FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Governança e Gestão de Dados em Contextos Industriais IT/OT: Proposta e Aplicação de uma Framework

Maria Leal Pinho



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor António Lucas Soares

31 de julho de 2026

© Maria Leal Pinho, 2026

Governança e Gestão de Dados em Contextos Industriais IT/OT: Proposta e Aplicação de uma Framework

Maria Leal Pinho

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

31 de julho de 2026

Resumo

A digitalização da indústria tem aumentado a quantidade e a diversidade dos dados produzidos por sistemas de *Information Technology* (IT) e de *Operational Technology* (OT). Contudo, sistemas distintos podem representar a mesma realidade através de identificadores, unidades, definições e regras de cálculo diferentes. A integração técnica não elimina estas divergências, que podem comprometer a interpretação e a utilização consistente dos dados.

Neste contexto, a presente dissertação propõe uma framework de governança e gestão de dados para ambientes industriais em que coexistem sistemas de IT e de OT. A proposta é independente de tecnologias específicas e articula as decisões de governança com os mecanismos utilizados para as executar. A metodologia parte de um problema ou objetivo organizacional, define o âmbito relevante, avalia as condições existentes com base em evidência observável e orienta o tratamento das lacunas identificadas.

A framework foi aplicada a um caso de uso industrial simplificado, centrado na representação de dados de desempenho produtivo no módulo *Material Requirements Planning* (MRP) do Odoo e no sistema da Critical Manufacturing. As duas implementações foram comparadas através do indicador *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). Os resultados mostram que os sistemas podem apresentar o mesmo valor final através de modelos semanticamente distintos, originando um falso positivo de interoperabilidade. A análise confirmou ainda que essa coincidência depende do cenário observado.

O diagnóstico atribuiu a divergência à consistência semântica, e não à qualidade dos dados. O tratamento incluiu a formalização das fontes, o mapeamento das representações dos sistemas e a construção de uma representação comum do indicador.

Conclui-se que a integração técnica entre sistemas industriais não assegura, por si só, uma interpretação comum dos dados. A framework proposta permite diagnosticar as condições existentes e orientar as ações necessárias para uma utilização consistente, fiável e rastreável dos dados.

Palavras-chave: governança de dados; gestão de dados; interoperabilidade semântica; convergência IT/OT; maturidade; OEE; Indústria 4.0.

Abstract

The digitalisation of industry has increased the volume and diversity of data produced by *Information Technology* (IT) and *Operational Technology* (OT) systems. However, different systems may represent the same reality through different identifiers, units, definitions and calculation rules. Technical integration does not eliminate these divergences, which may compromise the consistent interpretation and use of data.

In this context, this dissertation proposes a data governance and management framework for industrial environments in which IT and OT systems coexist. The proposal is independent of specific technologies and links governance decisions to the mechanisms used to implement them. The methodology starts from an organisational problem or objective, defines the relevant scope, evaluates the existing conditions based on observable evidence and guides the treatment of the identified gaps.

The framework was applied to a simplified industrial use case focused on the representation of production performance data in the *Material Requirements Planning* (MRP) module of Odoo and the Critical Manufacturing system. The two implementations were compared using *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). The results show that the systems may produce the same final value through semantically different models, resulting in a false positive of interoperability. The analysis also confirmed that this agreement depends on the observed scenario.

The diagnosis attributed the divergence to semantic consistency rather than data quality. The treatment included the formalisation of the data sources, the mapping of the system representations and the construction of a common representation of the indicator.

It is concluded that technical integration between industrial systems does not, by itself, ensure a common interpretation of data. The proposed framework supports the diagnosis of the existing conditions and guides the actions required for the consistent, reliable and traceable use of data.

Keywords: data governance; data management; semantic interoperability; IT/OT convergence; maturity; OEE; Industry 4.0.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas constituem uma referência global para alcançar um futuro mais sustentável. Os dezassete objetivos[1] procuram responder a desafios sociais, económicos e ambientais, incluindo a redução da pobreza, a igualdade, a produção sustentável, a inovação e a proteção do ambiente.

Neste contexto, a presente dissertação relaciona-se sobretudo com o ODS 8 (Trabalho Digno e Crescimento Económico), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestruturas) e o ODS 12 (Produção e Consumo Sustentáveis).

O contributo do trabalho para estes objetivos é maioritariamente de natureza habilitadora. A dissertação não propõe uma intervenção que reduza diretamente o consumo de recursos ou a produção de resíduos, mas uma framework de governança e gestão de dados que apoia a definição de responsabilidades, fontes autoritativas, significados comuns, requisitos de qualidade e mecanismos de rastreabilidade entre sistemas.

Ao permitir diagnosticar e tratar as condições necessárias para que um indicador como o Overall Equipment Effectiveness (OEE) seja interpretado de forma inequívoca entre sistemas industriais distintos, o trabalho estabelece uma condição prévia para que a medição da eficiência constitua uma base fiável de decisão. Dados governados e coerentes podem apoiar decisões de produção mais informadas, uma utilização mais eficiente dos recursos e uma industrialização digital mais robusta e menos dependente de reconciliações manuais.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável considerados nesta dissertação têm as seguintes designações:

ODS 8 Promover o crescimento económico inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos.

ODS 9 Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.

ODS 12 Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis.

A relação entre o trabalho e algumas metas destes objetivos encontra-se sistematizada na tabela seguinte. Os indicadores apresentados têm natureza exemplificativa e destinam-se a apoiar a avaliação do contributo da framework em futuras aplicações realizadas em contextos industriais reais.

[1] https://sdgs.un.org/goals

ODS	Meta	Contributo	Indicadores exemplificativos de acompanhamento
8	8.2	A framework pode apoiar ganhos de produtividade ao assegurar que os indicadores utilizados nas decisões operacionais, como o OEE, possuem uma definição de referência aprovada e uma fonte autoritativa designada. Deste modo, a medição da eficiência pode constituir uma base mais credível para ações de melhoria contínua.	Número de conceitos com definição de referência aprovada e responsável atribuído; redução das divergências entre indicadores reportados por sistemas distintos; redução do tempo necessário para reconciliar um indicador entre sistemas.
9	9.5	A dissertação constitui um contributo de investigação para a governança e a gestão de dados industriais, ao propor uma framework independente de sistemas e tecnologias específicos e um método de reconciliação semântica assente no mapeamento entre representações e na construção de uma representação comum. A proposta poderá ser aplicada a outros indicadores e pares de sistemas.	Aplicação do método a indicadores distintos do OEE; aplicação da framework a outros pares de sistemas; número de artefactos documentados e passíveis de reutilização, como o glossário, o catálogo de metadados, o mapeamento e a representação comum.
12	12.2	A disponibilidade de dados consistentes sobre a disponibilidade, o desempenho e a qualidade dos recursos produtivos constitui uma condição prévia para a identificação de perdas e para a definição de ações orientadas para uma utilização mais eficiente dos recursos. A framework contribui para esta condição ao reduzir ambiguidades nas medições utilizadas para apoiar essas decisões.	Consistência das componentes do OEE após reconciliação; número de divergências identificadas nas fronteiras temporais ou nas regras de cálculo; utilização dos dados reconciliados na identificação de perdas produtivas.
	12.5	Ao governar o modo como o refugo e as unidades não conformes são representados, o trabalho torna explícita a perda de qualidade registada por cada sistema. Esta consistência não reduz diretamente a produção de resíduos, mas cria condições para a sua monitorização e para a definição posterior de ações de prevenção e redução.	Rastreabilidade entre o registo de refugo e a componente de qualidade do indicador; proporção de unidades não conformes representadas de forma consistente entre sistemas; utilização dos dados reconciliados em ações de monitorização e redução do refugo.

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor António Lucas Soares, à Professora Carla Pereira e ao Professor Cristovão Sousa pela orientação, disponibilidade e acompanhamento ao longo desta dissertação. As suas sugestões, questões e perspetivas foram essenciais para a evolução do trabalho e para ultrapassar as dificuldades que foram surgindo.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a todos os professores que contribuíram para a minha formação ao longo deste percurso. Os conhecimentos adquiridos, os desafios enfrentados e as experiências vividas durante estes anos tiveram um papel fundamental no meu crescimento académico e pessoal.

À minha família, agradeço profundamente o apoio, a paciência e a confiança incondicionais. Obrigada por acreditarem sempre em mim, mesmo nos momentos em que eu própria tive dúvidas, e por me lembrarem de que nenhum resultado é mais importante do que o caminho percorrido.

Aos meus amigos e colegas, obrigada pela companhia, pelos conselhos, pelos desabafos e por todos os momentos que tornaram este percurso mais leve. A vossa presença foi essencial, sobretudo durante os períodos mais exigentes.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de diferentes formas, fizeram parte desta etapa. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada momento partilhado contribuíram para que fosse possível chegar até aqui.

Maria Leal Pinho

Conteúdo

Agradecimentos v

Lista de Acrónimos x

1 Introdução 1
- 1.1 Contexto e motivação . . . 1
- 1.2 Questões de investigação e objetivos . . . 3
- 1.3 Contributos . . . 4
- 1.4 Estrutura da dissertação . . . 6

2 Estado da Arte 7
- 2.1 Heterogeneidade do panorama de sistemas de informação industriais . . . 7
- 2.2 Interoperabilidade e integração de sistemas industriais . . . 9
- 2.3 Interoperabilidade semântica e ontologias . . . 12
- 2.4 Governança e gestão de dados . . . 14
- 2.5 Qualidade dos dados e princípios FAIR . . . 17
- 2.6 Modelos de maturidade em governança de dados . . . 19
- 2.7 Governança de dados na Indústria 4.0 e síntese . . . 23

3 Metodologia de Investigação 27
- 3.1 Artefacto e processo de investigação . . . 27
- 3.2 Demonstração e avaliação . . . 28

4 Framework de Governança e Gestão de Dados para Contextos Industriais 30
- 4.1 Base conceptual . . . 30
- 4.2 Apresentação da framework . . . 34
  - 4.2.1 Estrutura conceptual e princípios . . . 36
  - 4.2.2 Metodologia de aplicação . . . 43
- 4.3 Diagnóstico, avaliação da maturidade e evolução . . . 47
  - 4.3.1 Critérios de diagnóstico e avaliação da maturidade . . . 47
  - 4.3.2 Lacunas e orientação da evolução . . . 51

5 Aplicação e Demonstração da Framework num Caso de Uso Industrial 54
- 5.1 Caracterização e estratégia do caso de uso . . . 55
- 5.2 Identificação do problema e definição do âmbito . . . 56
  - 5.2.1 Identificação do problema ou objetivo . . . 57
  - 5.2.2 Definição do âmbito . . . 58
- 5.3 Preparação do cenário . . . 61
  - 5.3.1 Definição do cenário produtivo comum . . . 61

5.3.2 Reprodução do cenário nas duas implementações 62
5.4 Diagnóstico e tratamento das lacunas 66
5.4.1 Diagnóstico e avaliação da maturidade 66
5.4.2 A divergência na decomposição do OEE 69
5.4.3 Seleção e tratamento das lacunas 73
5.4.4 Recálculo do OEE na representação comum 76
5.5 Avaliação da eficácia e síntese do caso de uso 78

6 Conclusões e Trabalho Futuro **81**
6.1 Conclusões 81
6.2 Síntese dos contributos 83
6.3 Limitações 84
6.4 Trabalho futuro 85

Referências **86**

Lista de Figuras

2.1 Representação heterogénea de uma entidade em sistemas distintos 9
2.2 Hierarquia de níveis da norma ISA-95 e a fronteira entre produção e gestão . . . 11
2.3 Áreas funcionais da gestão de dados com a governança ao centro 16

4.1 Estrutura conceptual da framework. 35
4.2 Detalhe dos princípios da framework. 42
4.3 Metodologia de aplicação da framework. 44

5.1 Linha temporal da janela de produção do cenário. 62
5.2 Registo dos tempos da operação no Odoo MRP. 64
5.3 Decomposição do OEE no Critical Manufacturing MES. 66
5.4 Dois modelos distintos de construção do OEE. 73

Lista de Tabelas

2.1 Posicionamento das principais linhas de investigação 25

3.1 Fases da investigação e correspondência com os capítulos. 28

4.1 Derivação dos princípios a partir das áreas funcionais. 32
4.2 Funções da estrutura organizacional da framework. 36
4.3 Natureza de governança e de gestão dos princípios. 39
4.4 Cadeia de operacionalização da framework. 43
4.5 Atividades da metodologia de aplicação. 45
4.6 Condições de avaliação dos princípios. 49
4.7 Classificação da maturidade dos princípios. 50
4.8 Orientação associada à classificação dos princípios. 52

5.1 Caracterização geral do caso de uso. 56
5.2 Ficha de identificação do problema ou objetivo. 58
5.3 Âmbito definido para a aplicação da framework. 60
5.4 Parâmetros do cenário produtivo comum. 62
5.5 Distribuição da janela de produção pelos estados do recurso no Critical Manufacturing MES. 64
5.6 Componentes do OEE apresentadas pelo Critical Manufacturing MES. 65
5.7 Guião de diagnóstico aplicado a cada princípio. 67
5.8 Perfil de maturidade dos princípios no caso de uso. 69
5.9 Divergências na construção do OEE entre as duas implementações. 70
5.10 Efeito da introdução de 20 minutos de espera sobre o indicador. 71
5.11 Priorização e decisão sobre as lacunas identificadas. 74
5.12 Excerto do glossário de negócio (contexto). 74
5.13 Excerto do catálogo de metadados técnicos. 75
5.14 Mapeamento entre as definições de referência e as representações. 75
5.15 Estrutura da representação comum do indicador. 76
5.16 Recálculo do OEE na representação comum. 77
5.17 Verificação da condição de sucesso após a intervenção. 78

Lista de Acrónimos

AAS	*Asset Administration Shell*
B2MML	*Business To Manufacturing Markup Language*
CMM	*Capability Maturity Model*
CMMS	*Computerized Maintenance Management System*
DAMA-DMBOK	*Data Management Body of Knowledge*
DCAM	*Data Management Capability Assessment Model*
ERP	*Enterprise Resource Planning*
FAIR	*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*
IIoT	*Industrial Internet of Things*
IIRA	*Industrial Internet Reference Architecture*
IoT	*Internet of Things*
IT	*Information Technology*
KPI	*Key Performance Indicators*
MES	*Manufacturing Execution System*
MRP	*Material Requirements Planning*
NIST	*National Institute of Standards and Technology*
OEE	*Overall Equipment Effectiveness*
OT	*Operational Technology*
PLM	*Product Lifecycle Management*
QMS	*Quality Management System*
RAMI 4.0	*Reference Architectural Model Industrie 4.0*
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition*
WMS	*Warehouse Management System*
XML	*Extensible Markup Language*

Capítulo 1

Introdução

A digitalização da indústria conduziu à coexistência de múltiplos sistemas de *Information Technology* (IT) e de *Operational Technology* (OT) que produzem, transformam e utilizam dados sobre os mesmos processos industriais. Embora estes sistemas possam estar tecnicamente integrados, nem sempre representam a realidade através das mesmas definições, unidades, granularidades ou regras de utilização. Daqui resultam dificuldades de interpretação que comprometem a utilização transversal dos dados no apoio à decisão.

Perante este problema, a presente dissertação propõe uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais. A proposta apoia a identificação, o diagnóstico e o tratamento de lacunas relacionadas com cinco princípios: responsabilização explícita, fonte autoritativa, consistência semântica, qualidade dos dados e rastreabilidade dos dados.

O problema analisado não se limita, por isso, à capacidade técnica de trocar dados. A utilização consistente da informação exige decisões organizacionais que determinem quem possui autoridade sobre os dados, que fontes devem ser utilizadas, que significado é reconhecido e que condições devem ser asseguradas ao longo do seu ciclo de vida. Exige, além disso, que essas decisões se traduzam efetivamente nos mecanismos utilizados no dia a dia, questão que constitui o objeto central desta dissertação.

Este capítulo apresenta o contexto e a motivação da investigação, formula as questões e os objetivos do trabalho, identifica os principais contributos e descreve a estrutura da dissertação.

1.1 Contexto e motivação

A transformação digital da indústria generalizou a utilização de sensores, equipamentos inteligentes, sistemas de controlo, aplicações de supervisão, sistemas de execução da produção e plataformas de gestão empresarial. Estes elementos produzem e utilizam dados nos diferentes níveis da organização, reforçando a ligação entre os processos físicos e os sistemas computacionais que os suportam [1], [2].

Esta evolução aumentou a disponibilidade de dados e criou novas possibilidades de monitorização, automatização e apoio à decisão. Originou, contudo, ambientes industriais heterogéneos,

nos quais coexistem sistemas desenvolvidos para finalidades distintas e suportados por modelos de dados próprios. Cada sistema representa a realidade de acordo com os processos que suporta, a escala temporal em que opera, o nível de detalhe de que necessita e as convenções adotadas na sua implementação [3].

Consequentemente, os dados associados ao mesmo equipamento, processo, evento ou resultado podem apresentar identificadores, unidades, granularidades, categorias ou regras de cálculo diferentes. A informação necessária para compreender uma situação encontra-se ainda distribuída por várias fontes, sendo produzida num sistema, transformada noutro e posteriormente utilizada em decisões operacionais ou organizacionais [4].

A integração entre sistemas procura responder a esta fragmentação através de mecanismos de ligação e troca de dados. No entanto, a existência de conectividade e de formatos compatíveis não garante uma interpretação comum. Dois sistemas podem trocar corretamente um valor e associá-lo a definições, períodos, unidades ou condições de utilização diferentes. A interoperabilidade técnica e sintática constitui, assim, uma condição necessária, mas não suficiente, para assegurar a utilização coerente dos dados [5], [6].

A interoperabilidade semântica procura reduzir estas ambiguidades através da explicitação e do alinhamento do significado dos dados. Contudo, a resolução do problema não depende apenas da criação de correspondências entre representações. Mesmo quando os significados se encontram documentados, permanece necessário determinar quem os pode aprovar, qual é a fonte autoritativa, como são tratadas as divergências, que requisitos de qualidade devem ser cumpridos e como pode ser reconstruída a origem dos dados.

Estas decisões pertencem ao domínio da governança de dados, que estabelece os direitos de decisão, as responsabilidades, as políticas e os mecanismos de supervisão que orientam a gestão e a utilização dos dados [7], [8], [9]. A governança distingue-se, portanto, da execução técnica das atividades de gestão. Enquanto a gestão de dados concretiza operações como a recolha, o armazenamento, a transformação e a validação, a governança determina o que deve ser assegurado, segundo que regras e sob a responsabilidade de quem.

A qualidade dos dados constitui uma dimensão relevante deste problema, mas não o esgota. Dados completos, atuais e tecnicamente válidos podem continuar a produzir interpretações divergentes quando são utilizados segundo definições ou regras distintas. De igual modo, uma definição comum não garante que os valores sejam adequados à finalidade prevista ou que seja possível reconstruir a sua origem. Torna-se, por isso, necessário articular consistência semântica, qualidade e rastreabilidade num mesmo enquadramento, que relacione as decisões tomadas sobre os dados com os mecanismos utilizados para as executar [10], [11].

A configuração da governança deve ainda considerar o contexto da organização. As responsabilidades, os processos e os mecanismos necessários dependem, entre outros fatores, do setor, da dimensão da organização, dos sistemas existentes, dos riscos envolvidos e do problema que se pretende resolver. A governança não deve, por esse motivo, ser aplicada através de uma estrutura uniforme, mas adaptada às capacidades e às necessidades existentes [12].

As propostas de governança de dados para a Indústria 4.0 fornecem contributos relevantes para a definição de estruturas organizacionais, papéis, artefactos e áreas de decisão [13], [14]. Contudo, a análise realizada no estado da arte evidencia que estas propostas mantêm agregadas, num mesmo juízo por domínio, a decisão de governança e a sua execução. Daqui decorrem duas limitações para o problema aqui tratado. A primeira é que a avaliação não distingue uma decisão aprovada que nenhum mecanismo materializa de um mecanismo em utilização que nenhuma decisão sustenta, apesar de estas duas situações exigirem intervenções opostas. A segunda é que permanece menos desenvolvida a ligação operacional entre uma necessidade concreta da organização, o diagnóstico das condições existentes, a identificação das lacunas relevantes e a definição das medidas necessárias para as tratar.

