCDS
SM	ProductData
SM	ProductionData
SM	SupplyCHainData
SM	Traceability

Figura 5.2: Instância de AAS no repositório BaSyx

**ProductionSite** SubmodelElementCollection

---

site_name	xs:string	Sony Malaysia SDI
site_address	xs:string	Kuala Lumpur
site_country	xs:string	Malaysia
site_certification	xs:string	<No certification ir

---

Last sync: 2025-09-22 23:39:30

Figura 5.3: Excerto de propriedades de submodelos no BaSyx

Atributos	Fonte	Descrição
name	Schema.org	Representa o nome do produto. Está mapeado diretamente para schema:name.
brand	Schema.org	Corresponde à marca sob a qual o produto é comercializado. Este atributo herda de schema:brand.
model	Schema.org	Designa o modelo ou código específico do produto, mapeado para schema:model.
gtin	Schema.org	Global Trade Item Number. Este campo tem uma restrição de expressão regular para validar a sintaxe e está mapeado para schema:gtin. É o identificador mais importante para integração com catálogos comerciais e sistemas de supply chain.
category	Schema.org	Especifica a categoria ou tipo de produto (ex: Smartphone, Running Shoe, etc.). Mapeado para schema:category.
material	Schema.org	Lista dos materiais principais do produto, alinhado com o schema:material.
color	Schema.org	Identifica a cor ou paleta de cores do produto, mapeado a schema:color.
size	Schema.org	Define o tamanho ou dimensões relevantes. Corresponde a schema:size.
description	Schema.org	Permite uma descrição em texto livre do produto, herdando o schema:description.

Tabela 5.2: Atributos para produtos

Atributos	Fonte	Descrição
manufacturer_name	Schema.org	Representa o nome do fabricante do produto. Mapeado para schema:name.
manufacturer_id	GS1	É um identificador normalizado, mapeado para gs1:ManufacturerIdentificationNumber.
manufacturer_location	Schema.org	Representa o local do fabricante do produto, mapeado para schema:location.

Tabela 5.3: Resumo dos atributos relacionados ao fabricante

### 5.2.5 Avaliação

A avaliação seguiu critérios e técnicas coerentes com DSR:

- **Coerência e conformidade:** verificação de alinhamento com o metamodelo AAS e consistência interna do esquema.
- **Aplicabilidade e completude mínima:** capacidade de descrever produtos reais com atributos essenciais (*name*, *brand*, *model*, *gtin*, ...), incluindo entidades relacionadas (fabricante, local, *URLs*).
- **Interoperabilidade:** extração de dados provenientes de qualquer fonte de dados

Atributos	Fonte	Descrição
site_name	Schema.org	Nome do local de produção. Mapeado como schema:name.
site_address	Schema.org	Endereço do local de produção. Mapeado como schema:location.
site_country	Schema.org	País do local da produção. Mapeado como schema:addressCountry.
site_certification	GS1	Lista de certificações do local de produção. Mapeado como gs1:certification.

Tabela 5.4: Resumo dos atributos relacionados ao local de produção

Atributos	Fonte	Descrição
product_url	Schema.org	URL do produto. Mapeado como schema:url.
support_url	Schema.org	URL para o atendimento ao cliente. Mapeado como schema:customerService.
documentation_url	Schema.org	URL para documentos relevantes do produto. Mapeado como schema:documentation.

Tabela 5.5: Resumo dos atributos relacionados a URLs do produto

e posteriormente a sua exportação num formato válido para AAS e integração com *OntoGPT* e *BaSyx*.

- **Operacionalidade:** instanciação bem-sucedida no repositório AAS, com acesso via API REST e *User Interface* (UI).

### 5.2.6 Discussão

O artefacto cumpre o propósito de criar um *vocabulário mínimo viável* para descrição de produtos e respetiva integração em AAS, conciliando: (i) clareza de especificação (*LinkML*); (ii) conformidade estrutural (AAS); (iii) operacionalização (*OntoGPT* + *BaSyx*). Os ganhos observados incluem redução de ambiguidade na representação, validação automática (via *patterns*/restrições) e portabilidade para ecossistemas semânticos.

Para este artefacto, as limitações encontradas são, nomeadamente, o escopo é propositalmente mínimo: nem todos os aspetos do metamodelo AAS e do domínio de produto foram cobertos nesta iteração. A cobertura de normas setoriais específicas (por exemplo, ECLASS detalhado, ISO específicas de produto) permanece trabalho futuro.

## 5.3 Artefacto 2 — Pipeline de Integração e Processamento de Dados

O segundo artefacto corresponde ao *pipeline* de integração e processamento de dados que operacionaliza o modelo semântico descrito no Artefacto 1, 5.2. Este artefacto implementa a camada de interoperabilidade entre sistemas industriais heterogéneos e os repositórios

de AAS, articulando-se com a metodologia DSR nas etapas de concepção, desenvolvimento e avaliação tecnológica. O pipeline foi construído sobre o ecossistema *Eclipse BaSys* e o EDC, tendo como suporte a utilização do *Eclipse BaSys DataBridge*, *Node-RED* e protocolos industriais como MQTT e OPC UA.

### 5.3.1 Problema e Motivação

Apesar do modelo semântico garantir coerência estrutural e interoperabilidade de representação, a troca de dados entre plataformas industriais continua a ser um desafio devido à diversidade de protocolos, formatos e mecanismos de comunicação. Os sistemas de chão de fábrica (por exemplo, OPC UA, MQTT) e as plataformas de gestão (como repositórios AAS) frequentemente operam em silos, dificultando a circulação fluida e segura de informação. Além disso, a partilha de dados entre organizações da cadeia de valor exige mecanismos que preservem a *soberania dos dados*, assegurando controlo, rastreabilidade e políticas de acesso.

Assim, identificam-se dois problemas centrais:

1. **Integração sintática e semântica de dados industriais**, ligando fontes heterogêneas ao AAS de forma automatizada e dinâmica;
2. **Enriquecimento e transformação dos dados**, garantindo que os dados provenientes de diferentes fontes sejam processados, normalizados e complementados de modo a tornarem-se mais robustos e precisos, nomeadamente para o cálculo das *Key Performance Indicator* (KPIs) circulares (indicadores e métricas circulares);
3. **Partilha segura e governada de dados** entre participantes da cadeia de valor, em conformidade com princípios de confiança e soberania.