É nesta ligação que se posiciona a presente dissertação. A framework proposta articula deliberadamente dois níveis: o de decisão, de natureza de governança, que estabelece o que deve ser assegurado sobre os dados e quem tem autoridade para o decidir; e o de execução, de natureza de gestão, que concretiza essas decisões através de atividades, artefactos e registos que produzem evidência. O objeto da proposta não é nenhum destes níveis isoladamente, mas a correspondência entre ambos, porque é habitualmente aí, e não na ausência de governança, que o problema industrial se produz.

A aplicação parte de um problema ou objetivo organizacional, delimita os dados, processos, sistemas e intervenientes relevantes, avalia separadamente os dois níveis de cada princípio e orienta a definição das políticas, dos processos e das práticas necessários para tratar as lacunas identificadas. A intervenção é, deste modo, orientada pelo diagnóstico e preserva os mecanismos existentes quando estes se mostram adequados.

A proposta é demonstrada através de um caso de uso industrial simplificado, centrado em dados de desempenho produtivo representados por duas implementações independentes utilizadas para analisar o mesmo processo e o mesmo indicador. O caso permite observar diferenças entre as representações, aplicar a metodologia proposta e verificar de que forma a framework apoia a construção de uma interpretação comum, sem limitar a sua aplicação a um indicador, sistema ou tecnologia específicos. Tratando-se de um cenário construído para a demonstração, o caso estabelece a aplicabilidade e o valor analítico da proposta num âmbito delimitado, e não a sua validação em condições operacionais reais, distinção retomada no Capítulo 5.

1.2 Questões de investigação e objetivos

A partir do problema identificado, a investigação é orientada pela seguinte questão principal:

> Como pode uma framework de governança e gestão de dados apoiar o diagnóstico e o tratamento das condições necessárias para que os dados sejam utilizados de forma consistente, fiável e rastreável em contextos industriais onde coexistem sistemas de IT e de OT?

Desta questão principal decorrem três questões específicas:

QI1: Que princípios e responsabilidades devem estruturar uma framework de governança e gestão de dados aplicável a contextos industriais heterogéneos, e a partir de que critério podem ser derivados?

QI2: Como podem esses princípios ser operacionalizados e avaliados, distinguindo o nível de decisão do nível de execução, através de políticas, processos, práticas e evidências observáveis?

QI3: Como pode a aplicação da framework ligar uma necessidade organizacional ao diagnóstico das condições existentes e à definição das ações de melhoria adequadas às lacunas identificadas?

O objetivo geral desta dissertação consiste em desenvolver uma framework de governança e gestão de dados, independente de sistemas e tecnologias específicos, que apoie as organizações industriais no diagnóstico e na melhoria das condições necessárias para a utilização consistente, fiável e rastreável dos dados. Este objetivo geral desdobra-se em quatro objetivos específicos:

O1: Definir uma estrutura conceptual de governança e gestão assente em princípios derivados das áreas funcionais identificadas como relevantes para contextos industriais, distinguindo a dimensão de governança dos domínios governados e delimitando explicitamente o que fica fora do âmbito da proposta.

O2: Operacionalizar cada princípio através de políticas, processos e práticas e definir critérios de avaliação que verifiquem separadamente o nível de decisão e o nível de execução, com base em evidência observável.

O3: Definir uma metodologia de aplicação que ligue uma necessidade organizacional ao diagnóstico das condições existentes, à identificação e priorização das lacunas e à avaliação da eficácia das ações implementadas.

O4: Demonstrar a aplicação da framework num caso de uso industrial e analisar a sua utilidade na deteção e no tratamento de divergências entre representações utilizadas por sistemas distintos.

Os objetivos O1 a O3 respondem, respetivamente, às questões QI1, QI2 e QI3 e são concretizados no Capítulo 4. O objetivo O4 corresponde à demonstração realizada no Capítulo 5, que permite verificar o comportamento da proposta perante um problema concreto. A caracterização dos desafios dos ambientes industriais heterogéneos e a análise das limitações da integração técnica e da interoperabilidade semântica, embora necessárias ao trabalho, constituem fundamentação e não objetivos autónomos, sendo tratadas no Capítulo 2.

1.3 Contributos

A presente dissertação apresenta quatro contributos principais.

1. **Uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais.**

   A proposta organiza-se em torno de cinco princípios, derivados das áreas funcionais identificadas como relevantes para estes contextos: responsabilização explícita, fonte autoritativa, consistência semântica, qualidade dos dados e rastreabilidade dos dados. O primeiro corresponde à dimensão de governança, ao fixar os direitos de decisão sobre os dados, e os restantes correspondem a domínios governados, cada um assegurado a um nível de decisão e a um nível de execução. A framework estabelece ainda um critério explícito de fronteira entre a consistência semântica e a qualidade dos dados, que permite distinguir as divergências que residem nos valores das que residem nas definições que os produzem. A proposta é independente de tecnologias específicas e o seu âmbito é definido a partir do problema ou objetivo da organização.

2. **Um mecanismo de avaliação que separa a decisão da sua execução.**

   Cada princípio é concretizado através de políticas, processos e práticas, cadeia que liga a decisão de governança aos mecanismos de gestão que a executam e produzem evidência. A avaliação verifica os dois níveis separadamente e só depois a coerência entre eles, o que permite distinguir quatro situações que uma classificação agregada confundiria: a decisão aprovada e materializada, a decisão que nenhum mecanismo concretiza, o mecanismo em utilização que nenhuma decisão sustenta e a ausência de ambos. Esta distinção não é apenas descritiva, uma vez que cada situação determina uma intervenção diferente.

3. **Uma metodologia de aplicação orientada pelo diagnóstico.**

   A metodologia liga a identificação de uma necessidade organizacional à definição do âmbito, ao diagnóstico das condições existentes, à priorização das lacunas, à implementação das ações de melhoria e à avaliação da respetiva eficácia, mantida distinta da evolução das classificações de maturidade. Esta abordagem permite concentrar a intervenção nos princípios com lacunas e, dentro de cada um, apenas no nível em falta, preservando os mecanismos já adequados.

4. **A identificação do falso positivo de interoperabilidade.**

   A aplicação da framework a um caso em que dois sistemas representam o mesmo processo produtivo revela uma situação em que ambos produzem o mesmo valor agregado a partir de modelos semanticamente incompatíveis. A coincidência do resultado satisfaz o teste habitual de comparação sem que a condição que esse teste pretende verificar se encontre satisfeita, pelo que a incompatibilidade se manifesta como concordância e não como erro. O caso mostra ainda que esta coincidência depende dos acontecimentos observados e não dos modelos, e que o diagnóstico da framework identifica a condição em falta independentemente de esta se manifestar, ou não, no valor produzido.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos.

O presente capítulo apresenta o contexto e a motivação da investigação, formula as questões de investigação, define os objetivos e identifica os principais contributos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte e a fundamentação conceptual da dissertação. Caracteriza a heterogeneidade dos sistemas de informação industriais, distingue os diferentes níveis de interoperabilidade e analisa o problema da interoperabilidade semântica. Discute ainda a governança e a gestão de dados, a qualidade dos dados, os princípios *Findable, Accessible, Interoperable, Reusable* (FAIR) e os modelos de maturidade, e identifica as áreas funcionais relevantes para contextos industriais, a partir das quais os princípios da proposta são posteriormente derivados. Por fim, posiciona as principais linhas de investigação relacionadas e identifica a lacuna a que o trabalho procura responder.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia de investigação adotada. Justifica a escolha de uma abordagem orientada à conceção, identifica o artefacto desenvolvido e organiza o percurso seguido para a sua conceção, demonstração e avaliação. Distingue ainda a metodologia de investigação da metodologia de aplicação integrada na framework e explicita o alcance da demonstração realizada.

O Capítulo 4 apresenta a framework de governança e gestão de dados proposta. Estabelece a sua base conceptual e o argumento que sustenta a articulação entre o nível de decisão e o nível de execução, deriva os princípios das áreas funcionais identificadas e delimita o que fica fora do âmbito. Descreve em seguida a estrutura organizacional e os princípios que a constituem, incluindo o critério que separa a consistência semântica da qualidade dos dados, e apresenta a cadeia de operacionalização que liga a decisão à execução. Termina com a metodologia de aplicação, os critérios de diagnóstico e de avaliação da maturidade e a forma como as lacunas identificadas orientam a evolução.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação e a demonstração da framework num caso de uso industrial. Caracteriza o cenário, formaliza o problema e o âmbito da aplicação, define um cenário produtivo comum e reproduz o mesmo processo em dois sistemas independentes. Com base nessa reprodução, realiza o diagnóstico dos princípios nos dois níveis, examina a divergência observada na construção do indicador, considera e afasta a hipótese de esta se dever a uma configuração incorreta e verifica, através de um ensaio contrafactual, que a coincidência dos valores agregados depende do cenário e não dos modelos. Por fim, trata as lacunas identificadas, recalcula o indicador numa representação comum, avalia a eficácia da intervenção e discute o alcance da demonstração realizada.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação. Retoma as questões de investigação e os objetivos definidos, sintetiza os principais contributos, identifica as limitações do trabalho e apresenta possibilidades de desenvolvimento futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo estabelece o enquadramento teórico e o estado da investigação em que assenta a framework proposta nesta dissertação. A revisão é organizada como um percurso conceptual que parte da heterogeneidade dos sistemas industriais e avança até às condições organizacionais necessárias para governar e utilizar os dados de forma consistente. Começa-se por caracterizar o panorama de sistemas de informação industriais e por mostrar como a sua diversidade origina divergências na representação dos dados (Secção 2.1). De seguida, analisa-se a interoperabilidade entre esses sistemas, argumentando que a integração técnica e sintática, embora apoiada por normas e soluções relativamente maduras, não basta para garantir a partilha de significado (Secção 2.2), e aprofunda-se o desafio da interoperabilidade semântica (Secção 2.3). Esse argumento conduz à governança de dados, entendida como a disciplina que enquadra as decisões sobre definição, responsabilidade e utilização dos dados (Secção 2.4), às dimensões da qualidade dos dados e aos princípios FAIR, aqui tratados como orientação complementar para a partilha e reutilização dos dados (Secção 2.5), e aos modelos de maturidade, incluindo a maturidade da governança, da convergência IT/OT e da preparação dos dados (Secção 2.6). Estes modelos são analisados quanto ao modo como avaliam a maturidade e quanto à granularidade que alcançam. Por fim, estes elementos são reunidos no contexto da Indústria 4.0 para posicionar o trabalho existente e delimitar a lacuna de investigação a que esta dissertação procura responder (Secção 2.7).

2.1 Heterogeneidade do panorama de sistemas de informação industriais

O ponto de partida desta revisão é o reconhecimento de que uma instalação industrial moderna não assenta num único sistema de informação, mas num conjunto numeroso e heterogéneo de sistemas que coexistem, se sobrepõem e, frequentemente, descrevem a mesma realidade de formas distintas. Esta heterogeneidade não constitui um desvio ocasional: resulta da própria evolução da digitalização industrial e da especialização funcional dos sistemas que suportam a produção e a gestão.

A digitalização da produção, impulsionada pelo paradigma da Indústria 4.0, transformou o chão de fábrica e a gestão empresarial num ambiente densamente instrumentado e interligado. Esta transformação distingue-se das anteriores por ser conduzida tanto pela disseminação de sistemas ciberfísicos como pelas exigências de maior flexibilidade e individualização da produção, fatores que colocam os dados no centro da operação e da decisão [1]. A integração em rede de dispositivos inteligentes, sensores e atuadores, característica da *Industrial Internet of Things* (IIoT), multiplicou as fontes de dados e estreitou a ligação entre o mundo físico da produção e os sistemas computacionais que o suportam [2].

Tradicionalmente, estes sistemas organizam-se de forma estratificada, numa estrutura habitualmente representada como uma pirâmide de automação. Na base situam-se os dispositivos de campo e os sistemas de controlo, responsáveis pela aquisição e atuação em tempo real; em camadas intermédias encontram-se os sistemas de supervisão e de gestão das operações de produção; no topo residem os sistemas de gestão empresarial, que tratam o planeamento, a logística e os processos de negócio. Esta visão foi posteriormente formalizada de forma normativa pela ISA-95, apresentada na Secção 2.2. Cada uma destas camadas opera segundo objetivos, escalas temporais e granularidades próprias, o que se reflete diretamente na forma como representa a informação [3].

Na prática, esta estratificação concretiza-se numa multiplicidade de sistemas dedicados [15]. Aos sistemas de gestão empresarial e de execução da produção, designadamente o *Enterprise Resource Planning* (ERP) e o *Manufacturing Execution System* (MES), juntam-se os sistemas de *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), os sistemas de *Product Lifecycle Management* (PLM), os sistemas de *Computerized Maintenance Management System* (CMMS), de *Quality Management System* (QMS) e de *Warehouse Management System* (WMS), entre outros. Cada um destes sistemas foi concebido e otimizado para uma função específica e, por essa razão, suporta também um modelo de dados próprio. Esta especialização é operacionalmente vantajosa, mas constitui igualmente a raiz da heterogeneidade que importa compreender.

Precisamente porque estes sistemas foram concebidos em momentos, contextos e finalidades distintos, a mesma entidade do mundo real, seja uma ordem de produção, um equipamento, uma paragem ou um produto, tende a ser modelada de maneiras diferentes em sistemas diferentes, com identificadores, unidades, granularidades e significados que nem sempre coincidem. A esta diversidade soma-se a própria natureza dos dados industriais: na taxonomia proposta por Raptis et al. [3], estes dados caracterizam-se não só por grandes volumes, mas também por uma assinalável variedade de formatos, proveniências e criticidades. O resultado é uma fragmentação em que a informação relevante para um mesmo processo se encontra dispersa por vários sistemas e, simultaneamente, duplicada entre eles. Os dados de natureza operacional, gerados ao nível dos sensores e do controlo, e os dados de negócio, mantidos nos sistemas de gestão, residem em contextos separados cuja reconciliação está longe de ser trivial [4].

Quando uma organização necessita de uma visão integrada e transversal aos seus sistemas, estas diferenças deixam de ser uma questão interna de modelação e manifestam-se como inconsistências concretas. Não por acaso, a falta de interoperabilidade, de normalização e de governança de dados surge recorrentemente apontada como uma das barreiras persistentes à adoção das tec-

nologias da Indústria 4.0 [16]. Um dos planos em que este problema se torna particularmente visível é o dos indicadores-chave de desempenho, os *Key Performance Indicators* (KPI). Quando o mesmo indicador é calculado a partir de dados provenientes de sistemas distintos, divergências na definição, na unidade, na granularidade ou na regra de cálculo traduzem-se em valores diferentes para aquilo que, do ponto de vista organizacional, deveria corresponder à mesma medida. A literatura sobre sistemas de medição de desempenho em ambientes fabris inteligentes reconhece precisamente que a fiabilidade destes indicadores depende da qualidade e da consistência dos dados que os alimentam [17], [18]. Ainda assim, os KPI são apenas uma manifestação particularmente relevante de um problema mais geral, que também afeta entidades, eventos, estados operacionais ou resultados analíticos produzidos a partir de múltiplas fontes.

A Figura 2.1 ilustra este fenómeno na sua forma mais elementar.

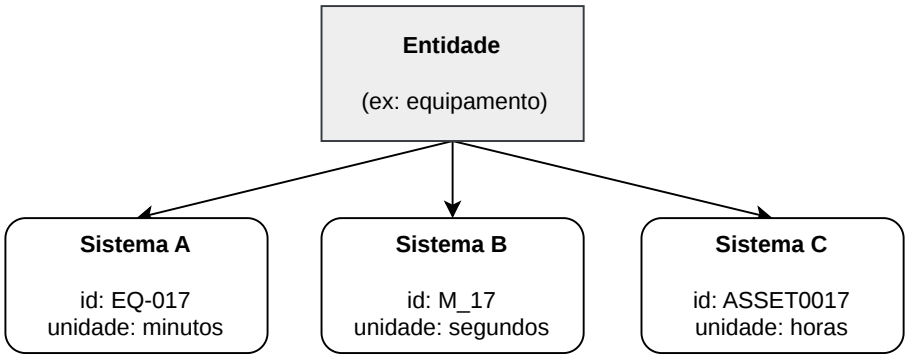


Figura 2.1: Representação heterogénea de uma mesma entidade do mundo real em três sistemas de informação distintos, com identificadores e unidades divergentes.

Como a figura evidencia, basta que três sistemas atribuam ao mesmo equipamento identificadores e unidades distintos para que qualquer cruzamento direto dos seus dados se torne suscetível a erro ou a interpretação ambígua. Esta divergência pode ocorrer tanto entre sistemas de camadas diferentes, como um sistema de gestão e um de execução da produção, como entre sistemas do mesmo tipo, e depende sempre dos sistemas concretos que cada organização utiliza. Compreender esta heterogeneidade constitui, por isso, o primeiro passo para perceber por que razão a integração técnica entre sistemas, embora necessária, não é suficiente.

2.2 Interoperabilidade e integração de sistemas industriais

A heterogeneidade caracterizada na secção anterior coloca uma questão prática incontornável: como fazer cooperar sistemas concebidos de forma independente. A resposta imediata costuma ser a integração, isto é, o estabelecimento de ligações que permitam a um sistema aceder aos dados de outro. Contudo, integrar não significa automaticamente harmonizar o significado dos dados integrados. A integração resolve sobretudo problemas de transporte e estrutura da informação, deixando em aberto o desafio da sua interpretação consistente.

As revisões recentes sobre a integração de dados para apoio à decisão em ambientes de produção inteligente continuam a apontar a interoperabilidade e a governança de dados como desafios persistentes, mesmo em contextos onde a integração técnica é significativa [19]. Para tornar esta distinção precisa, importa começar pelos níveis de interoperabilidade habitualmente reconhecidos na literatura.

A interoperabilidade costuma ser organizada numa escala ascendente [5]. No nível mais baixo situa-se a interoperabilidade técnica, isto é, a capacidade de estabelecer conectividade e trocar dados através de protocolos de comunicação. Acima dela encontra-se a interoperabilidade sintática, que exige acordo quanto ao formato e à estrutura da informação trocada, permitindo ao sistema recetor decompor e ler corretamente o que recebe. Estes dois níveis dispõem hoje de soluções relativamente maduras, apoiadas por normas, protocolos e formatos amplamente utilizados. Isso não significa, contudo, que estejam universalmente resolvidos em qualquer contexto industrial, mas antes que existem bases técnicas e sintáticas consolidadas para suportar a integração entre sistemas.

O nível mais exigente, e o que permanece mais problemático, é o da interoperabilidade semântica. Na definição adotada por Nilsson e Sandin [5], a interoperabilidade semântica é a capacidade de os sistemas trocarem informação com um significado inequívoco, garantindo que aquilo que um sistema transmite é interpretado pelo recetor com o sentido pretendido. Os mesmos autores argumentam que este é um dos desafios mais marcantes da Indústria 4.0, agravado pela coexistência de normas, componentes e ferramentas diversas e pela tendência para processos de produção dinâmicos e reconfiguráveis. A dificuldade já não está em transportar os dados ou em lê-los, mas em assegurar que duas partes partilham o mesmo entendimento sobre aquilo que os dados representam.

Esta distinção torna-se mais concreta quando observada à luz de normas específicas. No trabalho de da Rocha et al. [6], em que se explora a aplicação da família de normas IEEE 1451 à aquisição de dados em ambiente industrial, os autores mostram que esta suporta o nível sintático de interoperabilidade, mas não basta, por si só, para garantir interoperabilidade semântica. Mesmo dispondo de uma norma de ligação entre sensores, continua a ser necessário um esforço adicional para explicitar e partilhar o significado da informação. A lacuna entre conseguir trocar dados e conseguir partilhar o seu significado é, assim, conceptualmente nítida.

A estratificação em camadas introduzida na Secção 2.1 encontra a sua formalização normativa na ISA-95, internacionalmente publicada como IEC 62264 [20]. Tomando como base o modelo de referência de Purdue, esta norma organiza a empresa industrial numa hierarquia de níveis, do nível 0, correspondente ao processo físico, até ao nível 4, correspondente às atividades de gestão empresarial. O seu contributo mais relevante para o presente trabalho situa-se precisamente na fronteira entre o nível 3, o domínio da gestão das operações de produção tipicamente coberto por um MES, e o nível 4, o domínio empresarial onde opera o ERP. É para esta interface que a ISA-95 define modelos de objetos, atributos e transações, com o objetivo de aumentar a uniformidade terminológica e reduzir risco, custo e erro na integração entre os dois domínios [20].

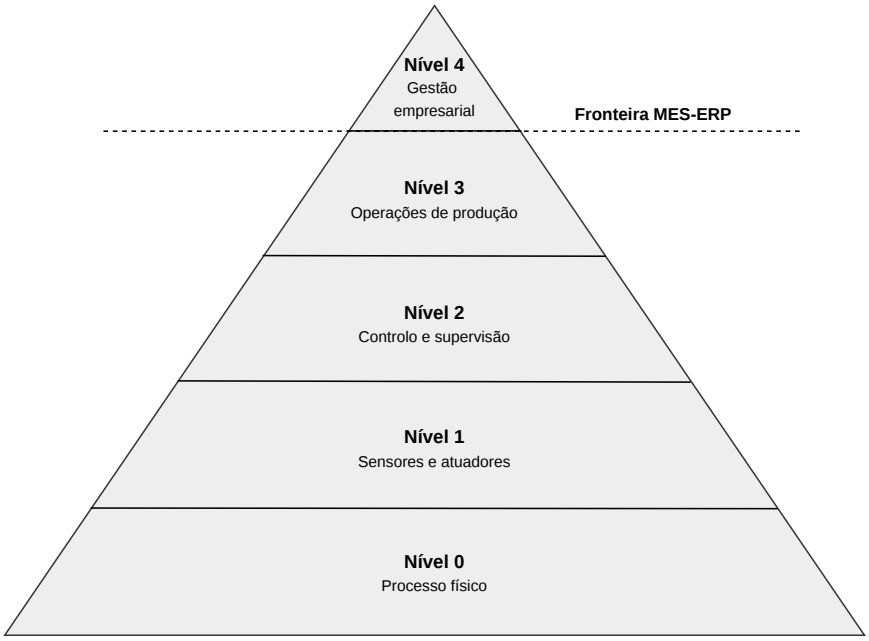


Figura 2.2: Hierarquia de níveis definida pela ISA-95 e a interface entre os domínios das operações de produção (MES) e da gestão empresarial (ERP). Elaborado a partir de [20].

A leitura da figura torna claro o lugar que a fronteira MES-ERP ocupa nesta hierarquia: é o ponto em que os dados gerados pela produção passam a alimentar decisões de negócio e, por isso mesmo, um espaço onde divergências de representação se tornam especialmente visíveis. A par da norma, e porque esta define modelos de dados de forma abstrata, surgiram implementações que lhe dão forma concreta para efeitos de troca de informação, como os esquemas *Business To Manufacturing Markup Language* (B2MML), que materializam os modelos da ISA-95 através da linguagem *Extensible Markup Language* (XML) [21] e cuja utilização na partilha de dados industriais tem sido objeto de revisão sistemática [22]. A existência destas implementações permite considerar que, na fronteira MES-ERP, os níveis técnico e sintático dispõem de soluções amplamente reconhecidas, ainda que a sua adoção e eficácia concreta dependam sempre do contexto organizacional e tecnológico.

Importa, contudo, sublinhar o alcance desta maturidade. A conformidade com a ISA-95 e com implementações como o B2MML assegura que os dois domínios trocam informação estruturada e legível, mas não garante, por si só, que lhe atribuem o mesmo significado. Dois sistemas podem partilhar dados em conformidade com estes modelos e continuar a associar-lhes definições, unidades ou regras de cálculo distintas. Também na fronteira MES-ERP, portanto, a integração técnica e sintática constitui uma condição necessária, mas não suficiente, para a utilização consistente dos dados.

A ISA-95 não existe, porém, isolada. Insere-se num ecossistema mais vasto de normas e modelos de referência que procuram estruturar a integração industrial sob diferentes perspetivas. O

levantamento conduzido por Lu et al. [23] para o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) ilustra a amplitude deste panorama, ao mapear normas de integração ao longo das dimensões do produto, do sistema de produção e do negócio. Além das normas, surgiram modelos de arquitetura de referência mais abrangentes, concebidos para enquadrar a transformação digital da indústria, como o *Reference Architectural Model Industrie 4.0* (RAMI 4.0) [24] ou a arquitetura *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA) [25].

Para além do alinhamento entre interfaces e modelos, a convergência entre IT e OT exige coordenação ao longo do ciclo de vida dos sistemas e dos ativos físicos. A revisão conduzida por Kok et al. [26] mostra que uma parte significativa da literatura sobre integração IT/OT continua centrada em aspetos técnicos, tratando de forma menos desenvolvida as dimensões organizacionais da convergência. Esta necessidade de alinhar normas, políticas, ferramentas, processos e pessoas é também sublinhada por Kuusk e Gao [27], cujo enquadramento articula explicitamente as dimensões de tecnologia, organização e pessoas na integração entre os domínios. Estas conclusões reforçam que a integração industrial não depende apenas da existência de mecanismos de comunicação, mas também da articulação entre os domínios que produzem, mantêm e utilizam os dados.

Ainda assim, a abundância de normas e arquiteturas não significa que o problema da interoperabilidade esteja encerrado. Na revisão sistemática de Nakagawa et al. [24], os autores concluem que estas arquiteturas, apesar do seu valor, ainda têm um caminho significativo a percorrer para suportar plenamente os processos que se propõem enquadrar. O que permanece claramente por assegurar, para além da troca estruturada dos dados, é a sua interpretação consistente, isto é, a interoperabilidade semântica.

2.3 Interoperabilidade semântica e ontologias

A existência de normas consolidadas para a troca estruturada de dados não resolve, por si só, a questão mais exigente: garantir que os dados trocados são interpretados com o mesmo significado por todas as partes. É neste plano que se situa a interoperabilidade semântica, e é também aqui que emerge o problema central desta dissertação.

No levantamento de Nilsson e Sandin [5], o custo de tornar os sistemas semanticamente interoperáveis surge identificado como um dos fatores que limitam a adoção de novas tecnologias na indústria. Os autores distinguem, além disso, duas grandes orientações na literatura: uma abordagem ascendente, assente na normalização progressiva, e uma abordagem orientada por objetivos, de natureza mais computacional. Esta tensão revela que o problema está longe de reunir uma resposta única ou consensual.

Uma das respostas técnicas mais exploradas na literatura tem sido a utilização de ontologias, isto é, especificações formais e explícitas dos conceitos de um domínio e das relações entre eles, capazes de atribuir significado partilhado e processável por máquina à informação trocada. O recurso a ontologias no domínio da produção é hoje extenso e diversificado, com propostas de âmbitos, granularidades e propósitos distintos, tendo sido já desenvolvidas metodologias dedicadas

à sua construção para sistemas ciberfísicos no domínio da produção industrial [28]. Estas propostas evidenciam simultaneamente o potencial das ontologias e o esforço considerável que a sua elaboração, manutenção e adoção exigem.

No contexto específico da Indústria 4.0, um dos principais mecanismos que têm aproximado estas técnicas semânticas da prática industrial é a representação digital normalizada de um ativo, conhecida como *Asset Administration Shell* (AAS). Bader e Maleshkova [29] propõem uma versão semântica do AAS, assente em tecnologias da *web* semântica, que permite descrever formalmente a informação e os serviços associados a um ativo. Sobre esta base, Huang et al. [30] mostram como a interoperabilidade semântica entre gémeos digitais pode ser reforçada através de verificações de capacidades fundamentadas em ontologias no quadro de modelação do AAS. Estes trabalhos confirmam que existem mecanismos técnicos relevantes para elevar a interoperabilidade ao nível semântico.

Contudo, importa destacar um aspeto decisivo: a existência de mecanismos semânticos não elimina, por si só, as dificuldades associadas à sua aplicação prática. A coexistência de múltiplas ontologias e modelos pode transferir a fragmentação para o próprio nível semântico, sobretudo quando não existem mecanismos adequados de alinhamento entre essas representações. A sua adoção permanece ainda condicionada pelo custo, pela manutenção e pela necessidade de conhecimento especializado. É este o centro do problema da consistência semântica: assegurar que as diferentes representações de um mesmo dado remetem para uma definição comum e inequívoca, independentemente do formalismo em que são expressas.

A interoperabilidade semântica não constitui, contudo, apenas um problema de modelação formal. Na investigação de The e Kuusk [20] sobre o alinhamento entre a IIoT e a ISA-95, a convergência entre os domínios operacional e empresarial revela-se dependente da articulação entre tecnologia, processos organizacionais e pessoas. Os dois domínios operam com prioridades, responsabilidades e contextos de decisão distintos. Assegurar que os sistemas atribuem o mesmo significado aos dados depende, por isso, não apenas de instrumentos técnicos, mas também de decisões organizacionais sobre quem define os conceitos, segundo que regras e com que autoridade. Esta constatação desloca o problema do plano exclusivamente técnico para o plano da governança de dados.

É neste ponto que a literatura revela as suas insuficiências. Os trabalhos analisados identificam a necessidade de alinhamento semântico, mas não estabelecem a quem compete aprovar os significados atribuídos aos dados, nem segundo que regras essa aprovação se exerce. A autoridade sobre a definição dos conceitos permanece, assim, por atribuir. A esta lacuna acresce uma segunda, de natureza metodológica. Como assinalado na secção anterior, dois sistemas podem partilhar dados em conformidade e continuar a associar-lhes definições, unidades ou regras de cálculo distintas. A verificação da interoperabilidade assente na comparação de valores agregados não é, contudo, sensível a este tipo de divergência, uma vez que um valor agregado não revela as parcelas nem as regras de cálculo que lhe deram origem. A consistência semântica não se resolve, por isso, apenas no plano técnico, exigindo mecanismos de governança que fixem os significados e a autoridade responsável pela sua definição.

2.4 Governança e gestão de dados

A secção anterior conduziu a uma conclusão importante: assegurar que sistemas distintos atribuem o mesmo significado aos seus dados não é um problema que se resolva apenas com instrumentos técnicos. Depende, em última análise, de decisões sobre como os dados são definidos, quem os define e segundo que regras. Estas são, por natureza, questões de governança. Nesta secção, apresenta-se a governança de dados como a disciplina que enquadra essas decisões, distinguindo-a da gestão de dados e da governança das tecnologias de informação, e sistematizando os elementos através dos quais se concretiza.

Antes de aprofundar o seu papel, importa delimitar o que se entende por governança de dados, um termo por vezes usado de forma vaga ou indistinta de noções próximas. Num sentido amplo, governar significa estabelecer quem tem autoridade para decidir, segundo que regras e com que responsabilidades, garantindo que essas decisões servem objetivos comuns [31]. Quando esta lógica é aplicada às tecnologias de informação, dá origem à governança das tecnologias de informação, que se realiza através da combinação de estruturas, processos e mecanismos relacionais [32]. Uma extensão próxima é a governança da informação, que alarga o objeto da tecnologia para a informação e o seu uso [33]. A governança de dados herda esta lógica, mas desloca definitivamente o foco para o dado enquanto ativo: o seu objeto não são os sistemas, mas os dados, as regras que os definem e as responsabilidades associadas ao seu uso.

Uma forma de delimitar o conceito consiste em distingui-lo daquilo com que mais frequentemente se confunde. A distinção mais importante é entre governança de dados e gestão de dados. Enquanto a gestão de dados diz respeito à execução das atividades que tratam os dados ao longo do seu ciclo de vida, a governança situa-se num plano acima, ocupando-se de definir objetivos, políticas, direitos de decisão e responsabilidades que orientam essa execução. A governança determina o que deve ser assegurado e quem responde por isso; a gestão trata de o concretizar. Esta distinção encontra-se estabelecida na literatura, sendo tornada explícita ao nível das atividades por Alhassan [34], que separa as atividades de governança das atividades de gestão. A separação entre decisão e execução que dela decorre é central para a compreensão do problema desta dissertação.

O reconhecimento da governança de dados como disciplina autónoma é relativamente recente e acompanhou a crescente valorização dos dados como ativo estratégico das organizações [7]. A revisão sistemática conduzida por Abraham et al. [8] oferece uma síntese consolidada deste percurso, propondo um enquadramento conceptual que organiza a governança de dados em torno de dois eixos fundamentais: por um lado, as dimensões de governança, que respondem à questão de o que é governado e por quem; por outro, os domínios sobre os quais essa governança se exerce, como a qualidade, a arquitetura, os metadados ou o ciclo de vida dos dados.

Definida a governança de dados e o seu propósito, importa perceber como se concretiza. A governança não se exerce através de um único instrumento, mas de um conjunto articulado de elementos que vão do plano mais abstrato ao mais operacional. No topo situam-se os princípios, orientações de alto nível que exprimem a intenção que guia o tratamento dos dados, aos quais se associa a atribuição de responsabilidades de decisão. Abaixo deles situam-se as regras e as

atividades através das quais essas orientações se tornam efetivas no funcionamento da organização. É esta articulação entre o plano da decisão e o plano da execução que distingue a governança da gestão e que estrutura a análise dos elementos percorridos nos parágrafos seguintes.

A atribuição de direitos de decisão constitui uma das formulações mais influentes da governança de dados. No trabalho de Khatri e Brown [9], a governança de dados é descrita precisamente em termos de direitos de decisão, isto é, da definição de quem tem autoridade para decidir sobre os vários aspetos dos dados, organizados em domínios como os princípios dos dados, a qualidade, os metadados, o acesso e o ciclo de vida. Complementarmente, a revisão sistemática de Brous et al. [35] identifica orientações transversais que sustentam estes programas, como o reconhecimento dos dados enquanto ativo, a clareza na responsabilização e o alinhamento com os objetivos da organização.

Desses princípios e regras decorrem as atividades através das quais a governança se torna operacional. O mesmo levantamento sobre atividades de governança de dados [34] evidencia um padrão recorrente: definição de regras e responsabilidades, implementação dessas regras no funcionamento da organização e monitorização do respetivo cumprimento. É neste plano, o das atividades e da sua execução, que a governança deixa de ser uma declaração de intenções e passa a ter efeito concreto sobre a forma como os dados são tratados.

Há, contudo, um aspeto que atravessa todos estes níveis: a sua configuração concreta não é universal. Weber, Otto e Österle [12] demonstram-no ao proporem uma abordagem de contingência à governança de dados, segundo a qual a atribuição de responsabilidades e a organização das atividades devem ser ajustadas a fatores específicos de cada empresa. Esta variabilidade é confirmada empiricamente pela revisão sistemática de Al-Ruithe et al. [36], que conclui que as soluções de governança variam consoante o setor, a dimensão e o contexto tecnológico de cada organização e que a sua transposição direta entre realidades distintas raramente é bem-sucedida. Daqui decorre uma ideia que sustenta a proposta deste trabalho: a governança de dados deve ser entendida como um quadro adaptável, configurado em função das características concretas de cada organização, e não como um bloco uniforme e invariável.

A necessidade de adaptar a governança ao contexto é igualmente observada em ambientes operacionais intensivos na *Internet of Things* (IoT). Gao et al. [37], ao analisarem a adoção destas tecnologias em portos inteligentes, concluem que o desenvolvimento tecnológico pode avançar mais rapidamente do que a capacidade de governança da organização. As principais lacunas identificadas incidem na gestão do ciclo de vida e na qualidade dos dados. Embora o contexto seja distinto da produção industrial, o estudo mostra que os problemas de governança associados à sensorização distribuída e à automatização não são exclusivos de um setor.

Um dos mecanismos através dos quais a governança se concretiza é a gestão de dados mestres e de referência. Estes dados estabelecem identificadores, definições e fontes autorizadas para elementos fundamentais da organização, reduzindo a ambiguidade entre sistemas. A revisão sistemática de Guerreiro et al. [38] relaciona a utilização de frameworks estruturadas de gestão de dados mestres com o desenvolvimento da maturidade da governança. O trabalho destaca mecanismos associados aos direitos de decisão, à qualidade, aos metadados, ao acesso e ao ciclo de vida

dos dados, mas observa que a avaliação da maturidade e do impacto dessas frameworks permanece fragmentada. Esta linha de investigação sustenta, em particular, a importância da fonte autoritativa e da manutenção das definições ao longo do tempo.

Se o enquadramento conceptual apresentado até aqui oferece a perspetiva académica sobre a governança de dados, é no *Data Management Body of Knowledge* (DAMA-DMBOK) que se encontra a sua sistematização mais influente do ponto de vista da prática profissional [39]. Trata-se de um corpo de conhecimento que organiza a gestão de dados num conjunto de áreas funcionais inter-relacionadas, habitualmente representadas sob a forma de uma roda, como se ilustra na Figura 2.3. O aspeto mais significativo dessa representação é a posição ocupada pela governança: situada no centro, não é apenas mais uma área funcional, mas a função que coordena e dá coerência às restantes. É esta posição central, transversal a todas as áreas funcionais, que fundamenta o tratamento da responsabilização como condição prévia e independente na framework proposta no Capítulo 4, anterior a qualquer um dos domínios específicos.

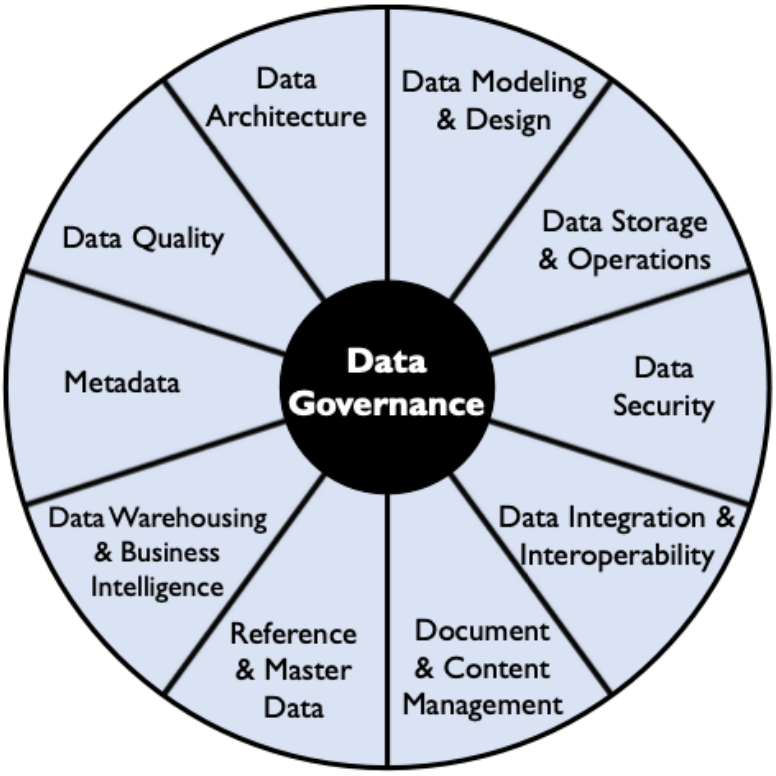


Figura 2.3: Áreas funcionais da gestão de dados segundo o DAMA-DMBOK, com a governança de dados no centro a coordenar as restantes. Retirado de [39].

Embora o DAMA-DMBOK abranja um conjunto alargado de áreas, nem todas têm igual peso para o problema tratado nesta dissertação. Por estar centrada na consistência dos dados entre sistemas heterogéneos, a análise retém cinco áreas funcionais, que constituem a base a partir da qual os princípios da framework são derivados no Capítulo 4:

- **Arquitetura e modelação de dados:** a forma como o significado, a unidade, a granularidade e a regra de cálculo de cada dado são fixados numa estrutura de referência.
- **Gestão de metadados:** a descrição das representações utilizadas em cada sistema e da sua relação com essa estrutura de referência, incluindo o registo da origem de cada dado, do seu percurso entre sistemas e das transformações que sofre ao longo desse percurso.
- **Dados mestre e autoridade sobre as fontes:** a determinação da origem válida de cada dado e das regras a seguir perante valores divergentes.
- **Integração e interoperabilidade de dados:** as condições em que os dados trocados entre sistemas são interpretados de forma equivalente.
- **Qualidade dos dados:** o cumprimento de requisitos verificáveis, adequados à finalidade para que os dados são utilizados.