### 5.3.2 Objetivos de Design

Os objetivos que orientaram o desenvolvimento deste artefacto foram:

1. Criar um pipeline modular que intercepte, transforme e integre fluxos de dados em tempo real nos submodelos do AAS (*Eclipse BaSys Databridge*);
2. Permitir a integração com múltiplos protocolos industriais (MQTT, OPC UA) e a conversão dos dados para uma representação semântica coerente com o modelo *LinkML*;
3. Implementar uma camada de partilha de dados soberana, baseada em *Data Spaces*, garantindo políticas de acesso e controlo de uso;
4. Demonstrar a operacionalização do modelo semântico num ambiente de integração e partilha distribuído, validando a interoperabilidade entre atores distintos da cadeia de valor.

### 5.3.3 Desenvolvimento

O desenvolvimento foi estruturado em duas camadas funcionais complementares: (i) a unidade de processamento de AAS, responsável pela integração e transformação de dados; e (ii) a camada de partilha de dados via *Data Spaces*, responsável pela governança e exposição controlada da informação.

## Unidade de Processamento de AAS

Para além da sua função como repositório, o *Eclipse BaSyx* desempenhou também o papel de uma verdadeira unidade de processamento de AASs, graças à utilização do componente *DataBridge*. Este módulo permitiu interligar diferentes protocolos industriais e fluxos de dados externos ao AAS, transformando-os em elementos semânticos diretamente injetados nos submodelos.

Na experiência desenvolvida, o *Node-RED* foi usado para publicar mensagem em tópicos MQTT, simulando valores oriundos não só do chão de fábrica, mas como também o AAS processa-se a ele mesmo de forma a completar, de forma inteligente, outros atributos, deixando-o mais completo, promovendo a abordagem de CoDT. O *Databridge* subscreveu estes tópicos, aplicou transformações necessárias e alocou os valores resultantes nos submodelos correspondentes, assegurando que a informação era atualizada em tempo real no AAS.

Este processo demonstrou como o *BaSyx* pode ser mais do que um repositório de dados estático, tornando-se uma camada de integração dinâmica, capaz de consumir dados de protocolos industriais como MQTT e OPC UA, normalizá-los e disponibilizá-los dentro da estrutura do AAS, promovendo a sua camada ativa, já mencionada ao longo deste trabalho.

Ao permitir esta ponte entre fluxos de dados heterogéneos e a representação semântica definida em *LinkML*, o *BaSyx* consolidou-se como elemento central da arquitetura proposta, mostrando a sua relevância não apenas na gestão, mas também no processamento ativo de dados industriais.

## Partilha de Dados Via *Data Spaces*

A etapa final da arquitetura proposta consistiu na integração dos AAS num ambiente de partilha de seleção de dados através de *Data Spaces*. Esta abordagem é fundamental para promover a colaboração entre diferentes atores da cadeia de valor, assegurando simultaneamente a soberania e o controlo sobre os dados partilhados.

Usando *Data Spaces* como forma de partilha de dados, está a ser garantida a soberania dos dados. Onde cada organização mantém o controlo total sobre os seus próprios dados, mesmo quando estes são partilhados em ecossistemas distribuídos. Isto significa que o detentor da informação define quem pode aceder, em que condições e para que finalidade os dados podem ser utilizados. Nos *DataSpaces*, esta soberania é garantida através de mecanismos técnicos (como conectores, contratos de uso de dados e políticas de acesso) e organizacionais (acordos de confiança entre os participantes, que no caso da EC, são os agentes que participam na cadeia de valor). Assim, cada entidade pode participar na partilha colaborativa sem perder autonomia nem comprometer a confidencialidade da sua informação estratégica.

Para a sua concretização foi utilizado o EDC, componente de referência que permite estabelecer ligações seguras entre participantes, definir políticas de acesso e aplicar mecanismos de controlo de uso. O EDC foi configurado para consumir dados provenientes dos submodelos do AAS e disponibilizá-los a parceiros externos de forma controlada, promovendo não só a transparência por toda a cadeia de valor entre os agentes que nela participam, mas também transparência no ciclo de vida do produto.

Nesta experiência, a partilha incidu em submodelos críticos para a circularidade, como *Life Cycle Inventory* e o *Circularity Features*, que contêm informação necessária para o cálculo de métricas e para a criação de DPPs. Através do EDC, foi possível expor apenas os submodelos relevantes, garantindo que outros dados permanecem privados.

A utilização de *Data Spaces* demonstrou que a arquitetura proposta é compatível com princípios da soberania dos dados, promovendo a interoperabilidade entre diferentes organizações sem comprometer a confidencialidade dos dados industriais. Este mecanismo confirma a viabilidade de integrar o AAS em ecossistemas distribuídos de partilha de informação, alinhados com as iniciativas europeias da economia circular e gestão de dados industriais.

### 5.3.4 Demonstração

A demonstração do *pipeline* foi conduzida em ambiente *Docker*, interligando os seguintes componentes:

- ***Node-RED***: simulação e publicação de dados MQTT;
- ***Eclipse BaSyx (AAS + DataBridge)***: subscrição de tópicos e injeção dos valores transformados nos submodelos;
- ***Eclipse DataSpace Connector***: partilha controlada dos submodelos relevantes para parceiros externos.

O fluxo de dados operou da seguinte forma: 1) o *Node-RED* emitiu mensagens com atributos de produto e indicadores de circularidade; 2) o *DataBridge* interpretou e normalizou os dados, atualizando dinamicamente o AAS no *BaSyx*; 3) O EDC em conexão com o *Databridge* disponibilizou as instâncias e partilhou-as sob políticas de acesso predefinidas.

Esta demonstração provou a viabilidade técnica da integração entre dados operacionais e semânticos, evidenciando interoperabilidade entre plataformas distintas.