A gestão de dados de referência em sentido estrito, que abrange listas de códigos, taxonomias e classificações partilhadas, não é aprofundada, por não incidir sobre a autoridade e o significado dos dados operacionais em análise. Estas áreas não esgotam a governança, mas representam os domínios sobre os quais uma abordagem orientada para a consistência entre sistemas tem de incidir de forma particularmente direta.

2.5 Qualidade dos dados e princípios FAIR

De entre as áreas funcionais identificadas na secção anterior, a qualidade dos dados merece tratamento próprio, por constituir uma das dimensões que mais diretamente influenciam a fiabilidade e a utilização consistente dos dados. Nesta secção, examina-se essa dimensão e apresentam-se depois os princípios FAIR, aqui entendidos como orientação complementar para a preparação dos dados para partilha, integração e reutilização.

A noção de qualidade dos dados afastou-se há muito da ideia simplista de ausência de erros. O trabalho de Wang e Strong [10] estabeleceu que a qualidade dos dados é um conceito multidimensional e, sobretudo, que deve ser entendida como aptidão para o uso, isto é, em função das necessidades de quem consome os dados e não de um padrão absoluto. Desta perspetiva resulta um conjunto de dimensões através das quais a qualidade pode ser avaliada, como a exatidão, a completude, a atualidade ou a consistência.

Para o problema aqui tratado, a consistência assume especial relevância, mas importa qualificá-la com rigor. Quando uma mesma entidade, conceito ou indicador é representado de forma divergente em sistemas distintos, surgem inconsistências nos resultados produzidos. Essas inconsistências podem decorrer de falhas de qualidade dos dados, mas também de diferenças semânticas, como definições, unidades, granularidades ou regras de cálculo não alinhadas. Em contextos industriais reais, estes dois planos encontram-se frequentemente articulados: uma divergência entre sistemas pode revelar simultaneamente um problema semântico e um problema de qualidade, mas não deve ser reduzida automaticamente a este último.

Esta dissertação trata os dois planos como distintos. A consistência, enquanto dimensão da qualidade dos dados, incide sobre a ausência de contradições entre os valores registados, avaliada dentro das regras de cada sistema. Quando a divergência não reside nos valores, mas nas definições e nas regras que os produzem, está em causa a consistência semântica, que a presente proposta trata como uma condição distinta da qualidade. Esta separação tem uma consequência que a Secção 2.3 já anunciava: dados internamente consistentes e de qualidade em cada sistema não asseguram, por si só, consistência semântica entre sistemas. O critério que distingue os dois planos, e o motivo pelo qual a avaliação da qualidade não dispensa a avaliação da consistência semântica, é desenvolvido no Capítulo 4.

As dimensões da qualidade mais relevantes para este problema podem resumir-se da seguinte forma:

- **Consistência:** ausência de contradições entre os valores registados, avaliada dentro das regras e definições de cada sistema.
- **Exatidão:** grau em que os dados representam corretamente a realidade que pretendem descrever.
- **Completude:** medida em que os dados necessários estão efetivamente presentes e disponíveis.
- **Atualidade:** grau em que os dados se encontram suficientemente atualizados para o fim a que se destinam.

Garantir estas dimensões não é, contudo, uma tarefa pontual. A norma ISO 8000-61 [11] descreve a gestão da qualidade dos dados como um processo estruturado e recorrente, assente em ciclos de planeamento, controlo, garantia e melhoria, e não como uma correção avulsa de erros. Esta natureza processual reforça a ligação à governança: assegurar a qualidade depende não apenas de ferramentas, mas também de políticas, responsabilidades e mecanismos de monitorização que sustentem esse processo ao longo do tempo.

Do ponto de vista da operacionalização, a literatura tem procurado sistematizar tanto os métodos de avaliação como as ferramentas disponíveis. Existem hoje diversas propostas de enquadramento para a avaliação da qualidade dos dados [40] e levantamentos dedicados às ferramentas de medição e monitorização [41]. Esta diversidade mostra que a qualidade dos dados dispõe de enquadramentos conceptuais e instrumentos de avaliação relativamente consolidados. Ainda assim, tal como sucedia com a interoperabilidade, a existência de métodos e ferramentas não garante, por si só, consistência entre sistemas: esta depende de a organização definir o que entende por qualidade, segundo que regras e sob que responsabilidade.

Uma contribuição complementar relevante para este enquadramento vem dos princípios FAIR. Formulados inicialmente no contexto da gestão de dados científicos [42], estes princípios estabelecem que os dados devem ser localizáveis, acessíveis, interoperáveis e reutilizáveis. Podem sintetizar-se da seguinte forma:

- ***Findable* (localizável):** os dados e os seus metadados devem poder ser encontrados, o que pressupõe identificadores únicos e persistentes e uma descrição rica que permita a sua pesquisa.
- ***Accessible* (acessível):** uma vez localizados, os dados devem poder ser obtidos através de mecanismos bem definidos, incluindo as condições de autenticação e autorização aplicáveis.
- ***Interoperable* (interoperável):** os dados devem poder ser combinados e integrados com outros, o que exige vocabulários, formatos e representações partilhados e formalmente descritos.
- ***Reusable* (reutilizável):** os dados devem estar descritos e contextualizados de forma suficientemente rica para poderem ser reaproveitados em situações distintas daquela para que foram criados.

A pertinência dos princípios FAIR para o problema aqui tratado reside no facto de oferecerem um referencial amplamente reconhecido para orientar a preparação dos dados para serem encontrados, acedidos, combinados e reutilizados. A interoperabilidade, no sentido FAIR, depende da utilização de vocabulários, formatos e representações partilhados e formalmente descritos, aproximando-se do desafio da interoperabilidade semântica discutido anteriormente.

A sua relevância não se restringe atualmente ao domínio científico. Vários trabalhos têm transposto os princípios FAIR para o contexto industrial, demonstrando a sua aplicabilidade a ativos como os gémeos digitais [43], [44] ou a processos de fabrico aditivo apoiados em ontologias [45]. Nesta dissertação, contudo, os princípios FAIR não integram a estrutura principal da framework nem constituem critérios formais do diagnóstico ou da avaliação da maturidade. São considerados uma orientação complementar para compreender de que modo as decisões de governança podem contribuir para tornar os dados mais preparados para integração, partilha e reutilização.

2.6 Modelos de maturidade em governança de dados

As secções anteriores deixaram em aberto uma questão de ordem prática: se a governança de dados deve ser ajustada ao contexto de cada organização, como pode esta determinar o seu estado atual e identificar as áreas que necessitam de maior desenvolvimento? A resposta a esta questão tem sido dada, na literatura e na prática, através dos modelos de maturidade. Esta secção apresenta o conceito de maturidade, distingue as principais formas de avaliação identificadas na literatura e analisa a sua aplicação à governança e à gestão de dados.

A noção de modelo de maturidade tem origem na engenharia de software, nomeadamente no *Capability Maturity Model* (CMM), desenvolvido no *Software Engineering Institute* [46]. A ideia subjacente consiste em descrever a capacidade de uma organização numa determinada disciplina através de diferentes estados de desenvolvimento. Nos modelos clássicos por estágios, esses estados são representados por níveis sucessivos, que evoluem desde situações iniciais, caracterizadas

por práticas pouco formalizadas e dependentes de esforços individuais, até estados mais avançados, nos quais os processos se encontram definidos, medidos, controlados e sujeitos a melhoria contínua.

Nestes modelos, cada nível representa um conjunto de capacidades que devem estar suficientemente consolidadas antes da progressão para o nível seguinte. A maturidade é, assim, interpretada como uma trajetória organizacional global e progressiva. O seu valor não reside apenas na atribuição de uma classificação, mas também na descrição de um percurso de evolução, permitindo compreender quais as capacidades que distinguem organizações com diferentes graus de formalização e controlo dos seus processos.

Contudo, nem todos os modelos de maturidade adotam exclusivamente uma lógica sequencial e global. Em vários domínios surgiram também modelos orientados por capacidades, áreas de processo, domínios ou princípios. Nestes casos, a avaliação não se limita a posicionar toda a organização num único nível, mas analisa separadamente diferentes dimensões da capacidade organizacional. Uma organização pode, por exemplo, apresentar práticas mais desenvolvidas num determinado domínio e capacidades ainda incipientes noutro, produzindo um perfil de maturidade mais granular.

Esta distinção encontra-se refletida na evolução do próprio CMM. Enquanto os modelos por estágios procuram representar a maturidade global da organização, as abordagens contínuas ou orientadas por capacidades permitem avaliar individualmente diferentes áreas de processo. Deste modo, a literatura reconhece duas perspetivas complementares: uma centrada na progressão global por níveis sucessivos e outra centrada no desenvolvimento específico de diferentes capacidades.

Aplicada ao contexto da governança e da gestão de dados, a maturidade exprime, em termos gerais, o grau em que uma organização possui responsabilidades, regras, processos e práticas relacionados com os dados devidamente definidos, implementados, monitorizados e melhorados. Uma maturidade reduzida tende a estar associada a atividades informais, responsabilidades pouco claras e decisões reativas. Em estados mais avançados, as atividades encontram-se formalizadas, suportadas por mecanismos de controlo e integradas no funcionamento regular da organização.

Ao longo das últimas décadas foram propostas diferentes formas de avaliar o desenvolvimento das capacidades associadas à governança e à gestão de dados. Entre os modelos diretamente orientados para este domínio destacam-se o *IBM Data Governance Council Maturity Model* [47] e o *Data Management Capability Assessment Model* (DCAM) [48]. A estes juntam-se referenciais mais abrangentes de governança e gestão das tecnologias de informação, como o COBIT [49], e normas orientadoras da governança dos dados, como a ISO/IEC 38505 [50].

O *IBM Data Governance Council Maturity Model* constitui uma das primeiras propostas especificamente orientadas para a governança de dados. O modelo organiza a avaliação em diferentes categorias, abrangendo aspetos como estruturas organizacionais, políticas, responsabilização, gestão do risco, qualidade e arquitetura dos dados [47]. A sua finalidade consiste em permitir que as organizações identifiquem o grau de formalização das suas capacidades de governança e reconheçam os aspetos que necessitam de maior desenvolvimento.

O DCAM, desenvolvido pelo EDM Council, apresenta uma abordagem orientada para capacidades de gestão de dados [48]. O modelo organiza a avaliação em componentes e capacidades específicas, permitindo analisar separadamente áreas como a estratégia de dados, a governança, a qualidade, a arquitetura e a utilização analítica dos dados. Esta estrutura ilustra uma avaliação mais granular, na qual diferentes capacidades podem apresentar níveis de desenvolvimento distintos.

O COBIT, embora concebido como um referencial mais abrangente de governança e gestão das tecnologias de informação, inclui mecanismos para avaliar a capacidade dos processos organizacionais [49]. A sua aplicação não se restringe aos dados, mas vários dos seus objetivos e processos relacionam-se com a gestão da informação, a responsabilização, o controlo e a qualidade. Por essa razão, é frequentemente considerado entre os referenciais que podem apoiar a avaliação de capacidades associadas à governança de dados.

Por sua vez, a norma ISO/IEC 38505 fornece orientações para a governança dos dados a partir dos princípios gerais de governança das tecnologias de informação [50]. A norma centra-se na responsabilidade dos órgãos de governo relativamente à avaliação, direção e monitorização da utilização dos dados, reforçando a sua consideração enquanto recurso organizacional. Embora não constitua, por si só, um modelo de maturidade detalhado, pode servir de referência para avaliar a existência e a formalização de mecanismos de governança.

A multiplicidade destas propostas motivou esforços de revisão e síntese. A revisão sistemática conduzida por Cardoso et al. [51] oferece um panorama consolidado dos modelos de maturidade e das práticas de governança de dados, evidenciando elementos recorrentes, como a formalização das responsabilidades, a definição de políticas, a monitorização da qualidade e a melhoria contínua. A mesma revisão demonstra, contudo, que os modelos diferem consideravelmente quanto ao número de níveis, às dimensões avaliadas, aos critérios utilizados e ao âmbito organizacional considerado: alguns privilegiam estruturas organizacionais e direitos de decisão, enquanto outros atribuem maior peso aos processos, à arquitetura, à qualidade ou à utilização dos dados. Não existe, por isso, um referencial único e universalmente aceite para avaliar a maturidade em governança de dados.

A literatura recente distingue ainda diferentes objetos de avaliação no contexto industrial. Lopes et al. [52] propõem uma framework dedicada à maturidade da convergência IT/OT, enquanto Awasthi et al. [53] diferenciam a maturidade da adoção da Indústria 4.0, a preparação dos dados e a capacidade de ciência e análise de dados industriais. Estes trabalhos mostram que uma organização pode apresentar níveis distintos de desenvolvimento tecnológico, organizacional e analítico. Consequentemente, uma classificação global pode ocultar lacunas relevantes em capacidades específicas.

A maturidade também condiciona a utilização dos dados pelos diferentes intervenientes da organização. Com base em 259 avaliações de fábricas, Harland et al. [54] identificam lacunas em sistemas de informação, recursos, estrutura organizacional e cultura que limitam a democratização dos dados. O estudo mostra que disponibilizar tecnologia não é suficiente para ampliar a utilização dos dados: são igualmente necessárias definições compreensíveis, responsabilidades claras, competências e mecanismos de acesso adequados. A governança assume, deste modo, uma função

habilitadora, ao criar condições para que os dados possam ser utilizados de forma mais ampla sem perder controlo ou consistência.

A lógica de maturidade foi ainda aplicada a referenciais que não constituem modelos gerais de governança. Os princípios FAIR, por exemplo, deram origem a um modelo de maturidade próprio, constituído por indicadores avaliados individualmente para cada princípio [55]. Neste caso, a avaliação procura determinar em que medida diferentes requisitos de localizabilidade, acessibilidade, interoperabilidade e reutilização se encontram satisfeitos, sem depender necessariamente de uma classificação organizacional global. Este exemplo demonstra que a maturidade pode ser analisada tanto ao nível da organização como ao nível de capacidades, princípios ou resultados específicos.

Independentemente da sua estrutura, os modelos de maturidade partilham uma função essencial de diagnóstico. A avaliação permite caracterizar o estado atual da organização, tornar visíveis as capacidades existentes e identificar áreas que apresentam menor grau de formalização. A partir desse diagnóstico, os modelos podem apoiar a definição de prioridades, a afetação de recursos e a organização de iniciativas de melhoria.

A utilização da maturidade como instrumento de diagnóstico é compatível com a abordagem de contingência proposta por Weber, Otto e Österle [12], segundo a qual a configuração da governança de dados deve considerar as características específicas de cada organização. Se as estruturas, as responsabilidades e os mecanismos de governança dependem do contexto, a avaliação de maturidade constitui uma forma de reconhecer essas diferenças antes da adoção de novas medidas.

A relevância de uma adoção ajustada às capacidades organizacionais é também ilustrada em estudos empíricos. Zorrilla et al. [56], ao analisarem a construção de uma cultura orientada por dados numa pequena e média empresa, mostram que a implementação de mecanismos de governança teve de considerar as limitações, os recursos e as práticas existentes na organização. O desenvolvimento da governança ocorreu de forma progressiva, através da consolidação gradual de responsabilidades, processos e práticas adequados à realidade analisada.

Em síntese, a literatura evidencia duas orientações principais na avaliação da maturidade. Os modelos por estágios descrevem uma progressão organizacional global através de níveis sucessivos, enquanto os modelos orientados por capacidades, domínios ou princípios permitem avaliar separadamente diferentes áreas de desenvolvimento. Apesar das diferenças de estrutura e granularidade, ambos procuram apoiar o diagnóstico organizacional, tornar visíveis as lacunas existentes e orientar a definição de prioridades de melhoria. A diversidade de modelos disponíveis confirma, contudo, que não existe uma forma única e universalmente aceite de avaliar a maturidade em governança de dados.

Há, porém, um traço comum às duas orientações. Mesmo os modelos que avaliam separadamente capacidades, domínios ou princípios situam cada um desses elementos numa escala progressiva única, na qual a existência de uma decisão de governança e a sua concretização efetiva se combinam num mesmo juízo. O modelo de maturidade orientado por princípios referido anteriormente [55] constitui o precedente estrutural mais próximo de uma avaliação desagregada, ao atribuir um estado próprio a cada princípio, mas esse estado exprime-se ainda numa escala única. Permanece, deste modo, por explorar uma avaliação que transporte para o próprio instrumento a

distinção, já estabelecida na literatura ao nível das atividades, entre a decisão de governança e a sua execução, tratando-as, dentro de cada domínio, como duas dimensões independentes e diagnosticáveis. É esta lacuna, respeitante ao instrumento de avaliação da maturidade, que a síntese da secção seguinte retoma e delimita.

2.7 Governança de dados na Indústria 4.0 e síntese

A partir do enquadramento estabelecido nas secções anteriores, importa situar o problema desta dissertação no contexto específico da governança de dados para a Indústria 4.0. A transição digital da indústria não aumenta apenas a quantidade de dados disponível. Aumenta também a diversidade dos seus produtores, consumidores, formatos, significados e ritmos de atualização. Em ambientes IT/OT, a governança de dados relaciona-se, por isso, com a integração entre sistemas, a convergência entre domínios, a preparação dos dados para utilização analítica e a fiabilidade das decisões tomadas a partir de múltiplas fontes.

A literatura aborda estas exigências através de linhas de investigação parcialmente complementares. Os trabalhos sobre convergência IT/OT mostram que a articulação entre os domínios empresarial e operacional não depende apenas de conectividade. Exige também o alinhamento de normas, políticas, processos, ferramentas e pessoas ao longo do ciclo de vida dos sistemas e dos ativos [20], [26]. Mais recentemente, surgiram propostas que tratam a maturidade dessa convergência como um objeto próprio de avaliação [52]. Estes contributos reforçam a necessidade de diagnosticar o estado existente antes de definir novas medidas de governança.

Uma segunda linha concentra-se na representação e partilha dos dados. O AAS, os gémeos digitais e as ontologias procuram estabelecer descrições formalizadas dos ativos e das suas capacidades [57], [58], [59]. Em paralelo, os *data spaces* desenvolvem mecanismos de soberania, acesso e controlo de utilização em ambientes de partilha entre organizações [60], [61]. Estas abordagens disponibilizam instrumentos técnicos relevantes, mas não eliminam a necessidade de definir quem aprova os significados, quais são as fontes autoritativas e como as representações são mantidas.

Outros trabalhos analisam as condições organizacionais necessárias para transformar os dados em valor. A investigação sobre democratização dos dados mostra que a utilização alargada da informação depende de capacidades técnicas, organizacionais e culturais articuladas [54]. A revisão de Awasthi et al. [53] relaciona a maturidade da Indústria 4.0 com a preparação dos dados e com a capacidade analítica, enquanto Mudgal [62] apresenta a qualidade, a consistência e a governança como condições para aplicações industriais de inteligência artificial. A governança surge, assim, não apenas como mecanismo de controlo, mas também como condição para reutilizar os dados em análise, automatização e apoio à decisão.

É, contudo, no conjunto de trabalhos desenvolvido por Yebenes e Zorrilla que se encontra o antecedente mais próximo desta dissertação. A partir de uma proposta inicial orientada para plataformas de terceira geração [63], os autores desenvolveram uma framework de governança de dados para a Indústria 4.0 [13] e um quadro de referência para a implementação de sistemas de governança nesse contexto [14]. Trabalhos posteriores aprofundam a cultura orientada por dados

em pequenas e médias empresas [56] e os blocos arquiteturais da governança em *data spaces* [64]. Este corpo de trabalho estabelece os domínios a governar e distingue explicitamente as atividades de governança das de gestão, organizando-as em grupos próprios. A avaliação da maturidade é, contudo, conduzida através de uma escala única de quatro níveis por área de processo, agregada por médias ponderadas até uma classificação global do sistema. A distinção entre governança e gestão é, assim, estabelecida entre grupos de atividades, mas não é transportada para a avaliação de cada área, onde a decisão aprovada e os mecanismos que a executam permanecem combinados num mesmo nível.

As principais linhas de investigação relacionadas com o problema analisado, e o aspeto que em cada uma permanece menos desenvolvido, sintetizam-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Posicionamento das principais linhas de investigação relacionadas com a governança e a interoperabilidade dos dados em contextos industriais.

Linha de investigação	**Contributo principal**	**Aspeto menos desenvolvido face ao problema analisado**
Convergência e maturidade IT/OT [20], [26], [52]	Analisa a articulação técnica, organizacional e processual entre os domínios empresarial e operacional e propõe instrumentos para avaliar o respetivo grau de convergência.	Não se centra necessariamente nas condições de governança aplicáveis a dados concretos nem na tradução das lacunas em medidas específicas de definição, qualidade ou rastreabilidade.
AAS, gémeos digitais e ontologias [57], [58], [59]	Disponibiliza representações normalizadas e mecanismos semânticos para descrever ativos, serviços e dados industriais de forma processável por máquina.	As propostas permanecem associadas a arquiteturas ou tecnologias específicas e não abrangem necessariamente a definição organizacional de responsabilidades e regras.
Data spaces e partilha soberana [60], [61]	Desenvolve mecanismos de acesso, controlo de utilização e soberania dos dados em ambientes de partilha.	O foco principal encontra-se nas condições de partilha, e não na reconciliação interna de definições e representações entre sistemas da mesma organização.
Governança em ambientes IoT [37]	Evidencia lacunas de governança associadas ao crescimento da sensorização e da automatização, com destaque para o ciclo de vida e a qualidade dos dados.	Identifica requisitos e áreas frágeis, mas não apresenta uma metodologia geral para diagnosticar e tratar divergências num âmbito industrial concreto.
Dados mestres e de referência [38]	Relaciona definições, identificadores, metadados e direitos de decisão controlados com o desenvolvimento da maturidade da governança.	A avaliação do impacto e da maturidade permanece fragmentada e não abrange necessariamente todos os dados operacionais envolvidos na convergência IT/OT.
Democratização e preparação dos dados [53], [54], [62]	Identifica as capacidades técnicas, organizacionais, culturais e analíticas necessárias para ampliar a utilização dos dados e suportar decisões orientadas por dados.	Define condições e lacunas de capacidade, mas não detalha como diagnosticar e remediar divergências semânticas entre sistemas industriais específicos.
Frameworks de governança para a Indústria 4.0 [13], [14], [56], [63], [64]	Propõem arquiteturas, papéis, artefactos e orientações de implementação para a governança industrial, distinguindo as atividades de governança das de gestão e avaliando a maturidade por área de processo.	A avaliação assenta numa escala única agregada por médias ponderadas; a distinção entre decisão e execução não é transportada para a avaliação de cada domínio, e permanece menos explícita a ligação entre um problema concreto, o diagnóstico por evidências e a seleção das ações.

A comparação mostra que a literatura cobre de forma significativa as principais dimensões do problema. Existem normas e arquiteturas para integração, mecanismos de representação semântica, modelos de partilha soberana, frameworks de governança industrial e propostas de avaliação da maturidade. Existem também trabalhos que explicam as condições necessárias para tornar os dados acessíveis e úteis a um conjunto mais amplo de intervenientes.

Apesar destes contributos, subsistem duas lacunas diretamente relacionadas com o problema desta dissertação. A primeira situa-se no instrumento de avaliação da maturidade. Os modelos analisados, mesmo os orientados por princípios ou capacidades, avaliam cada elemento numa escala progressiva única, e a distinção entre a decisão de governança e a sua execução, embora estabelecida ao nível das atividades, não é transportada para a avaliação como dois eixos independentes. Falta, assim, um instrumento que, dentro de cada domínio, separe a decisão aprovada da execução em utilização, tornando diagnosticáveis situações em que uma condição foi decidida mas não é cumprida, ou é cumprida sem uma decisão que a sustente. A segunda lacuna é de natureza metodológica. A literatura reconhece que as representações de um mesmo dado podem divergir em definição, unidade ou regra de cálculo, mas a verificação assente na comparação de valores agregados não deteta essas divergências, uma vez que o valor agregado não revela as parcelas que lhe dão origem. Uma divergência semântica pode, por isso, permanecer oculta sob resultados aparentemente coincidentes. A primeira lacuna refere-se à capacidade de diagnóstico; a segunda, à insuficiência do método de verificação que esse diagnóstico vem colmatar.

É a estas lacunas que a presente dissertação procura responder, propondo uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais de IT e OT. A framework parte de um problema ou objetivo organizacional, delimita o âmbito e avalia as condições de governança por princípio e em dois planos, o da decisão e o da execução, ligando o diagnóstico à seleção das medidas adequadas. O capítulo seguinte apresenta a sua base conceptual, a estrutura, os princípios que a constituem, a metodologia de aplicação e os critérios utilizados no diagnóstico e na avaliação da maturidade.

Capítulo 3

Metodologia de Investigação

Para responder às questões de investigação apresentadas na Secção 1.2, adotou-se uma abordagem orientada à conceção, habitualmente designada por **design science**. Esta abordagem é adequada quando a investigação procura desenvolver e avaliar um artefacto capaz de responder a um problema concreto, em vez de se limitar à observação ou à descrição de uma realidade existente [65], [66].

Neste trabalho, o artefacto desenvolvido corresponde a uma framework de governança e gestão de dados, cuja utilidade é demonstrada num contexto industrial. A escolha desta abordagem resulta, assim, da natureza do problema analisado e da finalidade prática da proposta.

A utilização inconsistente de dados entre sistemas de IT e de OT não pode ser compreendida apenas através da comparação dos valores produzidos. É também necessário analisar as definições, as regras, as responsabilidades e os mecanismos que sustentam a utilização desses dados. A investigação concentra-se, por isso, na conceção de um instrumento que permita diagnosticar as condições existentes, identificar as lacunas e orientar as ações necessárias para as tratar. O trabalho abrange ainda a demonstração do funcionamento desse instrumento e a avaliação da sua eficácia.

3.1 Artefacto e processo de investigação

O artefacto desenvolvido é uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais, independente de sistemas e tecnologias específicos. A framework integra um conjunto de princípios derivados das áreas funcionais consideradas relevantes, uma cadeia de operacionalização que relaciona cada princípio com políticas, processos e práticas, e critérios que permitem avaliar separadamente o nível de decisão e o nível de execução.

A proposta inclui ainda uma metodologia de aplicação, que define a forma como a framework deve ser utilizada perante uma necessidade organizacional concreta. Importa, contudo, distinguir essa **metodologia de aplicação**, apresentada na Secção 4.2.2 e integrada no próprio artefacto, da **metodologia de investigação** descrita neste capítulo. A primeira orienta a utilização da framework; a segunda descreve o percurso científico seguido para a conceber, demonstrar e avaliar.

O processo de investigação organiza-se em cinco fases, adaptadas das atividades propostas por Peffers et al. [66]. A atividade de comunicação prevista pelos autores é concretizada através da presente dissertação e da apresentação dos seus resultados. A correspondência entre estas cinco fases e os capítulos do documento é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Correspondência entre as fases da investigação e os capítulos da dissertação.

Fase	**Concretização**
Identificação do problema e motivação	Caracterização da coexistência de sistemas de IT e de OT e das dificuldades associadas à interpretação transversal dos dados (Capítulo 1).
Definição dos objetivos da solução	Análise das limitações das abordagens existentes e identificação das áreas funcionais a partir das quais são derivados os princípios da proposta (Capítulo 2).
Conceção e desenvolvimento	Definição da estrutura da framework, dos seus princípios, da cadeia de operacionalização e dos critérios de avaliação (Capítulo 4).
Demonstração	Aplicação da framework a um caso de uso industrial baseado em duas implementações independentes do mesmo processo e do mesmo indicador (Capítulo 5).
Avaliação	Verificação da eficácia da intervenção face à condição de sucesso definida previamente e discussão do alcance dos resultados (Secções 5.5 e 6.3).

Embora sejam apresentadas de forma sequencial, estas fases não correspondem a um processo estritamente linear. A compreensão do problema foi aprofundada ao longo do trabalho e algumas decisões de conceção foram concretizadas com base na evidência obtida durante a demonstração.

Um exemplo desse caráter iterativo é a representação comum do indicador, utilizada no tratamento das divergências identificadas no caso de uso. Esta representação não foi definida antecipadamente como um elemento fixo da framework. A necessidade de a construir tornou-se evidente durante a comparação das duas implementações, quando foi identificada a divergência semântica entre os modelos utilizados. A representação comum constitui, assim, uma solução concreta orientada pelo diagnóstico da framework. Este retorno da demonstração à conceção é uma característica natural da investigação orientada à conceção.

3.2 Demonstração e avaliação

A demonstração foi realizada através de um caso de uso industrial simplificado, centrado na representação de dados de desempenho produtivo em duas implementações independentes do mesmo processo. Foram utilizados o módulo *Material Requirements Planning* (MRP) do Odoo e o MES da Critical Manufacturing.

O indicador selecionado foi o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), por reunir numa única medida informação relativa a tempos, quantidades e unidades não conformes. Esta composição torna-o particularmente adequado para observar divergências de definição, classificação ou cálculo entre sistemas.

Para garantir a comparabilidade, as duas implementações foram configuradas a partir dos mesmos acontecimentos produtivos e dos mesmos dados de entrada. As diferenças observadas foram analisadas como evidência sobre a forma como cada sistema representa e utiliza os dados, sem serem imediatamente interpretadas como erros de configuração.

Foi também realizado um ensaio contrafactual, através da introdução de um período de espera no cenário. O objetivo consistiu em verificar se a igualdade observada entre os valores do indicador se mantinha perante uma alteração controlada das condições produtivas ou se dependia das características particulares do cenário inicial.

O caso de uso constitui uma demonstração do artefacto e não uma validação em condições operacionais reais [67]. Por ser construído e controlado, permite verificar a aplicabilidade da framework e o seu valor analítico num âmbito delimitado.

A avaliação baseia-se numa condição de sucesso definida antes da intervenção e em evidência observável recolhida durante a aplicação. A eficácia é determinada pela capacidade de resolver a necessidade organizacional que motivou o diagnóstico, e não apenas pela alteração das classificações de maturidade dos princípios.

Esta distinção evita que uma melhoria de natureza exclusivamente formal seja interpretada como uma resolução efetiva do problema. Um princípio pode passar a dispor de mais documentação ou de mecanismos adicionais sem que a necessidade inicial tenha sido resolvida. Por esse motivo, a verificação da eficácia retoma diretamente a condição de sucesso definida no início da aplicação, conforme apresentado na Secção 5.5.

Por se tratar de um caso de uso simplificado, os resultados devem ser interpretados no contexto específico da demonstração realizada. A aplicação incidiu sobre um único indicador, dois sistemas e um conjunto controlado de acontecimentos. Assim, o caso permite demonstrar a utilidade da framework neste cenário, mas não permite ainda concluir sobre a sua aplicação em organizações industriais mais complexas. Estas limitações são retomadas na Secção 6.3.

Capítulo 4

Framework de Governança e Gestão de Dados para Contextos Industriais

Neste capítulo é apresentada uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais caracterizados pela coexistência de IT e de OT. A proposta apoia as organizações na identificação e no tratamento das condições necessárias para que os dados sejam utilizados de forma consistente, fiável e rastreável entre diferentes processos, sistemas e áreas organizacionais.

A aplicação parte de um problema ou objetivo organizacional, delimita os dados relevantes, avalia as condições de governança existentes e orienta as ações necessárias para tratar as lacunas identificadas. A proposta não impõe uma tecnologia ou uma configuração organizacional única, sendo adaptada ao âmbito e às capacidades de cada contexto.

O capítulo apresenta a base conceptual da proposta, a sua estrutura e metodologia de aplicação e, por fim, os critérios utilizados no diagnóstico, na avaliação da maturidade e na orientação da evolução.

4.1 Base conceptual

A framework parte do reconhecimento de que os contextos industriais integram sistemas de IT e de OT desenvolvidos para finalidades distintas. Consequentemente, os dados associados a uma mesma entidade, processo, equipamento ou indicador podem ser representados por identificadores, unidades, granularidades, regras de cálculo ou significados diferentes [1], [2].

A integração técnica permite estabelecer ligações entre sistemas e transportar dados entre aplicações, mas não garante uma interpretação equivalente. Dois sistemas podem utilizar formatos compatíveis e continuar a atribuir significados diferentes aos dados partilhados. A utilização conjunta desses dados exige, por isso, que as respetivas definições e condições de utilização sejam explicitamente estabelecidas e compreendidas pelos diferentes intervenientes [5].

A resolução destas divergências não depende apenas de interfaces, protocolos ou plataformas tecnológicas. Exige decisões sobre quem possui autoridade para definir e aprovar as regras e as

definições aplicáveis aos dados, que fontes devem ser utilizadas, que significado lhes é atribuído, que requisitos de qualidade devem cumprir e como a sua origem e transformação podem ser reconstruídas.

Estas decisões pertencem ao domínio da governança de dados, que estabelece as responsabilidades, as regras e os mecanismos de supervisão aplicáveis aos dados. A gestão de dados concretiza essas decisões através das atividades e das tecnologias utilizadas na recolha, no armazenamento, na transformação, na integração e na utilização dos dados [39]. Esta distinção separa as decisões que cabem à organização dos mecanismos utilizados para as executar.

Os dois níveis e a ligação entre eles

A distinção anterior é adotada pela framework como estrutura, e não apenas como enquadramento. A proposta organiza-se em dois níveis. O **nível de decisão**, de natureza de governança, estabelece o que deve ser assegurado sobre os dados e quem detém autoridade para o decidir, correspondendo aos direitos de decisão no sentido de Khatri e Brown [9]: a quem cabe propor, validar, aprovar e rever cada regra, definição ou fonte. O **nível de execução**, de natureza de gestão, concretiza essas decisões através das atividades, dos artefactos e dos registos descritos pelo DAMA-DMBOK [39], produzindo evidência observável do seu efeito sobre os dados.

O objeto da proposta não é nenhum destes níveis isoladamente, mas a ligação entre ambos. Esta opção decorre da natureza do problema industrial em causa. As situações que motivam a framework não resultam, tipicamente, da ausência de governança: resultam de uma decisão aprovada que nenhum mecanismo materializa, ou de um mecanismo em utilização que nenhuma decisão sustenta. Em qualquer dos casos, existe governança e existe gestão, mas não existe correspondência entre elas, e é essa desarticulação que produz o efeito observado nos dados. Uma proposta que se situasse apenas num dos níveis não tornaria estas situações visíveis, porque cada nível, examinado isoladamente, parece adequado.

É precisamente esta ligação que os modelos de governança de dados propostos para a Indústria 4.0 deixam menos desenvolvida, como se observou no Capítulo 2. Yebenes e Zorrilla [13], [14] estabelecem os domínios que devem ser governados e os níveis de maturidade associados, mas mantêm a decisão e a sua execução agregadas num mesmo juízo por domínio. Daqui decorrem duas limitações para o problema aqui tratado: a avaliação não distingue uma decisão por concretizar de uma prática por governar, apesar de estas exigirem intervenções opostas; e não estabelece o percurso que liga uma necessidade organizacional concreta às ações que a tratam. A framework proposta situa-se neste espaço, ao avaliar cada domínio separadamente nos dois níveis e ao verificar, em seguida, a coerência entre eles.

Elementos da proposta

A proposta articula três elementos complementares: uma estrutura conceptual, que define as responsabilidades e as condições de governança; uma metodologia, que orienta a sua aplicação

a uma necessidade concreta; e um mecanismo de diagnóstico e avaliação da maturidade, que caracteriza individualmente o estado de cada princípio e identifica as lacunas existentes.

Para relacionar as decisões de governança com a sua execução, a framework adota uma cadeia constituída por políticas, processos e práticas. As políticas estabelecem as condições organizacionais a assegurar e pertencem ao nível da decisão; os processos definem as atividades necessárias para as aplicar e manter e as práticas correspondem aos mecanismos, artefactos e registos utilizados na execução, pertencendo ambos ao nível da execução. O DAMA-DMBOK é utilizado como referência geral para a organização destes elementos, sem que a proposta procure reproduzir integralmente esse referencial [39].

Derivação e delimitação dos princípios

Os princípios não são estabelecidos por enumeração, mas derivados das áreas funcionais identificadas como relevantes para contextos industriais no Capítulo 2. A cada área relevante corresponde uma condição verificável sobre os dados, e é essa condição que constitui o princípio. A Tabela 4.1 apresenta esta correspondência.

Tabela 4.1: Correspondência entre as áreas funcionais identificadas como relevantes e os princípios da framework.

Área funcional	**Princípio**	**Condição derivada**
Governança de dados (transversal)	C0	As responsabilidades e a autoridade sobre as decisões aplicáveis aos dados estão explicitamente atribuídas.
Dados mestre e de referência	C1.1	Está estabelecida a origem válida de cada dado para cada finalidade e a regra a seguir perante valores divergentes.
Arquitetura e modelação de dados	C1.2	O significado, a unidade, a granularidade e a regra de cálculo de cada dado estão fixados numa definição de referência.
Metadados	C1.2 e C2.2	As representações utilizadas em cada sistema estão descritas e relacionadas com as definições de referência (C1.2) e a origem e as transformações dos dados estão documentadas (C2.2).
Integração e interoperabilidade	C1.2	A interoperabilidade que a framework trata é semântica: a condição de que as definições sejam partilhadas e relacionadas entre sistemas. A integração técnica é considerada um habilitador, situado no nível de execução, e não origina princípio próprio.
Qualidade dos dados	C2.1	Os dados cumprem requisitos verificáveis, adequados à finalidade para que são utilizados.

A ausência de um princípio dedicado à integração merece justificação, por ser a área cuja

omissão seria menos esperada num contexto industrial. A opção decorre do argumento estabelecido no início desta secção: a integração técnica transporta dados entre sistemas sem garantir que estes sejam interpretados de forma equivalente. Tratá-la como princípio autónomo introduziria uma condição que pode estar plenamente satisfeita enquanto o problema que a framework aborda subsiste. A condição que efetivamente importa, e que a integração não assegura, é a partilha das definições, pelo que se encontra em C1.2.

Ficam fora do âmbito da proposta as áreas funcionais que, não sendo menos importantes, não incidem sobre a utilização consistente dos dados entre sistemas: a segurança, a privacidade e o controlo de acesso, a retenção e o arquivo, o armazenamento e as operações e a gestão de documentos e conteúdos. A framework não pretende, por isso, abranger de forma exaustiva todos os domínios da governança de dados, concentrando-se nas condições diretamente relacionadas com a utilização consistente, fiável e rastreável dos dados em contextos industriais heterogéneos.

Os princípios FAIR assumem um papel complementar. Não integram a estrutura principal da framework nem constituem critérios formais do diagnóstico, sendo utilizados como referência externa para compreender de que forma as decisões de governança tornam os dados mais localizáveis, acessíveis, interoperáveis e reutilizáveis [42]. A correspondência é parcial e assimétrica, e é essa assimetria que a torna informativa. O princípio C1.1 contribui para que os dados sejam localizáveis e acessíveis, ao estabelecer onde reside a origem válida de cada dado; o princípio C1.2 corresponde diretamente à interoperabilidade, entendida no sentido semântico; e os princípios C2.1 e C2.2 sustentam a reutilização, ao tornarem verificável a aptidão dos dados e reconstituível o seu percurso. O princípio C0 não tem correspondência nos princípios FAIR, que enunciam condições sobre os dados sem se pronunciarem sobre quem detém autoridade para as estabelecer. É esta lacuna que justifica que o FAIR seja utilizado como referência complementar e não como estrutura da proposta.

Pressupostos

A aplicação da framework assenta nos seguintes pressupostos:

1. A aplicação parte de um problema ou objetivo organizacional e não de uma tecnologia previamente escolhida.
2. O âmbito é delimitado aos dados, processos, sistemas e intervenientes relevantes para a necessidade identificada.
3. Os dados são analisados transversalmente aos sistemas em que são produzidos, transformados, armazenados ou utilizados.
4. As condições são avaliadas individualmente e com base em evidência observável, distinguindo a decisão de governança da sua concretização pelos mecanismos de gestão.
5. A maturidade é avaliada por princípio e não corresponde a uma progressão global ou sequencial da organização.