### 5.3.5 Avaliação

A avaliação foi realizada de acordo com os critérios da DSR, considerando utilidade, exequibilidade e impacto do artefacto:

- **Utilidade**: o *pipeline* demonstrou capacidade de processar e atualizar dados industriais em tempo real, assegurando coerência com o modelo semântico do Artefacto 1.
- **Exequibilidade**: foi verificada a compatibilidade entre sistemas heterogéneos (*Node-RED*, MQTT, *BaSyx*, EDC), confirmando a aplicabilidade em cenários industriais reais.
- **Interoperabilidade**: os dados circularam de forma transparente entre sistemas e foram partilhados via EDC sem perda de semântica.
- **Soberania e segurança**: o uso de políticas e contratos no EDC garantiu controlo de acesso e proteção da informação sensível.

### 5.3.6 Discussão

O *pipeline* de integração e partilha de dados proposto cumpre o papel de **operacionalizar o modelo semântico**, permitindo a sua utilização em fluxos industriais dinâmicos e ecossistemas distribuídos de partilha. A abordagem demonstrou que o AAS pode atuar como um nó cognitivo dentro de uma arquitetura digital, consumindo, processando e disponibilizando dados em tempo real.

Os principais contributos do artefacto são:

- Integração entre dados físicos (operacionais) e semânticos (modelo *LinkML/AAS*);
- Implementação prática de interoperabilidade entre sistemas distintos;
- Garantia de soberania e segurança através de mecanismos técnicos do EDC;
- Promoção de transparência e rastreabilidade ao longo da cadeia de valor.

As limitações do pipeline desenvolvido encontram-se numa fase experimental e foi testado num contexto controlado. A escalabilidade para múltiplos agentes e o desempenho sob grandes volumes de dados requerem otimização adicional. Tanto o *DataBridge* do *Eclipse BaSyx* como o *Eclipse DataSpace Connector* utilizado, neste caso, a versão específica *EDC Extension for AAS*, ainda não atingiram o seu potencial máximo. Ambos os componentes encontram-se em evolução, com partes da sua documentação e funcionalidades previstas ainda não totalmente implementadas, oferecendo apenas o conjunto básico de operações. Apesar dessas limitações, mesmo as funcionalidades atualmente disponíveis mostraram-se suficientes para validar a arquitetura proposta, demonstrando resultados muito satisfatórios na integração de dados, atualização dinâmica de submodelos e partilha soberana de informação. Estes resultados evidenciam o valor prático das soluções testadas e apontam para um elevado potencial de maturação tecnológica em versões futuras.

# Capítulo 6

## Conclusão e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusão

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como principal objetivo propor e validar uma arquitetura capaz de estruturar, gerir e partilhar informação relevante para a EC, tendo como conceito fundamental o AAS. A partir de uma modelação semântica em *LinkML*, foi possível estruturar entidades industriais representadas através do AAS, como o Produto e os respetivos modelos, assegurando clareza na definição de atributos, integração semântica e extensibilidade futura.

A implementação prática realizada com recurso ao *Eclipse BaSyx* e a ferramentas complementares como *OntoGPT*, *Node-RED*, o *Eclipse BaSyx Databridge* e o *EDC Extension for AAS*, demonstrou a viabilidade da abordagem proposta. A arquitetura implementada permitiu instanciar submodelos relevantes, como *ProductData*, *LCI*, *CircularityFeatures*. Permitiu ainda, alimentar os mesmos em tempo real através de protocolos industriais (MQTT e OPC UA) e disponibilizar os dados de forma seletiva em *Data Spaces*, respeitando os princípios de soberania e do controlo dos dados.

Os resultados alcançados confirmam que o AAS pode assumir um papel central na integração semântica e operacional de dados industriais, funcionando como um ponto unificado de representação e interoperabilidade. O modelo semântico desenvolvido em *LinkML* demonstrou ser eficaz na descrição e padronização de entidades industriais, enquanto o *pipeline* de integração mostrou capacidade de transformar e enriquecer os dados, assegurando a sua consistência e atualização contínua.

A validação prática evidenciou que os dados extraídos e processados podem ser integrados no AAS e utilizados para o cálculo de métricas de circularidade, tais como o MCI, além de suportarem a criação do DPP. Estes resultados confirmam o potencial do AAS como infraestrutura de suporte à circularidade e interoperabilidade ao longo da cadeia de valor, ao mesmo tempo que aproximam o conceito de CoDT da sua aplicação real.

Assim, podemos concluir que, do ponto de vista científico, o trabalho contribuiu para a investigação em interoperabilidade semântica, interoperabilidade sintática (entre protocolos industriais), CoDT, patilha de dados, criação de estruturas de dados inteligentes (com alto nível de abstração de forma a agregar qualquer tipo de entidade industrial) e, consequentemente cálculo de KPIs importantes para a EC e para a I5.0. Do ponto de vista de aplicação prática, este trabalho demonstrou que é possível aplicar tecnologias

abertas e emergentes, como o *LinkML*, *BaSyx* e *EDC*, para criar um ecossistema digital interoperável, modular e extensível, promovendo transparência e confiança entre os agentes da cadeia de valor.

Apesar dos resultados promissores, foram identificadas algumas limitações. Tanto o DataBridge do Eclipse BaSyx como o EDC Extension for AAS encontravam-se ainda em desenvolvimento e não permitiam utilizar o seu potencial máximo. Várias funcionalidades descritas nas suas especificações permaneciam por implementar, oferecendo apenas um conjunto básico de operações. Além disso, a configuração de políticas e contratos de partilha de dados continua a depender de parametrização manual, o que limita a escalabilidade e a automatização. Outro fator a considerar, é a dependência da qualidade e granularidade dos dados de entrada, que influencia diretamente a precisão das métricas de circularidade calculadas. Apesar disso, mesmo com estas limitações, as funcionalidades disponíveis mostraram-se suficientes para validar a arquitetura e comprovar a utilidade prática da abordagem, produzindo resultados consistentes e demonstrando o elevado potencial de evolução tecnológica destas ferramentas.