6. As tecnologias suportam a execução das decisões de governança, mas não substituem a definição de responsabilidades, regras e critérios.

7. As ações de evolução são definidas em função do contexto e das capacidades existentes, preservando os mecanismos adequados e concentrando a intervenção nas lacunas relevantes.

A proposta adota, assim, uma perspetiva contextual e progressiva. Não pretende governar todos os dados da organização nem impor uma solução única, mas estabelecer um referencial para delimitar uma necessidade, diagnosticar as condições existentes e orientar as ações necessárias.

4.2 Apresentação da framework

A framework organiza os elementos necessários para diagnosticar e melhorar as condições de governança dos dados num âmbito industrial concreto. No âmbito desta proposta, designam-se por dados governados os dados incluídos numa aplicação concreta da framework, bem como as fontes, as definições, as regras, as representações e os metadados necessários à sua interpretação e utilização.

Retomando o argumento da Secção 4.1, a framework não se limita a definir decisões de governança nem a descrever práticas de gestão isoladamente: o seu objeto é a ligação entre os dois níveis. A Figura 4.1 apresenta a estrutura conceptual da proposta.

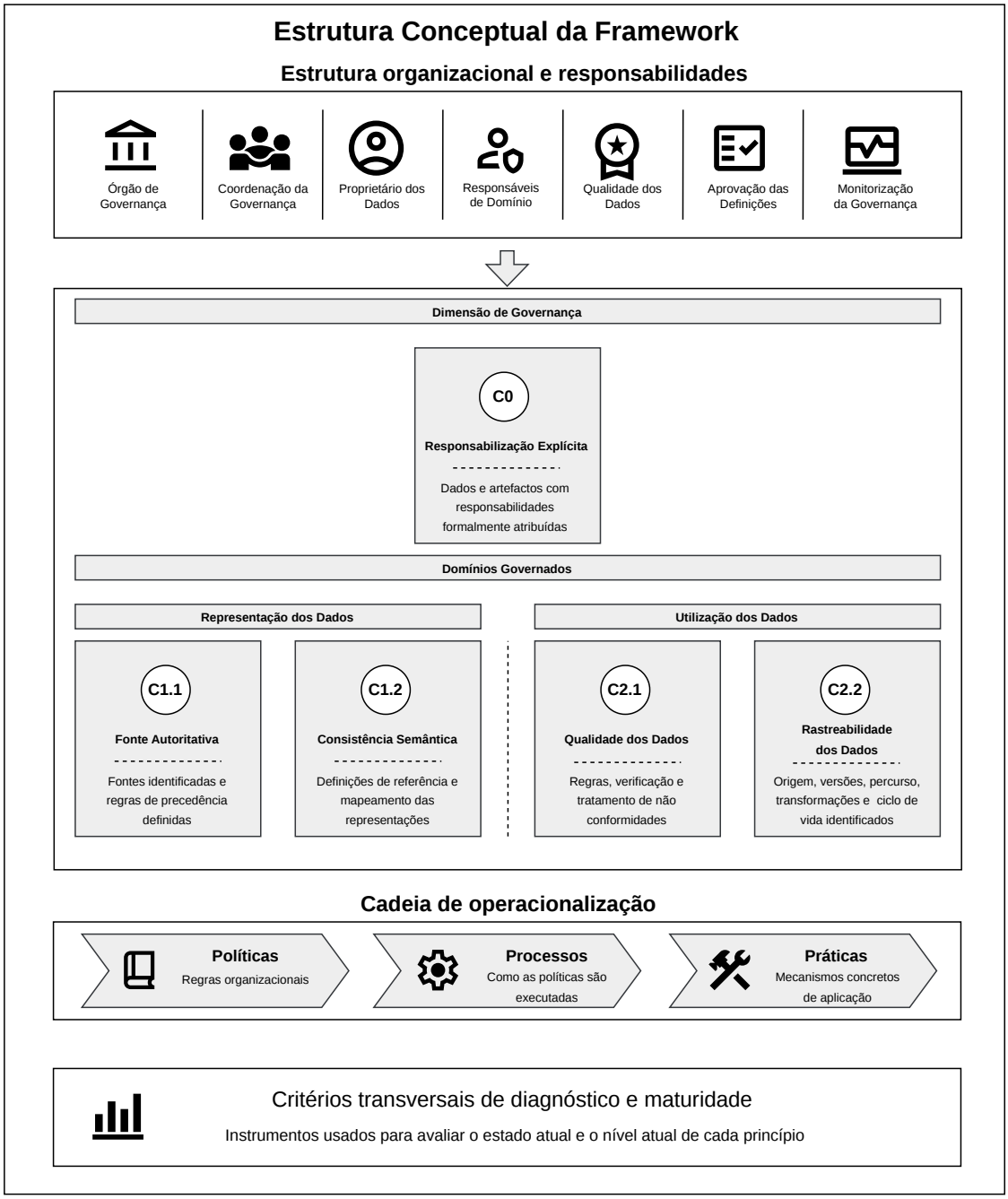


Figura 4.1: Estrutura conceptual da framework proposta, com a distinção entre o nível de decisão e o nível de execução.

A representação deve ser interpretada como uma articulação entre componentes complementares e não como uma sequência cronológica. A estrutura organizacional define as funções e as responsabilidades associadas às decisões sobre os dados. Os princípios estabelecem as condições de governança a assegurar, enquanto a cadeia de operacionalização traduz essas condições em políticas, processos e práticas.

O diagnóstico e a avaliação da maturidade caracterizam o estado de cada princípio em cada nível, identificam as capacidades existentes e reconhecem as lacunas que necessitam de tratamento.

A estrutura conceptual define, assim, o que deve ser assegurado e sob que responsabilidade. A metodologia de aplicação estabelece como a framework é utilizada num contexto concreto, desde a identificação da necessidade até à avaliação da eficácia das ações implementadas. Estes elementos são detalhados nas subsecções seguintes.

4.2.1 Estrutura conceptual e princípios

A estrutura conceptual organiza as responsabilidades, as condições de governança e os mecanismos necessários para governar os dados governados. A sua configuração é adaptada ao contexto da organização e não impõe uma arquitetura tecnológica ou uma estrutura organizacional única.

Estrutura organizacional e responsabilidades

As decisões aplicáveis aos dados governados devem possuir responsáveis identificados. A seleção da fonte autoritativa, a aprovação das definições, a definição das regras de qualidade e a validação dos mapeamentos exigem uma atribuição explícita de autoridade e responsabilidade.

A framework considera as funções apresentadas na Tabela 4.2. Estas funções representam responsabilidades necessárias à governança dos dados e não correspondem obrigatoriamente a cargos formais ou a pessoas distintas.

Tabela 4.2: Funções previstas na estrutura organizacional da framework.

Função	**Responsabilidade principal**
Órgão de governança	Aprovar orientações, validar decisões com impacto transversal e resolver conflitos entre áreas ou domínios.
Coordenação da governança	Coordenar a aplicação da framework, articular os intervenientes e acompanhar a execução das decisões aprovadas.
Proprietário dos dados	Assumir a responsabilidade global pelos dados de um domínio e pela sua adequação às necessidades da organização.
Responsáveis de domínio	Disponibilizar conhecimento sobre o contexto em que os dados são produzidos e utilizados e participar na definição das regras aplicáveis.
Função de qualidade dos dados	Apoiar a definição, a verificação e a melhoria das regras de qualidade aplicáveis aos dados governados.
Função de aprovação das definições	Validar as definições de referência e os mapeamentos entre as representações utilizadas.
Função de monitorização da governança	Acompanhar o cumprimento das políticas, a execução dos processos e a continuidade das práticas implementadas.

A distribuição destas funções depende da dimensão da organização, da complexidade do âmbito e das capacidades existentes. Numa organização de menor dimensão, ou num âmbito delimitado, uma mesma pessoa pode acumular várias das funções previstas, sem que daí resulte incumprimento: o que a framework exige é que cada responsabilidade esteja atribuída, e não que existam tantos intervenientes quantas as funções da tabela. Em contextos mais complexos, as funções podem ser distribuídas por diferentes áreas, equipas ou níveis de decisão.

A framework não exige, por isso, a criação de uma estrutura organizacional paralela. Exige apenas que seja possível identificar quem propõe, valida, aprova, executa e monitoriza cada decisão. Esta distribuição pode ser formalizada através de uma matriz de responsabilidades ou de outro mecanismo equivalente.

Em contextos onde coexistem IT e OT, a atribuição das funções deve ainda assegurar a participação de intervenientes com conhecimento dos diferentes domínios. Esta articulação reduz o risco de decisões definidas apenas a partir de uma perspetiva empresarial ou operacional.

Princípios da framework

Os princípios constituem o núcleo da framework e estabelecem as condições de governança e de gestão a assegurar no âmbito analisado. Em conjunto, determinam como são atribuídas as responsabilidades sobre os dados, que fontes devem ser utilizadas, como o seu significado é definido, que requisitos de qualidade devem cumprir e como a sua origem e evolução podem ser reconstruídas. Cada princípio é analisado individualmente e pode apresentar uma classificação distinta dos restantes.

A numeração adotada reflete a natureza das condições enunciadas. O princípio C0 distingue-se por ser transversal aos restantes. O grupo C1 reúne as condições relativas à **representação** dos dados, ou seja, de onde provêm (C1.1) e o que significam (C1.2); o grupo C2 reúne as condições relativas à sua **utilização**, isto é, se servem a finalidade prevista (C2.1) e se o seu percurso pode ser reconstruído (C2.2). A distinção entre os dois grupos é a que separa aquilo que os dados são daquilo que deles se pode afirmar quando são utilizados.

Os cinco princípios não se situam todos no mesmo plano. Retomando a distinção estabelecida na Secção 2.4, entre as dimensões de governança, que determinam o que é decidido e por quem, e os domínios sobre os quais essa governança se exerce [8], o princípio C0 corresponde à própria dimensão de governança: fixa os direitos de decisão sobre os dados [9] e aplica-se transversalmente aos restantes. Os princípios C1.1 a C2.2 correspondem a domínios governados, as fontes, as definições, a qualidade e a rastreabilidade, sobre os quais essa autoridade incide.

A designação de princípio é aqui utilizada num sentido próprio, que importa delimitar. Não se trata de orientações normativas de alto nível, como as que Brous et al. [35] identificam a partir da literatura, que estabelecem que os dados devem ser tratados como ativo, que a responsabilização deve ser clara e que a governança deve alinhar-se com os objetivos da organização. Essas orientações situam-se num plano de abstração superior e justificam por que razão uma organização governa os seus dados, mas não constituem, por si só, um instrumento de diagnóstico: não

é possível determinar, por evidência observável e num âmbito delimitado, se a orientação de tratar os dados como ativo se encontra ou não satisfeita. Os princípios desta framework situam-se num plano inferior e complementar: enunciam condições verificáveis sobre um domínio de dados, formuladas de modo a poderem ser avaliadas. O princípio C0 corresponde, neste sentido, à operacionalização da clareza na responsabilização identificada por aqueles autores, e os restantes às condições cuja verificação essa responsabilização torna possível. A utilização do termo neste sentido tem precedente nos princípios FAIR [42], que enunciam igualmente condições sobre os dados e não orientações de conduta organizacional, e que deram origem a um modelo de maturidade com indicadores avaliados individualmente por princípio [55].

Cada domínio governado é assegurado a dois níveis. No nível de decisão, de natureza de governança, aprovam-se as fontes, as definições e as regras aplicáveis e atribui-se a autoridade correspondente. No nível de execução, de natureza de gestão, essas decisões são concretizadas através de catálogos, glossários, mapeamentos e registos, que correspondem a áreas funcionais da gestão de dados como os metadados, a arquitetura, os dados mestre e de referência e a qualidade [39]. É esta dualidade que distingue um domínio governado de uma área funcional de gestão: a área funcional situa-se apenas no plano da execução, ao passo que o domínio governado exige, além disso, uma decisão aprovada por quem detém autoridade para a tomar. O princípio C0, por corresponder à própria dimensão de governança, não possui nível de execução autónomo: os artefactos que lhe estão associados registam a atribuição dos direitos de decisão, e não a sua concretização sobre um domínio de dados. A Tabela 4.3 torna explícita esta distribuição.

Tabela 4.3: Distribuição dos princípios pela dimensão de governança e pelos domínios governados, com os respetivos níveis de decisão e de execução.

Princípio	**Natureza**	**Nível de decisão (governança)**	**Nível de execução (gestão)**
C0. Responsabilização explícita	Dimensão de governança (transversal).	Atribuir os direitos de decisão: quem propõe, valida, aprova e monitoriza as decisões sobre os dados.	Não aplicável. A matriz de responsabilidades e o catálogo de dados governados constituem a evidência da atribuição, e não a sua execução sobre um domínio de dados.
C1.1. Fonte autoritativa	Domínio governado: dados mestre e de referência.	Aprovar a fonte autoritativa de cada dado e as regras de precedência perante valores divergentes.	Catálogo de fontes em utilização e mecanismo que determina, na prática, que valores são utilizados.
C1.2. Consistência semântica	Domínio governado: metadados e arquitetura.	Aprovar as definições de referência e validar os mapeamentos entre as representações.	Glossário, catálogo de metadados e mapeamento entre as representações, em utilização e versionados.
C2.1. Qualidade dos dados	Domínio governado: qualidade dos dados.	Definir e aprovar os requisitos e as regras de qualidade aplicáveis à finalidade.	Verificação das regras e registo e tratamento das não conformidades.
C2.2. Rastreabilidade dos dados	Domínio governado: metadados e linhagem.	Definir a rastreabilidade exigida e as regras de versão e de retenção.	Mapa de rastreabilidade, registo de versões e linhagem dos dados.

Note-se que os elementos indicados no nível de execução são descritos como mecanismos em utilização, e não por referência à decisão que os deveria sustentar. Esta formulação é deliberada e retomada na Secção 4.3: se a existência de um artefacto pressupusesse a decisão que o aprova, os dois níveis deixariam de poder falhar de forma independente e a situação de execução não governada tornar-se-ia inobservável.

C0. Responsabilização explícita

Os dados governados devem estar identificados e possuir responsabilidades explicitamente atribuídas. Para cada decisão aplicável, deve ser possível determinar quem propõe, valida, aprova, executa e monitoriza.

Este princípio evita decisões informais, contraditórias ou dependentes exclusivamente do conhecimento individual. Desta forma, a autoridade e a responsabilidade associadas aos dados permanecem identificadas ao longo da sua utilização.

O objeto deste princípio é a atribuição dos direitos de decisão, e não o seu exercício. Verificar C0 consiste em determinar se está estabelecido quem detém autoridade sobre cada decisão

aplicável aos dados governados; verificar se essa autoridade foi efetivamente exercida sobre uma fonte, uma definição, uma regra de qualidade ou um requisito de rastreabilidade pertence ao nível de decisão do domínio correspondente. Daqui decorre que uma organização pode satisfazer C0 e apresentar, ainda assim, lacunas no nível de decisão de um ou mais domínios governados: a autoridade existe e está atribuída, mas não produziu ainda a aprovação exigida por esse domínio. As duas condições são distintas e avaliadas separadamente. Esta separação evita que a mesma falta seja registada duas vezes, em C0 e no domínio afetado, e localiza-a no princípio onde a intervenção tem efetivamente de ocorrer.

C1.1. Fonte autoritativa

As fontes existentes para os dados governados devem estar identificadas. Para cada dado e contexto de utilização, deve ser definida e aprovada a fonte autoritativa aplicável.

A existência de várias fontes não constitui, por si só, uma lacuna. O problema surge quando não está estabelecido que fonte deve prevalecer perante valores divergentes, ou segundo que regras essas divergências devem ser tratadas. Um mesmo dado pode ter fontes autoritativas diferentes para finalidades distintas, desde que essa distinção esteja definida e aprovada.

A designação adotada exige uma precisão. A fonte autoritativa corresponde ao sistema reconhecido como origem válida de um dado para uma finalidade determinada, no sentido de *system of record*, e não aos dados de referência tal como são definidos pelo DAMA-DMBOK, que incluem listas de códigos, taxonomias e classificações partilhadas [39]. Trata-se de conceitos distintos: o primeiro respeita à autoridade sobre a proveniência do dado, enquanto o segundo se refere ao seu conteúdo normalizado. A gestão de dados de referência neste segundo sentido não integra o âmbito da proposta.

C1.2. Consistência semântica

Os dados governados devem possuir definições de referência aprovadas. As representações utilizadas nos diferentes sistemas devem estar identificadas e relacionadas com essas definições.

A definição de referência estabelece o significado reconhecido pela organização e pode incluir a unidade, a granularidade, a regra de cálculo e as condições de validade. O mapeamento relaciona essa definição com os nomes, códigos, estruturas ou categorias utilizados localmente em cada sistema.

Este princípio não exige que todos os sistemas adotem internamente a mesma representação. Exige, contudo, que as diferenças existentes sejam explícitas, compreendidas e controladas, de modo a evitar interpretações divergentes dos mesmos dados.

C2.1. Qualidade dos dados

Os dados governados devem cumprir requisitos de qualidade adequados à finalidade para a qual são utilizados. Estes requisitos podem incidir sobre dimensões como a completude, a validade, a consistência, a atualidade, a exatidão ou a unicidade.

As dimensões relevantes dependem do contexto e não têm de ser aplicadas de forma uniforme a todos os dados. Contudo, os requisitos selecionados devem estar definidos através de regras verificáveis, o seu cumprimento deve ser monitorizado e as não conformidades devem ser registadas e tratadas.

A qualidade não corresponde, por isso, a uma propriedade absoluta, mas à capacidade de os dados satisfazerem as necessidades do âmbito analisado.

A qualidade dos dados e a consistência semântica incidem sobre planos diferentes, e a distinção entre ambos merece um critério explícito, por ser determinante para o diagnóstico. A qualidade dos dados (C2.1) avalia se os valores registados correspondem aos acontecimentos que pretendem representar, dentro das regras e definições de cada sistema. Trata-se de aptidão para o uso [10]: um dado é de qualidade quando é completo, válido e exato face à finalidade e às regras do sistema que o produz, gerido segundo um ciclo próprio [11], e independentemente de outros sistemas. A consistência semântica (C1.2) avalia um plano distinto, o de saber se as próprias regras e definições são partilhadas e relacionadas entre sistemas.

Desta distinção decorre um critério operacional. Um dado pode satisfazer integralmente a qualidade dos dados em cada sistema e, ainda assim, violar a consistência semântica, porque a divergência não está nos valores, mas nas definições que os produzem. Um valor pode estar correto segundo as regras de um sistema e correto segundo as regras de outro sem que essas regras coincidam. A qualidade dos dados não deteta esta situação, uma vez que avalia cada sistema isoladamente; é a consistência semântica que a torna visível, ao confrontar as definições entre sistemas. Por este motivo, a existência de dados de qualidade em cada sistema não dispensa a avaliação da consistência semântica, nem a torna redundante.

C2.2. Rastreabilidade dos dados

Deve ser possível reconstruir a origem, o percurso e as transformações relevantes dos dados governados. Para esse efeito, devem estar identificados os sistemas, os processos e os registos associados à sua produção, alteração e utilização.

A rastreabilidade deve permitir determinar onde os dados foram produzidos, por que sistemas passaram, que alterações sofreram e qual a versão considerada válida. Sempre que aplicável, devem ainda ser registadas as regras de transformação e as decisões que influenciam o seu ciclo de vida.

A profundidade da rastreabilidade depende da criticidade dos dados, da finalidade prevista e dos riscos associados. Este princípio não exige o mesmo nível de detalhe para todos os dados, mas requer evidência suficiente para compreender e verificar a sua evolução.

A Figura 4.2 apresenta as políticas, os processos e as práticas associados a cada princípio, distribuídos pelos dois níveis.