Em suma, a dissertação apresentou uma abordagem inovadora para a integração semântica, interoperabilidade e soberania de dados no contexto da EC, com o foco final de obter a informação necessária para o DPP. Ao conjugar o modelo semântico (Artefacto 1) com o pipeline de integração e partilha (Artefacto 2), foi possível demonstrar a construção de um ecossistema digital coerente, capaz de transformar dados industriais dispersos em informação inteligível, rastreável e partilhável. Os resultados obtidos representam um passo relevante para a concretização de infraestruturas digitais sustentáveis e interoperáveis, contribuindo para a transição para uma indústria mais transparente, inteligente e circular. O trabalho evidencia que o AAS, aliado a tecnologias emergentes de integração e partilha de dados, pode funcionar como elemento estruturante de futuros ecossistemas de dados industriais — interligando o físico, o digital e o cognitivo sob um mesmo modelo de informação.

## 6.2 Possibilidades de Trabalho Futuro

Como continuação do trabalho desenvolvido, sugerem-se algumas linhas de evolução:

- **Expansão Semântica:** Alargar o vocabulário definido em LinkML para incluir novas entidades, como Pessoas e Máquinas, reforçando as relações entre submodelos e enriquecendo a representação de fluxos de produção e circularidade.
- **Melhoria do Pipeline de Integração:** Introduzir suporte a novos protocolos industriais e mecanismos avançados de enriquecimento automático de dados, consolidando a dimensão cognitiva do AAS.
- **Integração de mais Indicadores Circulares:** Incorporar módulos de cálculo e monitorização automática de indicadores de circularidade, reforçando a utilidade do Cognitive Digital Twin para a tomada de decisão relativa a sustentabilidade do negócio.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- [1] Z. Gródek-Szostak, L. Ochoa Siguencia, A. Niemczyk, and A. Szelag-Sikora, “FROM INDUSTRY 4.0 PARADIGM TOWARDS INDUSTRY 5.0,” *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 2, pp. 46–49, June 2023.
- [2] H. Thompson-Bahm, J. E. Teixeira, and R. C. G. Lobo, “Enhancing sustainability and human centrality through emerging technologies from Industry 4.0 to Industry 5.0: An integrative literature review,” *Corporate Governance and Sustainability Review*, vol. 9, no. 3, p. 90, 2025.
- [3] D. Verma, “Industry 5.0: A Human-Centric and Sustainable Approach to Industrial Development,” *International Journal of Social Relevance & Concern*, vol. 12, pp. 17–21, May 2024.
- [4] V. Rizos, A. Behrens, W. Van der Gaast, E. Hofman, A. Ioannou, T. Kafyeke, A. Flamos, R. Rinaldi, S. Papadelis, M. Hirschnitz-Garbers, and C. Topi, “Implementation of Circular Economy Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers,” *Sustainability*, vol. 8, p. 1212, Nov. 2016. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [5] D. Ivanov, “The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centrality perspectives,” *International Journal of Production Research*, vol. 61, pp. 1683–1695, Mar. 2023. Publisher: Taylor & Francis. eprint: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892>.
- [6] T. F. Slaper and T. J. Hall, “The triple bottom line: What is it and how does it work?,” *Indiana Business Review*, vol. 86, no. 1, p. 4-8, 2011.
- [7] Ellen MacArthur Foundation, “Towards the circular economy vol. 1: Economic and business rationale for an accelerated transition,” 2013.
- [8] H. Oliveira, “Circular economy: from economic concept to legal means for sustainable development,” *e-Pública*, vol. 7, no. 2, pp. 73–93, 2020.
- [9] A. P. Mol and Y. Liu, “Institutionalising cleaner production in China: the Cleaner Production Promotion Law,” *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 4, pp. 227–245, Jan. 2005. Publisher: Inderscience Publishers.

- [10] Y. Geng and B. Doberstein, “Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving ‘leapfrog development’,” *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, vol. 15, pp. 231–239, June 2008.
- [11] Y. Geng, Q. Zhu, B. Doberstein, and T. Fujita, “Implementing China’s circular economy concept at the regional level: A review of progress in Dalian, China,” *Waste Management*, vol. 29, pp. 996–1002, Feb. 2009.
- [12] J. Li, W. Sun, H. Song, R. Li, and J. Hao, “Toward the construction of a circular economy eco-city: An emergy-based sustainability evaluation of Rizhao city in China,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102956, Aug. 2021.
- [13] A. de Jesus and S. Mendonça, “Lost in transition? drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy,” *Ecological Economics*, vol. 145, p. 75–89, 2018.
- [14] B. Suárez-Eiroa, E. Fernández, G. Méndez-Martínez, and D. Soto-Oñate, “Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 952–961, Mar. 2019.
- [15] M. P. Singh, A. Chakraborty, and M. Roy, “Developing an extended theory of planned behavior model to explore circular economy readiness in manufacturing MSMEs, India,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 313–322, Aug. 2018.
- [16] K. R. Skene, “Circles, spirals, pyramids and cubes: why the circular economy cannot work,” *Sustainability Science*, vol. 13, pp. 479–492, Mar. 2018.
- [17] A. Luo, M. Zuberi, J. Liu, M. Perrone, S. Schnepf, and S. Leipold, “Why common interests and collective action are not enough for environmental cooperation – Lessons from the China-EU cooperation discourse on circular economy,” *Global Environmental Change*, vol. 71, p. 102389, Nov. 2021.
- [18] E. Commission *et al.*, “Closing the loop—an eu action plan for the circular economy,” 2015.
- [19] J. A. Samper, A. Schockling, and M. Islar, “Climate politics in green deals: Exposing the political frontiers of the european green deal,” *Politics and Governance*, vol. 9, no. 2, p. 8–16, 2021.
- [20] J. A. Samper, A. Schockling, and M. Islar, “Climate Politics in Green Deals: Exposing the Political Frontiers of the European Green Deal,” *Politics and Governance*, vol. 9, pp. 8–16, Apr. 2021.
- [21] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications, 2018.
- [22] J. Kirchherr and R. Van Santen, “Research on the circular economy: A critique of the field,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 151, p. 104480, Dec. 2019.
- [23] S. A. Neves and A. C. Marques, “Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 341, p. 130865, Mar. 2022.
- [24] “The digital product passport make it a game-changer for circular economy!,” 2023.

- [25] P. Kumar, R. K. Singh, and V. Kumar, “Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, p. 105215, Jan. 2021.
- [26] A. Pagoropoulos, D. C. A. Pigosso, and T. C. McAloone, “The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review,” *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 19–24, Jan. 2017.
- [27] F. Charnley, D. Tiwari, W. Hutabarat, M. Moreno, O. Okorie, and A. Tiwari, “Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy,” *Sustainability*, vol. 11, p. 3379, June 2019.
- [28] B. Huo, M. Z. U. Haq, and M. Gu, “The impact of information sharing on supply chain learning and flexibility performance,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, pp. 1411–1434, Mar. 2021. Publisher: Taylor & Francis \_eprint: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824082>.
- [29] P. Wieder and H. Nolte, “Toward data lakes as central building blocks for data management and analysis,” *Frontiers in Big Data*, vol. 5, p. 945720, Aug. 2022.
- [30] S. Azzabi, Z. Alfughi, and A. Ouda, “Data Lakes: A Survey of Concepts and Architectures,” *Computers*, vol. 13, p. 183, July 2024.
- [31] B. Suárez-Eiroa, E. Fernández, and G. Méndez, “Integration of the circular economy paradigm under the just and safe operating space narrative: Twelve operational principles based on circularity, sustainability and resilience,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 322, p. 129071, Nov. 2021.
- [32] C. Daraio, M. Lenzerini, C. Leporelli, P. Naggar, A. Bonaccorsi, and A. Bartolucci, “The advantages of an Ontology-Based Data Management approach: openness, interoperability and data quality,” *Scientometrics*, vol. 108, pp. 441–455, July 2016.
- [33] Q. Qi, D. Zhao, T. W. Liao, and F. Tao, “Modeling of cyber-physical systems and digital twin based on edge computing, fog computing and cloud computing towards smart manufacturing,” in *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2018): Volume 1: Additive Manufacturing; Bio and Sustainable Manufacturing*, American Society of Mechanical Engineers, Sept. 2018.
- [34] F.-A. Kemmner, H. Legenvre, and A.-P. Hameri, “Sharing data to implement the circular economy: the case of digital product passports,” *Industrial Management & Data Systems*, pp. 1–20, Sept. 2025. \_eprint: <https://www.emerald.com/imds/article-pdf/doi/10.1108/IMDS-04-2024-0403/10279655/imds-04-2024-0403en.pdf>.
- [35] M. Jäger-Roschko and M. Petersen, “Advancing the circular economy through information sharing: A systematic literature review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, p. 133210, Oct. 2022.
- [36] J. Ordieres-Meré, M. Gutierrez, and J. Villalba-Díez, “Toward the industry 5.0 paradigm: Increasing value creation through the robust integration of humans and machines,” *Computers in Industry*, vol. 150, p. 103947, Sept. 2023.

- [37] European Parliament, “Circular economy: definition, importance and benefits,” may 2023.
- [38] E. H. Grosse, F. Sgarbossa, C. Berlin, and W. P. Neumann, “Human-centric production and logistics system design and management: transitioning from Industry 4.0 to Industry 5.0,” *International Journal of Production Research*, vol. 61, pp. 7749–7759, Nov. 2023.
- [39] A. K. N. Shukla, “The product life cycle—analysis and applications issues,” *Indian Journal of Marketing*, vol. 35, 2005.
- [40] G. C. Stevens, “Integrating the supply chain,” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 19, pp. 3–8, 1989.
- [41] J. Cleland-Huang, O. C. Z. Gotel, and A. Zisman, “Software and systems traceability,” in *Springer London*, 2012.
- [42] A. Corallo, M. E. Latino, M. Menegoli, and P. Pontrandolfo, “A systematic literature review to explore traceability and lifecycle relationship,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, pp. 4789 – 4807, 2020.
- [43] K. Voulgaridis, T. Lagkas, C. M. Angelopoulos, A.-A. Boulogeorgos, V. Argyriou, and P. Sarigiannidis, “Digital product passports as enablers of digital circular economy: a framework based on technological perspective,” *Telecommunication Systems*, vol. 85, pp. 1–17, 01 2024.
- [44] OECD, *OECD Supply Chain Resilience Review: Navigating Risks*. Paris: OECD Publishing, 2025.
- [45] S. García Torres, L. Albareda, M. Rey-Garcia, and S. Seuring, “Traceability for sustainability – literature review and conceptual framework,” *Supply Chain Management*, vol. 24, 10 2018.
- [46] P. Wegner, “Interoperability,” in *CSUR*, 2018.
- [47] T. Moon, S. Fewell, and H. Reynolds, “The what, why, when and how of interoperability,” *Defense & Security Analysis*, vol. 24, pp. 17 – 5, 2008.
- [48] H. Panetto and A. Molina, “Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues,” *Computers in Industry*, vol. 59, 09 2008.
- [49] J. Barata, A. Cardoso, J. Haenisch, and M. Chaure, “Interoperability standards for circular manufacturing in cyber-physical ecosystems: a survey,” *Procedia Computer Science*, vol. 207, pp. 3320–3329, 10 2022.
- [50] Z. Panian, “Recent advances in data engineering and management,” in *IEEE ICT 2009*, 2009.
- [51] V. Khatri and C. Brown, “Designing data governance,” *Commun. ACM*, vol. 53, pp. 148–152, 01 2010.
- [52] B. Otto, “A morphology of the organisation of data governance,” in *Proceedings of the 19th European Conference on Information Systems (ECIS 2011)*, p. 1–12, June 2011. Paper 272 in ECIS2011 Proceedings.