Princípio	Nível de Decisão	Nivel de Execução	
	Política	**Processo**	**Prática**
 **C0 Responsabilização explícita**	Todos os dados governados devem estar formalmente identificados e possuir responsabilidades atribuídas	**1.** Identificar e registar dados governados **2.** Atribuir responsabilidades **3.** Rever responsabilidades	**1.1.** Catálogo de dados governados **2.1.** Matriz de responsabilidades **3.1.** Matriz de responsabilidades atualizada e histórico de revisão
 **C1.1 Fonte autoritativa**	Todos os dados governados devem possuir uma fonte autoritativa aprovada e regras de precedência definidas	**1.** Identificar as fontes existentes **2.** Selecionar e aprovar autoritativa **3.** Gerir regras de precedência e divergências	**1.1.** Catálogo de fontes **2.1.** Catálogo de fonte autoritativa com decisão e estado de aprovação **3.1.** Regras de precedência e resolução de divergências
 **C1.2 Consistência semântica**	Todos os dados governados devem possuir uma definição de referência aprovada e representações devidamente mapeadas	**1.** Definir e aprovar definições de referência **2.** Mapear as diferentes representações **3.** Rever definições e mapeamentos	**1.1.** Glossário de negócio **2.1.** Catálogo de metadados **2.2.** Mapeamento entre representações **3.1.** Histórico de definições e mapeamentos
 **C2.1 Qualidade dos dados**	Todos os dados governados devem cumprir regras de qualidade definidas e verificáveis	**1.** Definir regras de qualidade **2.** Verificar a qualidade dos dados **3.** Tratar não conformidades e melhorar a qualidade	**1.1.** Regras de qualidade **2.1.** Registo de verificações **3.1.** Registo de não conformidades e ações corretivas
 **C2.2 Rastreabilidade dos dados**	Todos os dados governados devem possuir origem, percurso, transformações, versões e ciclo de vida identificados e documentados.	**1.** Identificar e documentar a origem e o percurso **2.** Registar versões e alterações **3.** Gerir o ciclo de vida	**1.1.** Mapa de rastreabilidade **2.1.** Registo de versões e alterações **3.1.** Regras de retenção e ciclo de vida

Figura 4.2: Políticas, processos e práticas associados aos princípios da framework, com a política no nível de decisão e o processo e a prática no nível de execução.

Os princípios são avaliados individualmente, mas desempenham funções complementares. O princípio C0 estabelece a base organizacional necessária para atribuir autoridade e responsabilidade sobre os dados. O princípio C1.1 determina as fontes que devem ser utilizadas, enquanto o princípio C1.2 define como os dados devem ser interpretados e relacionados entre sistemas. Por sua vez, o princípio C2.1 verifica se os dados são adequados à finalidade prevista e o princípio C2.2 permite compreender a sua origem, o seu percurso e as transformações realizadas.

O cumprimento de um princípio não demonstra o cumprimento dos restantes, nem o cumprimento de um dos níveis demonstra o do outro. O diagnóstico produz, por isso, um perfil diferenciado, que distingue tanto os princípios entre si como, dentro de cada domínio governado, a decisão da sua execução.

Cadeia de operacionalização

Cada princípio é concretizado através de políticas, processos e práticas, e é esta cadeia que liga os dois níveis introduzidos na Tabela 4.3. A política pertence ao nível de decisão: fixa, sob autoridade de governança, a condição que deve ser assegurada. O processo e a prática pertencem ao nível de execução: traduzem essa condição nas atividades e nos mecanismos de gestão que a concretizam e produzem evidência. A cadeia é, assim, a ponte entre a decisão e a execução, e não uma sequência situada apenas num dos planos.

A Tabela 4.4 apresenta a função de cada elemento da cadeia e o nível a que pertence.

Tabela 4.4: Elementos da cadeia de operacionalização da framework e respetiva distribuição pelos níveis de decisão e de execução.

Elemento	**Nível**	**Questão orientadora**	**Função**
Política	Decisão (governança)	O que deve ser assegurado, e sob que autoridade?	Fixa a condição aplicável aos dados governados e o responsável pela sua aprovação e revisão.
Processo	Execução (gestão)	Através de que atividades é assegurado?	Define as atividades recorrentes necessárias para aplicar, manter e rever a política.
Prática	Execução (gestão)	Através de que mecanismo se concretiza?	Materializa o processo através de artefactos, registos, procedimentos ou mecanismos tecnológicos, produzindo evidência observável.

A cadeia distribui-se, assim, pelos dois níveis: a política corresponde ao nível de decisão, enquanto o processo e a prática correspondem ao nível de execução. Daqui decorre que a existência isolada de uma prática não demonstra o cumprimento de um princípio, do mesmo modo que uma política aprovada sem processos nem práticas que a apliquem permanece sem efeito sobre os dados. O cumprimento depende da presença de ambos os níveis e da coerência entre eles, verificada através da evidência produzida na execução. Esta relação permite distinguir as quatro situações que uma leitura agregada confundiria: a decisão aprovada e materializada, a decisão que nunca foi concretizada, o mecanismo em utilização que nenhuma decisão sustenta e a ausência de ambos.

4.2.2 Metodologia de aplicação

A metodologia define a sequência de atividades através da qual a framework é aplicada a um contexto concreto: parte de um problema ou objetivo organizacional, delimita o âmbito, diagnostica as condições existentes, identifica as lacunas relevantes e orienta a definição, a implementação e a avaliação das ações necessárias.

A Figura 4.3 apresenta o respetivo diagrama de atividades.

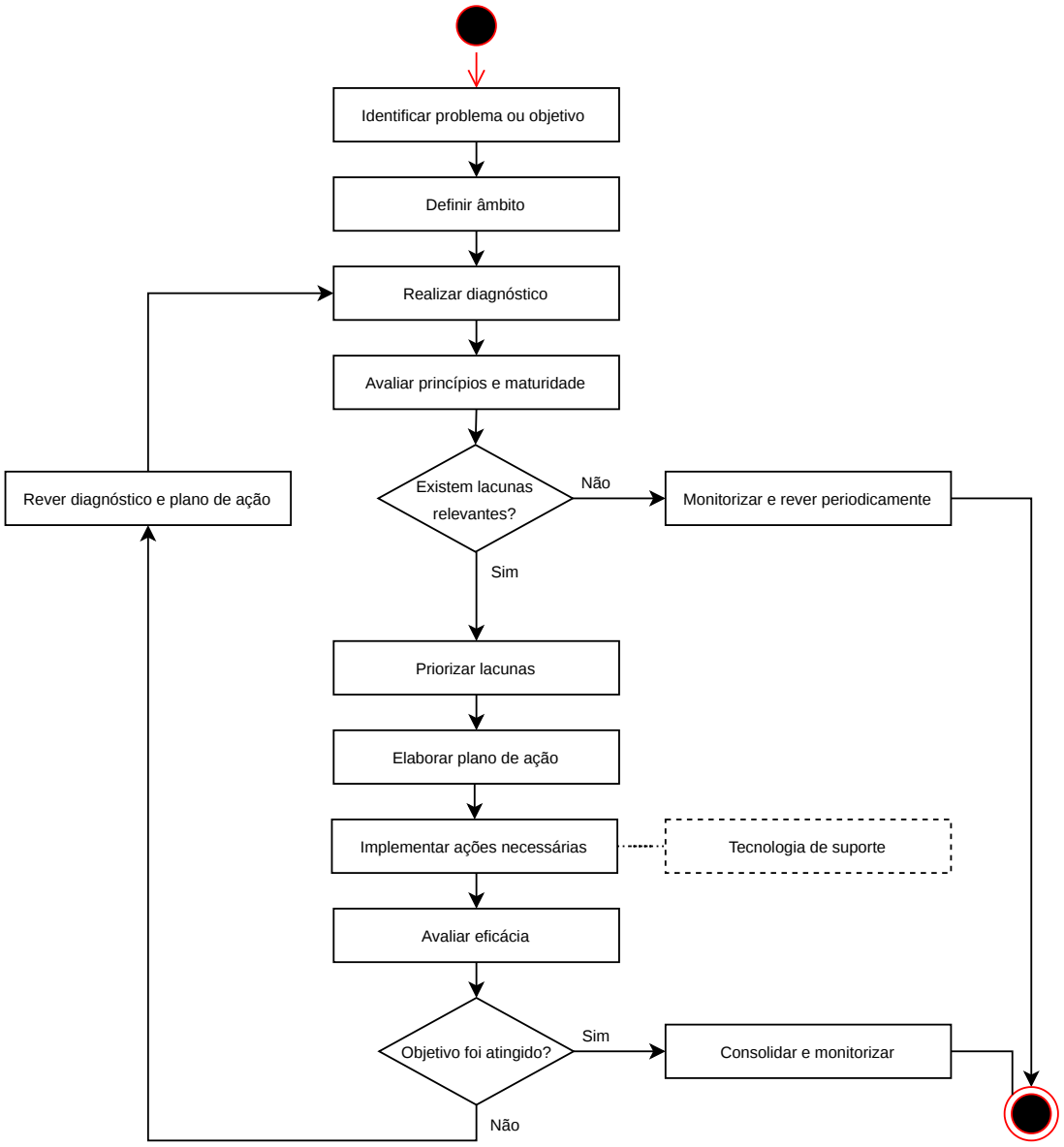


Figura 4.3: Diagrama de atividades da metodologia de aplicação da framework.

Ao contrário da estrutura conceptual, o diagrama representa uma sequência de aplicação. Contudo, esta sequência não é rígida: as atividades anteriores podem ser revistas quando o diagnóstico ou a avaliação da eficácia produzem nova evidência relevante.

A metodologia organiza-se em três momentos complementares: identificação e delimitação da necessidade; diagnóstico e definição da intervenção; e implementação, avaliação e continuidade. A Tabela 4.5 sintetiza as atividades e os respetivos resultados.

Tabela 4.5: Atividades e resultados da metodologia de aplicação da framework.

Atividade	**Resultado principal**
Identificar o problema ou objetivo	Caracterização da necessidade, do impacto, do objetivo pretendido e da condição de sucesso.
Definir o âmbito	Delimitação dos dados, processos, sistemas, intervenientes e limites da análise.
Realizar o diagnóstico e avaliar a maturidade	Perfil de maturidade por princípio e por nível, sustentado pela evidência recolhida.
Identificar e priorizar as lacunas	Seleção das lacunas relevantes e definição da respetiva prioridade de tratamento.
Preparar e implementar o plano de ação	Definição e execução das ações necessárias para tratar as lacunas selecionadas.
Avaliar a eficácia	Verificação do contributo das ações para o objetivo e para a condição de sucesso.
Consolidar e monitorizar	Integração das condições implementadas no funcionamento regular da organização e acompanhamento da sua continuidade.

Identificação e delimitação da necessidade

A aplicação começa pela identificação do problema ou objetivo que justifica a intervenção. Esta atividade procura compreender a necessidade organizacional, o contexto em que ocorre, o impacto observado e o resultado pretendido, sem antecipar a causa ou a solução.

A identificação do problema ou objetivo é orientada pelas seguintes questões:

1. Qual é o problema observado?
2. Onde é que o problema aparece?
3. Que decisão ou atividade está a ser afetada?
4. Qual é o resultado que a organização pretende alcançar?
5. Como pode ser determinado que o problema ficou resolvido ou que o objetivo foi atingido?

As respostas registam o problema observado, o contexto, o impacto, o objetivo pretendido e a condição de sucesso, constituindo a ficha de identificação da necessidade. A causa deve permanecer desconhecida, salvo quando existe evidência prévia suficiente, e a solução tecnológica não deve ser definida nesta atividade.

Identificada a necessidade, delimita-se o âmbito da aplicação. Esta atividade determina os dados, os processos, os sistemas, os intervenientes e os limites considerados no diagnóstico.

A definição do âmbito é orientada pelas seguintes questões:

1. Que processo, área ou atividade será analisado?
2. Que dados e respetivas definições estão envolvidos?
3. Que sistemas, equipamentos ou fontes produzem, registam, transformam ou utilizam esses dados?
4. Que áreas, funções ou intervenientes participam na sua criação, utilização ou gestão?
5. Que limites operacionais, temporais ou físicos serão considerados?
6. O que fica explicitamente fora da análise?

O âmbito deve abranger os elementos relevantes para compreender a necessidade, sem tornar a análise excessivamente abrangente. Os elementos excluídos devem ser registados de forma explícita, permitindo compreender os limites das conclusões.

Quando o diagnóstico revela dados, sistemas ou intervenientes relevantes que não foram inicialmente considerados, o âmbito pode ser revisto. Qualquer alteração deve ser registada e justificada, de modo a preservar a coerência da aplicação.

Diagnóstico e definição da intervenção

Delimitado o âmbito, realiza-se o diagnóstico do estado atual. Esta atividade recolhe e analisa evidência sobre as responsabilidades, as fontes, as definições, as regras e os mecanismos existentes para os dados em análise. Essa evidência é comparada com as condições dos cinco princípios e, nos domínios governados, o estado de cada nível é determinado separadamente, dando origem à classificação prevista na Tabela 4.7. O resultado é um perfil de maturidade por princípio, acompanhado pela evidência observada, pela respetiva justificação e pelas lacunas identificadas.

Uma lacuna corresponde à diferença entre a condição esperada e o estado demonstrado. A sua formulação indica as capacidades que já existem, os elementos que ainda faltam e o nível em que essa falta se situa, evitando que a intervenção elimine mecanismos adequados.

Nem todas as lacunas originam uma ação. A relevância de cada uma depende da sua relação com o problema, com a condição de sucesso e com os riscos associados aos dados. As lacunas relevantes são priorizadas segundo o impacto, o risco, a urgência, as dependências, o esforço e a viabilidade.

As lacunas selecionadas traduzem-se num plano de ação. Cada ação identifica o princípio, o nível e a lacuna associados, a alteração a realizar, o responsável, o prazo, os recursos, o resultado esperado, a evidência de conclusão e o critério de eficácia. O plano pode incluir alterações organizacionais, processuais, documentais ou tecnológicas, sendo a tecnologia introduzida apenas quando necessária para executar as decisões de governança previamente estabelecidas.

Implementação, avaliação e continuidade

A implementação concretiza as ações do plano, executando as alterações organizacionais, processuais, documentais ou tecnológicas necessárias para tratar as lacunas selecionadas. Cada ação

produz evidência da sua conclusão, como decisões aprovadas, responsabilidades atribuídas, configurações, registos ou resultados de testes.

Segue-se a avaliação da eficácia, que retoma o problema e a condição de sucesso definidos no início. Aqui não interessa apenas confirmar que as ações foram executadas, mas verificar se contribuíram para tratar a necessidade. A eficácia pode ser aferida através de testes, indicadores, comparações, amostras, auditorias ou observação direta, consoante a natureza do problema.

Quando a condição de sucesso não é atingida, analisam-se as causas e revêem-se os elementos afetados, que podem incluir o diagnóstico, a priorização das lacunas, o plano de ação ou o próprio âmbito. Quando a eficácia é demonstrada, as novas condições integram-se no funcionamento regular da organização e permanecem sob monitorização, de modo a detetar alterações que possam introduzir novas lacunas.

A metodologia é, assim, iterativa. Não termina com a atribuição de uma classificação nem com a adoção de uma tecnologia, mas quando a necessidade fica tratada e as condições implementadas podem manter-se ao longo do tempo.

4.3 Diagnóstico, avaliação da maturidade e evolução

A secção anterior descreveu a metodologia de aplicação. Esta detalha os critérios que sustentam o momento central dessa metodologia: o diagnóstico, a classificação da maturidade e a leitura das lacunas que orientam a evolução.

O princípio que organiza estes critérios é simples. A maturidade não é uma propriedade declarada, mas algo que tem de ser demonstrado por evidência observável e avaliado princípio a princípio, sem se converter numa nota global da organização. Em cada domínio governado, essa avaliação é ainda conduzida separadamente no nível de decisão e no nível de execução, de modo a tornar visível qual dos dois se encontra em falta.

4.3.1 Critérios de diagnóstico e avaliação da maturidade

Âmbito e evidência

A avaliação incide sobre os dados do âmbito e sobre as condições necessárias à sua governança, considerando as fontes, as definições, as representações, as regras, os metadados, os processos, os sistemas e os intervenientes relevantes. Quando o âmbito reúne grupos de dados com condições muito diferentes, estes são avaliados separadamente, para que uma classificação agregada não oculte lacunas ou capacidades específicas.

O ponto mais importante do diagnóstico é a natureza da evidência. Distinguem-se dois tipos: **a evidência declarada**, que corresponde ao que os intervenientes descrevem em entrevistas ou reuniões, e a **evidência observada**, confirmada através de documentos, registos, configurações, históricos, *logs* ou observação direta. A primeira orienta a recolha, mas não basta para demonstrar o cumprimento de um princípio. Sempre que a evidência observável é insuficiente, a classificação reflete essa limitação.

Esta exigência aplica-se a ambos os níveis, mas a evidência que cada um exige é de natureza distinta, e a distinção é decisiva para o diagnóstico. No nível de execução, a evidência observada corresponde aos artefactos e aos registos produzidos pelos mecanismos em utilização: o catálogo que existe, o glossário que é consultado, o registo da verificação que foi feita. No nível de decisão, corresponde ao **registo da própria aprovação**, que identifica o que foi decidido, por quem, em que data e com que periodicidade de revisão. Daqui decorre uma consequência prática: um mesmo artefacto pode servir de evidência aos dois níveis, mas por razões diferentes e verificáveis separadamente. Um glossário demonstra o nível de execução por estar em utilização e abranger os dados do âmbito; demonstra o nível de decisão apenas se incorporar, ou remeter para, o registo da aprovação das definições que contém. Um glossário sem esse registo é um artefacto em utilização que nenhuma decisão sustenta. Uma decisão descrita em entrevista, mas sem registo verificável, permanece evidência declarada e não sustenta o cumprimento.

Desta distinção decorre um cuidado adicional: nem a ausência nem a presença de uma ferramenta são, por si só, conclusivas. Um procedimento aprovado ou uma folha de cálculo controlada podem constituir evidência adequada; em sentido inverso, uma ferramenta sofisticada nada demonstra quando não existem decisões aprovadas, responsabilidades atribuídas ou evidência da sua utilização.

Cada registo de avaliação identifica ainda os dados abrangidos, os sistemas e as fontes considerados, os intervenientes consultados, o período a que se refere a evidência e as limitações encontradas. Qualquer alteração ao âmbito durante o diagnóstico é registada e justificada.

Condições de avaliação

Cada princípio é avaliado face às condições que concretizam a sua finalidade. A avaliação não exige que as políticas, os processos e as práticas existam em documentos separados nem que utilizem as designações da framework. Exige, contudo, que as funções correspondentes estejam estabelecidas, sejam aplicadas no âmbito analisado e possam ser demonstradas através de evidência.

Nos domínios governados, as condições distribuem-se pelos dois níveis introduzidos na Tabela 4.3. No nível de decisão verifica-se se a fonte, a definição, a regra de qualidade ou a rastreabilidade exigida se encontram aprovadas por quem detém autoridade para o fazer. No nível de execução verifica-se se existem, em utilização, os artefactos, os registos e os processos que produzem evidência sobre os dados do âmbito. A Tabela 4.6 apresenta as condições a verificar em cada nível.

Tabela 4.6: Condições consideradas no diagnóstico, separadas pelo nível de decisão e pelo nível de execução.

Princípio	**Nível de decisão (governança)**	**Nível de execução (gestão)**
C0. Responsabilização explícita	Os dados governados estão identificados; as responsabilidades de decisão, validação, execução e monitorização estão atribuídas; existe autoridade para aprovar e rever as decisões aplicáveis.	Não aplicável. Enquanto dimensão de governança, C0 é avaliado apenas no nível de decisão; a matriz de responsabilidades e o catálogo de dados governados constituem a evidência dessa atribuição.
C1.1. Fonte autoritativa	Existe registo da aprovação da fonte autoritativa de cada dado e contexto de utilização, por quem detém autoridade para o fazer; estão aprovadas as regras de precedência perante valores divergentes e a periodicidade de revisão.	As fontes existentes estão identificadas e registadas num catálogo em utilização; existe um mecanismo que determina, na prática, que valores são utilizados; a sua aplicação produz evidência observável.
C1.2. Consistência semântica	Existe registo da aprovação das definições de referência dos dados do âmbito, incluindo unidade, granularidade e regra de cálculo, e da validação dos mapeamentos, por quem detém autoridade para o fazer.	Existem, em utilização, um glossário e um catálogo de metadados que abrangem os dados do âmbito e um mapeamento que relaciona as representações de cada sistema com as definições registadas; as diferenças e as alterações são documentadas e versionadas.
C2.1. Qualidade dos dados	Existe registo da aprovação dos requisitos de qualidade face à finalidade e está estabelecido quem aprova as regras e decide sobre o tratamento das não conformidades.	Existem regras verificáveis efetivamente aplicadas aos dados do âmbito; o cumprimento é monitorizado; as não conformidades são registadas e tratadas, produzindo evidência.
C2.2. Rastreabilidade dos dados	Existe registo da aprovação da rastreabilidade exigida para os dados do âmbito, bem como das regras de versão e de retenção aplicáveis.	A origem, o percurso e as transformações relevantes estão documentados; as versões e as alterações são registadas; a relação com as fontes é preservada e o ciclo de vida é controlado quando aplicável.