- [53] F. J. Riggins and B. K. Klamm, “Data governance case at krausemcmahon llp in an era of self-service bi and big data,” *Journal of Accounting Education*, vol. 38, pp. 23–36, 2017. Special Issue on Big Data.
- [54] European Parliament and Council of the European Union, “Regulation (eu) 2022/868 on european data governance (data governance act).” Regulation of the European Parliament and of the Council, 30May2022, Official Journal L152/1 (3June2022), June 2022.
- [55] P. Bräutigam and T. K. LL.M, “Internet of things,” *Emerging Internet-Based Technologies*, 2019.
- [56] J. Y. Khan and M. R. Yuce, “Internet of things (iot),” *2019 2nd International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA)*, 2019.
- [57] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221–232, Dec. 2017.
- [58] Y. Kalmykova, M. Sadagopan, and L. Rosado, “Circular economy – from review of theories and practices to development of implementation tools,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 190–201, 2018. Sustainable Resource Management and the Circular Economy.
- [59] E. Taddei, C. Sassanelli, P. Rosa, and S. Terzi, “Circular supply chains theoretical gaps and practical barriers: A model to support approaching firms in the era of industry 4.0,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 190, p. 110049, Apr. 2024.
- [60] Ellen MacArthur Foundation, “Looping on data – best practices and barriers for sharing data in circular business models.” White paper/Report, 2022.
- [61] S. Vaezinejad, M. Kouhizadeh, D. Schniederjans, and J. Sarkis, “Digital technology and the circular economy: A theoretical perspective,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 206, p. 111225, Aug. 2025.
- [62] P. Pedrazzoli, M. Sorlini, D. Rovere, O. Lazaro, P. Malò, and M. Fiorello, “Challenges and Founding Pillars for a Manufacturing Platform to Support Value Networks Operating in a Circular Economy Framework,” *Applied Sciences*, vol. 12, p. 2995, Jan. 2022. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [63] R. Rasi, H. Ismail, M. Shahbaz, and V. P. Kaliani Sundram, “Interdisciplinary challenges in the circular supply chains: A systematic literature review,” *Heliyon*, vol. 9, p. e15225, 04 2023.
- [64] D. Masi, S. Day, and J. Godsell, “Supply chain configurations in the circular economy: A systematic literature review,” *Sustainability*, vol. 9, no. 9, 2017.
- [65] N. Bocken, I. Pauw, C. Bakker, and B. van der Grinten, “Product design and business model strategies for a circular economy,” *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 1015, 03 2016.
- [66] A. De Jesus and S. Mendonna, “Lost in transition? drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy,” *Ecological Economics*, vol. 145, pp. 75–89, 03 2018.

- [67] J. Kirchherr, L. Piscicelli, R. Bour, E. Kostense-Smit, J. Muller, A. Huibrechtse-Truijens, and M. Hekkert, “Barriers to the circular economy: Evidence from the european union (eu),” *Ecological Economics*, vol. 150, 08 2018.
- [68] J. Ordieres-Meré, M. Gutiérrez, and J. Villalba-Diez, “Toward the industry 5.0 paradigm: Increasing value creation through the robust integration of humans and machines ,” *Computers in Industry*, vol. 150, p. 103947, 05 2023.
- [69] N. K. Sharma, K. Govindan, K. K. Lai, W. K. Chen, and V. Kumar, “The transition from linear economy to circular economy for sustainability among SMEs: A study on prospects, impediments, and prerequisites,” *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, pp. 1803–1822, May 2021.
- [70] E. Negri, L. Fumagalli, M. Garetti, and L. Tanca, “Requirements and languages for the semantic representation of manufacturing systems,” *Computers in Industry*, vol. 81, pp. 55–66, Sept. 2016.
- [71] M. West, *Developing High Quality Data Models*. Morgan Kaufmann, 2011.
- [72] J. Walden, A. Steinbrecher, and M. Marinkovic, “Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy,” *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 93, no. 11, pp. 1717–1727, 2021. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cite.202100121>.
- [73] T. Adisorn, L. Tholen, and T. Götz, “Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy,” *Energies*, vol. 14, p. 2289, Apr. 2021.
- [74] C. Plociennik, M. Pourjafarian, A. Nazeri, W. Windholz, S. Knetsch, J. Rickert, A. Ciroth, A. d. C. Precci Lopes, T. Hagedorn, M. Vogelgesang, W. Benner, A. Gasmann, S. Bergweiler, M. Ruskowski, L. Schebek, and A. Weidenkaff, “Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 122–127, Jan. 2022.
- [75] D. Mulhall, A.-C. Ayed, J. Schroeder, K. Hansen, and T. Wautelet, “The product circularity data sheet—a standardized digital fingerprint for circular economy data about products,” *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3397, 2022.
- [76] B. Otto, “The Evolution of Data Spaces,” in *Designing Data Spaces* (B. Otto, M. Ten Hompel, and S. Wrobel, eds.), pp. 3–15, Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [77] J. Potting, M. P. Hekkert, E. Worrell, and A. Hanemaaijer, “Circular economy: Measuring innovation in the product chain,” Jan. 2017.
- [78] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757–768, Feb. 2017.
- [79] L. Chamberlin and G. Hopkins, “Introducing a circular economy.” CE-Hub “Demystifying Series”, April 2022.
- [80] C. Souza, A. Phillips, R. Scottorn, and A. Darvill, “The circular economy as an economic opportunity.” Special Report, L.E.K. Consulting, 2023.

- [81] F. Bonciu, “Is circular economy compatible with capitalism?,” *Romanian Economic Business Review*, vol. 15, no. 1, pp. 16–30, 2020.
- [82] D. Reike, W. J. Vermeulen, and S. Witjes, “The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 246–264, Aug. 2018.
- [83] F. Psarommatis and G. May, “Digital product passport: A pathway to circularity and sustainability in modern manufacturing,” *Sustainability*, 2024.
- [84] A. Canciani, C. Felicioli, F. Severino, and D. Tortola, “Enhancing supply chain transparency through blockchain product passports,” *2024 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, pp. 751–756, 2024.
- [85] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, and P. Ji, “Digital twin modeling,” *Journal of Manufacturing Systems*, 2022.
- [86] L.-T. Reiche, C. S. Gundlach, G. F. Mewes, and A. Fay, “The digital twin of a system: A structure for networks of digital twins,” *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8, 2021.
- [87] K. Kalaboukas, J. M. Rožanec, A. Košmerlj, D. C. Kyritsis, and G. Arampatzis, “Implementation of cognitive digital twins in connected and agile supply networks—an operational model,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 4103, 2021.
- [88] J. Lu, X. Zheng, A. Gharaei, K. Kalaboukas, and D. Kiritsis, “Cognitive twins for supporting decision-makings of internet of things systems,” *arXiv preprint*, 2019.
- [89] N. Zhang, R. Bahsoon, and G. Theodoropoulos, “Towards engineering cognitive digital twins with self-awareness,” *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 3891–3891, 2020.
- [90] I. Yitmen, S. Alizadehsalehi, Akner, and M. E. Akner, “An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management,” *Applied Sciences*, vol. 11, p. 4276, May 2021.
- [91] V. Bach, A. Lehmann, and M. Finkbeiner, “Product environmental footprint (pef) pilot phase — comparison with other environmental assessment tools,” *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2898, 2018.
- [92] International Organization for Standardization, “ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework,” 2006.
- [93] International Organization for Standardization, “ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines,” 2006.
- [94] V. Mordaschew, “The product environmental footprint — a critical review,” *Procedia Computer Science*, vol. 235, pp. 272–285, 2024.
- [95] G. Heath, A. Wade, P. Stolz, R. Frischknecht, and P. Sinha, “The product environmental footprint (pef) of photovoltaic modules — lessons learned from the

- environmental footprint pilot phase,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 26, no. 8, pp. 553–564, 2018.
- [96] L. Golsteijn, P. Masoni, S. Huysman, S. Sala, R. Pant, S. Fazio, E. M. Schau, and J. Cristobal, “Developing product environmental footprint category rules (pefers): Challenges and solutions,” *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 14, no. 5, pp. 577–589, 2018.
- [97] E. M. Schau, M. Traverso, and M. Finkbeiner, “Assessing product environmental performance with the pef methodology: Reliability, comparability, and cost concerns,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 8, pp. 1092–1105, 2016.
- [98] L. Zampori and R. Pant, “Suggestions for updating the product environmental footprint (pef) method,” *Publications Office of the European Union*, 2019.
- [99] M. Niero and M. Z. Hauschild, “Closing the loop for packaging: Life cycle assessment of recycled and recyclable plastic packaging,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, no. 3, pp. 715–726, 2017.
- [100] S. Sala and F. Farioli, “Life cycle assessment in the framework of circular economy: A systematic review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 68, pp. 1–15, 2013.
- [101] M. A. Curran, *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*. CRC Press, 2013.
- [102] S. Lasvaux, G. Habert, A. Passer, and K. Allacker, “Digitalization of lca data and interoperability challenges for circular economy,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 170, p. 105566, 2021.
- [103] European Commission, Joint Research Centre, “Environmental footprint methodology – relationship with iso standards,” tech. rep., Publications Office of the European Union, 2019.
- [104] T. Schulz, M. Reuter, and L. Brosinsky, “The asset administration shell as an interoperability framework for industrial data exchange,” *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1083–1088, 2021.
- [105] C. Felden, N. Weiner, S. Thiede, and C. Herrmann, “The asset administration shell as an enabler for sustainable manufacturing and circular economy,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 68, pp. 430–442, 2023.
- [106] S. Bader, M. Hoffmann, and U. Epple, “Semantic interoperability through the asset administration shell,” in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2021.
- [107] M. Grieves and J. Vickers, “Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems,” in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, eds.), pp. 85–113, Springer, 2017.
- [108] C. Ludwig, T. Reichel, F. Koenig, and C. Prinz, “Connecting digital product passports with asset administration shells for sustainable value chains,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 1258–1263, 2022.

- [109] Industrial Digital Twin Association (IDTA), “Specification of the asset administration shell part 1: Metamodel,” tech. rep., IDTA, 2023.
- [110] Industrial Digital Twin Association (IDTA), “Specification of the asset administration shell part 2: Application programming interfaces,” tech. rep., IDTA, 2023.
- [111] Industrial Digital Twin Association (IDTA), “Specification of the asset administration shell part 3a: Data specification,” tech. rep., IDTA, 2023.
- [112] Industrial Digital Twin Association (IDTA), “Specification of the asset administration shell part 5: Package file format (aasx),” tech. rep., IDTA, 2023.
- [113] European Commission, “Circular economy action plan - European Commission.”
- [114] M. Munta, “The European Green Deal: A game changer or simply a buzzword?,” 2020.
- [115] A. Hedberg and S. Šipka, “Towards a green, competitive and resilient eu economy: How can digitalisation help?,” Policy paper, European Policy Centre (EPC), Jul 2020.
- [116] T. Adisorn, L. Tholen, and T. Götz, “Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy,” *Energies*, vol. 14, p. 2289, Jan. 2021. Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [117] M. Honic, I. Kovacic, G. Sibenik, and H. Rechberger, “Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports,” *Journal of Building Engineering*, vol. 23, pp. 341–350, May 2019.
- [118] acatech / Circular Economy Initiative Deutschland / SYSTEMIQ, “Circular economy roadmap for germany.” White paper / Report, 2021.
- [119] T. Götz, T. Adisorn, and L. Tholen, “Der digitale produktpass als politik-konzept.” Wuppertal Report No. 20, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Mar. 2021.
- [120] C. Plociennik, M. Pourjafarian, S. Saleh, T. Hagedorn, A. do Carmo Precci Lopes, M. Vogelgesang, J. Baehr, B. Kellerer, M. Jansen, H. Berg, M. Ruskowski, L. Schebek, and A. Ciroth, “Requirements for a digital product passport to boost the circular economy,” in *INFORMATIK 2022 – Informatik in den Naturwissenschaften, 26.–30. September 2022, Hamburg*, pp. 1485–1494, Gesellschaft für Informatik, 2022.
- [121] C. Tucker and H. Kim, “Predicting emerging product design trend by mining publicly available customer review data,” in *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 2011): Impacting Society through Engineering Design, Vol. 6: Design Information and Knowledge*, pp. 43–52, Aug. 2011.
- [122] L. Eisemann, *Förderung des nachhaltigen Konsums durch digitale Produktinformationen: Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen*. Umweltbundesamt, Nov. 2020.
- [123] H. Berg, K. Le Blévenec, E. Kristoffersen, B. Strée, A. Witomski, N. Stein, T. Bastain, S. Ramesohl, and K. Vrancken, “Digital circular economy as a cornerstone of

- a sustainable european industry transformation.” White Paper, ECERA (European Circular Economy Research Alliance), Oct. 2020.
- [124] E. Eppinger, A. Jain, P. Vimalnath, A. Gurtoo, F. Tietze, and R. Hernandez Chea, “Sustainability transitions in manufacturing: the role of intellectual property,” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 49, pp. 118–126, Apr. 2021.
  - [125] International Organization for Standardization, “ISO 14020:2022 Environmental statements and programmes for products — Principles and general requirements,” 2022.
  - [126] International Organization for Standardization, “ISO 59004:2024 Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation,” 2024.
  - [127] International Organization for Standardization, “ISO 59010:2024 Circular economy — Guidance on the transition of business models and value networks,” 2024.
  - [128] International Organization for Standardization, “ISO 59020:2024 Circular economy — Measuring and assessing circularity performance,” 2024.
  - [129] International Organization for Standardization, “ISO 59040:2025 Circular economy — Product circularity data sheet,” 2025.
  - [130] International Organization for Standardization, “ISO 10303-49:1998 Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 49: Integrated generic resources: Process structure and properties,” 1998.
  - [131] International Electrotechnical Commission, “IEC 62264-1:2013 Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology,” 2013.
  - [132] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, “ISO/IEC 30141:2024 Internet of Things (IoT) — Reference architecture,” 2024.
  - [133] International Organization for Standardization, “ISO 22095:2020 Chain of custody — General terminology and models,” 2020.
  - [134] International Organization for Standardization, “ISO 8000-100:2016 Data quality — Part 100: Master data: Exchange of characteristic data: Overview,” 2016.
  - [135] D. Mulhall, A.-C. Ayed, J. Schroeder, K. Hansen, and T. Wautelet, “The Product Circularity Data Sheet—A Standardized Digital Fingerprint for Circular Economy Data about Products,” *Energies*, vol. 15, p. 3397, May 2022.
  - [136] Ministry of the Economy of Luxembourg, “Luxembourg circularity dataset standardization initiative: Creating a digital circularity fingerprint for products – phase 1, final report,” 2020.
  - [137] International Organization for Standardization, “ISO/TC 323 - Circular economy,” 2025.
  - [138] M. T. Delgado, “Eclipse AASX Package Explorer and Server | projects.eclipse.org,” Mar. 2022.
  - [139] Fraunhofer IOSB, “Fa<sup>3</sup>st ecosystem: Ai-supported development and use of asset administration shells (aas).” Online project description, Fraunhofer IOSB, 2024.

- [140] Fraunhofer IOSB, “Fa<sup>3</sup>st service — documentation.” Online documentation, FA<sup>3</sup>ST Service (Eclipse FA<sup>3</sup>ST / Fraunhofer IOSB), 2025.
- [141] NOVA School of Science and Technology, “Home – nova school of science and technology: Estudantes internacionais.” <https://studyatfctnova.fct.unl.pt/pt/home-pt/>, 2024.
- [142] NOVA School of Science and Technology, “Novaas collection / novaas catalog – nova asset administration shell (aas).” GitLab repository, 2025.
- [143] lpaiva, “NOVA Asset Administration Shell [NI-SERV-2020-57],” June 2021.
- [144] Eclipse AASPortal project, “Aasportal – web portal for the visualization and management of asset administration shells (aas).” GitHub repository, 2025.
- [145] Eclipse BaSyx Project, “Basyx wiki – eclipse basyx™.” Online documentation, Eclipse BaSyx, 2025.
- [146] B. Otto, “Quality and Value of the Data Resource in Large Enterprises,” *Information Systems Management*, vol. 32, pp. 234–251, July 2015. Publisher: Taylor & Francis. eprint: <https://doi.org/10.1080/10580530.2015.1044344>.
- [147] M. Gabellini, L. Civolani, M. Ronchi, L. D. Naldi, and A. Regattieri, “Data Spaces in Manufacturing and Supply Chains: A Review and Insights from European Initiatives,” *Applied Sciences*, vol. 15, p. 5802, Jan. 2025. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [148] F. Möller, I. Jussen, V. Springer, A. Gieß, J. C. Schweihoff, J. Gelhaar, T. Guggenberger, and B. Otto, “Industrial data ecosystems and data spaces,” *Electronic Markets*, vol. 34, p. 41, Aug. 2024.
- [149] A. Gieß, J. Neumann, I. Jussen, and J. Schweihoff, “Green data, green future? how data spaces enable the product carbon footprint calculation for the automotive industry: A case study on catena-x,” in *INFORMATIK 2024 – Nachhaltige Wertschöpfungssysteme (NaWerSys IV)*, 24.–26. September 2024, Wiesbaden, pp. 1799–1812, Gesellschaft für Informatik (GI), 2024.
- [150] M. Bacco, A. Kocian, S. Chessa, A. Crivello, and P. Barsocchi, “What are data spaces? systematic survey and future outlook,” *Data in Brief*, vol. 57, p. 110969, 2024.
- [151] A. Nizamis, P. Gkonis, D. Ioannidis, A. Ntafalias, D. Tzouvaras, and P. Trakadas, “Manufacturing data spaces applications in europe - a survey,” *Data in Brief*, vol. 63, p. 112149, 2025.
- [152] European Parliament and Council of the European Union, “Directive (eu) 2022/2464 on corporate sustainability reporting.” Official Journal of the European Union, L322/15, Dec. 2022.
- [153] European Parliament and Council of the European Union, “Regulation (eu) 2020/852 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment.” Official Journal of the European Union, L 198/13–43, June 2020.
- [154] P. Singh, F. Syed, and G. Sinha, “Categorization of losses across supply chains: Cases of manufacturing firms,” 2012.

- [155] International Organization for Standardization, “ISO 14001:2015 SME success package — Environmental management system implementation,” 2015.
- [156] PRODUTECH R3, “Agenda mobilizadora da fileira das tecnologias de produção para a reindustrialização.” Website of PRODUTECH R3, 2022.
- [157] PRODUTECH R3, “Programa transformador wp8 - c: Sistemas de produção interoperáveis, inteligentes e autónomos (digital autonomous factory).” Projeto/website PRODUTECH R3, 2025.
- [158] A. Hevner, A. R, S. March, S. T, Park, J. Park, Ram, and Sudha, “Design science in information systems research,” *Management Information Systems Quarterly*, vol. 28, pp. 75–, 03 2004.
- [159] H. Göbel and S. Cronholm, “Design science research in action - experiences from a process perspective,” in *Proceedings of the IT Artefact Design Workpractice Intervention Conference, Barcelona, 10 June 2012*, 2012.