As condições do nível de execução são deliberadamente formuladas sem referência à decisão que as deveria sustentar. Se a verificação de um artefacto exigisse que este refletisse uma decisão aprovada, os dois níveis deixariam de poder falhar de forma independente e a situação de execução não governada seria, por construção, impossível de observar. A ordem de verificação é, por isso, a seguinte: avalia-se cada nível separadamente, contra as condições da tabela, e só depois se verifica a coerência entre ambos.

A presença de um artefacto isolado não demonstra, por si só, o cumprimento de um princípio, nem a existência de uma decisão aprovada dispensa a verificação da sua concretização. Um

glossário, por exemplo, não demonstra o cumprimento do princípio C1.2 quando as definições não abrangem os dados em análise ou não estão relacionadas com as representações dos sistemas: o nível de decisão pode estar assegurado e o de execução permanecer em falta. A situação inversa é igualmente possível. Um catálogo de fontes mantido e utilizado, mas que nunca foi objeto de aprovação nem possui responsável designado, demonstra execução sem que exista decisão que a sustente. De igual modo, um *log* não demonstra o cumprimento do princípio C2.2 quando não permite reconstruir a origem, o percurso ou as transformações relevantes dos dados.

A avaliação verifica, assim, não apenas a existência dos mecanismos, mas também a decisão que os fundamenta, a evidência que produzem e a sua adequação às condições do princípio.

Classificação e registo do resultado

A maturidade de cada princípio é expressa através de quatro classificações, que resultam do estado combinado dos dois níveis: **Cumpre**, quando ambos estão assegurados; **Parcial: decisão não materializada**, quando existe decisão sem execução; **Parcial: execução não governada**, quando existe execução sem decisão; e **Não cumpre**, quando nenhum dos níveis pode ser demonstrado. Estas classificações não correspondem a níveis sucessivos de uma trajetória global, nem as duas situações parciais representam graus diferentes da mesma condição: correspondem a lacunas de natureza distinta, que exigem intervenções distintas.

Tabela 4.7: Critérios gerais para a classificação da maturidade de cada princípio, a partir do estado dos dois níveis.

Classificação	**Decisão**	**Execução**	**Critério geral**
Cumpre	Sim	Sim	A decisão está aprovada por quem detém autoridade e encontra-se materializada em artefactos e registos que produzem evidência observável, com mecanismos de manutenção ou revisão.
Parcial: decisão não materializada	Sim	Não	A decisão está aprovada, mas não se encontra concretizada nos mecanismos de gestão que a executam. A condição existe no plano organizacional e não produz efeito sobre os dados.
Parcial: execução não governada	Não	Sim	Existem artefactos, registos ou mecanismos em utilização, mas estes não decorrem de uma decisão aprovada nem possuem autoridade, responsável ou revisão associados.
Não cumpre	Não	Não	Nem a decisão está estabelecida nem existe execução que a materialize, ou nenhuma das condições pode ser demonstrada por evidência observável.

Cada nível é considerado estabelecido ou não estabelecido. Quando um nível se encontra apenas parcialmente assegurado, por não abranger todo o âmbito ou por não ser aplicado de forma

consistente, é considerado não estabelecido, devendo essa limitação constar da justificação. O princípio C0 é avaliado apenas no nível de decisão, pelo que admite unicamente as classificações **Cumpre** e **Não cumpre**: a autoridade está atribuída ou não está, não existindo, por ausência de nível de execução, situação parcial possível.

A classificação deve ser sustentada pela evidência recolhida e por uma justificação explícita. Quando a evidência é insuficiente, o princípio não pode ser classificado como **Cumpre**, devendo essa limitação ser registada.

Os resultados são registados separadamente por princípio e não são somados, ponderados ou convertidos numa classificação média da organização. O perfil obtido refere-se apenas aos dados, aos processos, aos sistemas, aos intervenientes e ao período incluídos no âmbito.

Cada registo de avaliação deve incluir:

- o princípio avaliado;
- a condição esperada em cada nível;
- o estado observado no nível de decisão e no nível de execução;
- a evidência recolhida;
- a classificação atribuída;
- a respetiva justificação;
- a lacuna identificada, quando aplicável.

Este registo permite compreender como a classificação foi atribuída, fundamentar o próximo passo e estabelecer uma referência para a reavaliação posterior.

4.3.2 Lacunas e orientação da evolução

A formulação de uma lacuna, já introduzida no diagnóstico, ganha aqui um papel operacional: distinguir o que já está estabelecido da condição que permanece em falta, indicando o nível em que essa falta se situa. Por exemplo, em vez de registar apenas que o princípio C1.1 está parcialmente assegurado, a lacuna pode ser formulada da seguinte forma:

> As fontes utilizadas estão identificadas e registadas num catálogo em utilização, mas não existe uma fonte autoritativa aprovada nem uma regra definida para tratar valores divergentes, pelo que a execução não decorre de uma decisão estabelecida.

Esta formulação permite que a intervenção preserve as capacidades existentes e se concentre nos elementos que necessitam de desenvolvimento. Uma lacuna pode situar-se no nível de decisão, quando faltam responsabilidades, aprovações ou regras estabelecidas, ou no nível de execução, quando faltam os processos, as práticas, a evidência ou os mecanismos de monitorização que

concretizam uma decisão já tomada. A classificação atribuída ao princípio identifica o nível em falta e fornece, por isso, uma orientação direta para a evolução, conforme a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Relação entre a classificação da maturidade e a orientação da evolução.

Classificação	**Interpretação**	**Orientação**
Cumpre	A decisão está aprovada e materializada, e ambos os níveis produzem evidência.	Preservar os mecanismos existentes, manter a evidência e monitorizar alterações que possam introduzir novas lacunas.
Parcial: decisão não materializada	A decisão existe, mas permanece sem efeito sobre os dados.	Concretizar a decisão já aprovada através dos artefactos, registos e processos em falta, sem reabrir a decisão nem repetir a aprovação.
Parcial: execução não governada	Existem mecanismos em utilização sem autoridade que os sustente.	Submeter os mecanismos existentes a aprovação, atribuir o responsável e definir a revisão, preservando o que já se encontra em utilização.
Não cumpre	Não existe decisão estabelecida nem execução que a materialize.	Estabelecer a decisão e a autoridade correspondente e, em seguida, implementar os processos e as práticas que a concretizam.

A classificação não determina, por si só, a prioridade da intervenção. Uma lacuna classificada como parcial ou como não cumprida apenas deve originar uma ação quando é relevante para o problema ou objetivo, para a condição de sucesso ou para os riscos associados à utilização dos dados.

De igual modo, um princípio **Cumpre** pode não exigir ações de melhoria, mas deve permanecer sob monitorização. Esta continuidade permite identificar alterações nos dados, nos processos ou nos sistemas que possam comprometer as condições anteriormente demonstradas.

Os princípios não impõem uma ordem fixa de evolução. A sequência das ações depende das lacunas e das relações entre elas. Em determinados contextos, a atribuição de responsabilidades deve preceder a aprovação de uma fonte autoritativa; noutros, pode ser necessário estabelecer uma definição comum antes de criar regras de qualidade ou mapeamentos entre sistemas. Estas dependências orientam a ordem das ações num contexto concreto, mas não transformam a framework num modelo sequencial.

Após a implementação das ações, deve ser recolhida nova evidência e reavaliado o princípio afetado. A evolução pode traduzir-se na alteração da classificação ou na sua manutenção, quando as ações não são suficientes para assegurar as condições previstas.

A reavaliação não exige que todos os princípios evoluam simultaneamente nem que todos sejam classificados como **Cumpre**. O objetivo é tratar as lacunas relevantes para a necessidade que motivou a aplicação.

A alteração da classificação também não demonstra, por si só, que o problema inicial foi resolvido. A avaliação da maturidade verifica as condições de governança; a avaliação da eficácia determina se as ações contribuíram para o objetivo e para a condição de sucesso.

Em síntese, o diagnóstico caracteriza o estado atual, a avaliação da maturidade atribui uma classificação sustentada, que identifica o nível em falta, e a análise das lacunas orienta a evolução. Esta articulação permite preservar as capacidades existentes, distinguir uma decisão por concretizar de um mecanismo por governar e concentrar a intervenção nos elementos que efetivamente necessitam de desenvolvimento.

Capítulo 5

Aplicação e Demonstração da Framework num Caso de Uso Industrial

Neste capítulo apresenta-se a aplicação da framework de governança e gestão de dados proposta no Capítulo 4 a um caso de uso industrial simplificado. O objetivo consiste em demonstrar de que forma a proposta permite partir de uma necessidade organizacional, avaliar as condições de governança existentes e orientar o tratamento das lacunas identificadas.

Para esse efeito, define-se um cenário industrial associado à produção de mesas. O mesmo processo produtivo é representado através de duas implementações independentes: uma no módulo MRP do Odoo e outra no MES da Critical Manufacturing. Em ambas consideram-se os mesmos acontecimentos produtivos e os mesmos dados de entrada.

Os sistemas não são utilizados simultaneamente nem integrados entre si. Cada implementação constitui uma representação independente do mesmo processo, permitindo analisar a forma como os dados são estruturados, classificados e utilizados em cada sistema. A comparação não procura determinar qual das soluções apresenta melhores funcionalidades, mas verificar se os dados e os resultados produzidos podem ser relacionados, interpretados e comparados sem ambiguidade.

A aplicação segue a metodologia definida no Capítulo 4. Começa-se por caracterizar o caso de uso e formalizar a necessidade que motiva a análise. Em seguida, identificam-se o problema ou objetivo e o âmbito da aplicação. Posteriormente, prepara-se um cenário produtivo comum e reproduz-se separadamente nos dois sistemas. A evidência de governança não é objeto de uma recolha prévia autónoma: é reunida ao longo do diagnóstico, à medida que cada princípio é avaliado, conforme se explicita na Secção 5.3.

Com base nessa evidência, avaliam-se as condições estabelecidas pelos princípios da framework e identificam-se as lacunas relevantes. Por fim, define-se um plano de ação, avalia-se a sua eficácia e discute-se o contributo do caso de uso para a demonstração da proposta.

5.1 Caracterização e estratégia do caso de uso

O caso de uso considera uma fábrica dedicada à produção de mesas. Adota-se um processo produtivo simplificado, constituído por uma única operação de montagem, realizada num recurso com capacidade para processar uma mesa de cada vez e com um tempo de referência de vinte minutos por unidade. Esta simplificação permite concentrar a análise nos dados e nas condições de governança relevantes, sem introduzir a complexidade associada a múltiplos produtos, operações ou recursos.

A framework aplica-se a uma organização que utilize um ou mais sistemas, não pressupondo a existência de dois sistemas nem a realização de uma comparação entre eles. A coexistência de duas implementações constitui uma característica desta organização e da necessidade analisada, e não um requisito da proposta. Neste caso de uso, a organização dispõe de duas representações independentes do mesmo processo produtivo e pretende determinar se ambas representam e utilizam os dados de forma equivalente.

Para concretizar esta necessidade, preparam-se duas implementações independentes: uma no Odoo MRP e outra no Critical Manufacturing MES. O Odoo é um sistema de gestão empresarial modular, cujo módulo MRP disponibiliza funcionalidades para representar produtos, ordens de fabrico, operações, centros de trabalho, tempos e quantidades associadas à produção. Por sua vez, o Critical Manufacturing é um sistema MES orientado para a gestão e o acompanhamento da execução produtiva, permitindo representar ordens, operações, recursos, estados, acontecimentos, tempos e quantidades.

Embora pertençam a categorias distintas, os dois sistemas disponibilizam as funcionalidades necessárias para representar o cenário analisado. Esta sobreposição funcional permite utilizar cada sistema como uma implementação independente do mesmo processo produtivo. Em ambas consideram-se o mesmo produto, a mesma ordem de produção, a mesma operação, o mesmo recurso, os mesmos acontecimentos e os mesmos valores de entrada. Deste modo, as diferenças observadas podem ser relacionadas com as estruturas, as definições ou as regras utilizadas por cada sistema, e não com alterações no processo produtivo.

Os sistemas não são utilizados como partes complementares de uma arquitetura integrada. No âmbito do caso de uso, não há troca de dados entre o Odoo e o Critical Manufacturing, nem utilização simultânea durante a execução do cenário. As duas implementações constituem, assim, dois testes independentes da mesma realidade produtiva. A análise também não procura comparar todas as funcionalidades dos sistemas, selecionar a melhor solução ou testar uma integração técnica.

A framework é aplicada uma única vez à necessidade organizacional e ao âmbito definido. Após a reprodução do cenário em cada sistema, recolhem-se os respetivos dados, representações, configurações, regras e resultados. Estes elementos constituem a evidência utilizada no diagnóstico e são posteriormente analisados de forma comparativa.

A comparação não se limita aos resultados finais. São igualmente considerados os dados de entrada, as respetivas fontes e definições, as regras de classificação e cálculo e as componentes

utilizadas na construção do indicador selecionado. Esta abordagem permite determinar se os resultados produzidos pelas duas implementações representam de forma equivalente a mesma realidade produtiva e identificar eventuais divergências entre elas.

A Tabela 5.1 sintetiza os principais elementos do caso de uso.

Tabela 5.1: Caracterização geral do caso de uso.

Elemento	**Descrição**
Organização	Fábrica dedicada à produção de mesas.
Processo analisado	Produção de mesas através de uma operação de montagem.
Recurso produtivo	Um recurso com capacidade para processar uma mesa de cada vez.
Tempo de referência	Vinte minutos por unidade.
Implementações	Representação independente do mesmo processo no Odoo MRP e no Critical Manufacturing MES.
Condições comuns	Mesmo produto, ordem de produção, operação, recurso, acontecimentos e dados de entrada.
Aplicação da framework	Uma única aplicação à necessidade organizacional e ao âmbito definido.
Estratégia de análise	Recolha dos dados, das representações, das regras e dos resultados de cada implementação, seguida da respetiva comparação.
Integração entre os sistemas	Não considerada no âmbito do caso de uso.

Esta estratégia estabelece as condições necessárias para utilizar as duas implementações como fontes de evidência no diagnóstico. Importa, contudo, delimitar o alcance da demonstração obtida. Ao reproduzir o mesmo processo em duas representações independentes e não integradas, o caso de uso isola a consistência semântica entre as representações como objeto central da análise, enquanto as restantes condições de governança são consideradas apenas na medida em que sustentam essa análise. O caso de uso não reproduz um ciclo completo de diagnóstico, intervenção e avaliação de eficácia num ambiente operacional real, mas permite demonstrar a aplicação da framework e evidenciar as divergências que motivam o seu contributo. A secção seguinte formaliza o problema ou objetivo que motiva a aplicação da framework e delimita os elementos incluídos na análise.

5.2 Identificação do problema e definição do âmbito

Após a caracterização do caso de uso, aplicam-se as duas primeiras atividades da metodologia: a identificação do problema ou objetivo e a definição do âmbito. Estas atividades permitem formalizar a necessidade da organização e delimitar os dados, os processos, os sistemas, os intervenientes e os limites considerados no diagnóstico.

O problema, o objetivo e o âmbito são definidos uma única vez para o caso de uso. O Odoo MRP e o Critical Manufacturing MES não constituem aplicações separadas da framework, mas fontes distintas de evidência sobre o mesmo processo produtivo.

5.2.1 Identificação do problema ou objetivo

A identificação do problema ou objetivo procura estabelecer a necessidade que justifica a aplicação da framework, sem antecipar a respetiva causa ou as ações necessárias para a tratar. De acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 4, consideram-se as seguintes questões:

1. Qual é o problema observado?
2. Onde é que o problema aparece?
3. Que decisão ou atividade está a ser afetada?
4. Qual é o resultado que a organização pretende alcançar?
5. Como pode ser determinado que o problema ficou resolvido ou que o objetivo foi atingido?

A análise parte da necessidade de comparar duas implementações independentes do mesmo processo produtivo. Embora ambas representem a mesma realidade e utilizem os mesmos acontecimentos e valores de entrada, a organização não dispõe inicialmente de evidência suficiente para concluir que os dados e os resultados possuem uma interpretação equivalente.

Esta limitação afeta a comparação do desempenho produtivo e a interpretação das perdas identificadas. A semelhança entre as designações utilizadas ou a igualdade entre os valores apresentados não permite, por si só, demonstrar que as duas implementações utilizam as mesmas fontes, definições, classificações e regras de cálculo.

As respostas às questões da metodologia dão origem à ficha de identificação apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Ficha de identificação do problema ou objetivo.

Campo	**Resultado**
Problema observado	A organização não consegue determinar se duas implementações independentes do mesmo processo produtivo representam e utilizam os dados de desempenho de forma equivalente.
Contexto onde é observado	Representação do mesmo processo de produção de mesas no Odoo MRP e no Critical Manufacturing MES.
Impacto	Os resultados podem ser comparados ou interpretados como equivalentes sem que as respetivas fontes, definições e regras tenham sido verificadas.
Decisão ou atividade afetada	Comparação do desempenho produtivo e interpretação das perdas identificadas por cada implementação.
Objetivo pretendido	Determinar se os dados e os resultados produzidos pelas duas implementações podem ser relacionados, interpretados e comparados de forma inequívoca.
Condição de sucesso	A organização consegue identificar e explicar os dados, as regras e os resultados produzidos por cada implementação e determinar se estes representam de forma equivalente a mesma realidade produtiva.
Causa	Desconhecida nesta atividade.
Solução tecnológica	Não definida nesta atividade.

A ficha estabelece a necessidade organizacional que orienta a restante aplicação. Nesta fase, não se conclui que existe uma lacuna de consistência semântica, de qualidade, de rastreabilidade ou de outra natureza. Essa conclusão deve resultar da evidência recolhida e da avaliação das condições estabelecidas pelos princípios da framework.

5.2.2 Definição do âmbito

Depois de identificada a necessidade, define-se o âmbito da aplicação. Esta atividade delimita os elementos considerados no diagnóstico, evitando alargar a análise a todos os dados, processos e sistemas da organização.

A definição do âmbito é orientada pelas seguintes questões:

1. Que processo, área ou atividade será analisado?
2. Que dados e respetivas definições estão envolvidos?
3. Que sistemas, equipamentos ou fontes produzem, registam, transformam ou utilizam esses dados?
4. Que áreas, funções ou intervenientes participam na sua criação, utilização ou gestão?
5. Que limites operacionais, temporais ou físicos serão considerados?

6. O que fica explicitamente fora da análise?

A unidade de análise corresponde aos dados utilizados para representar e avaliar o desempenho do mesmo processo produtivo nas duas implementações. O âmbito não corresponde, por isso, ao Odoo ou ao Critical Manufacturing considerados isoladamente. Os dois sistemas são analisados dentro de uma única aplicação da framework e de um único caso de uso comparativo.

Incluem-se os dados necessários para representar a ordem de produção, a operação de montagem, o recurso produtivo, os acontecimentos observados e o desempenho resultante, incluindo o indicador OEE. Para além dos valores registados, o âmbito abrange as fontes, as definições, as unidades, as classificações, as regras, as representações e os metadados necessários à sua interpretação e utilização.

A Tabela 5.3 apresenta o âmbito definido.

Tabela 5.3: Âmbito definido para a aplicação da framework.

Elemento	**Âmbito definido**
Processo e atividade	Produção de mesas, com foco numa única operação de montagem.
Unidade de análise	Dados utilizados para representar e avaliar o desempenho do mesmo processo produtivo em duas implementações independentes.
Dados de identificação	Ordem de produção, produto, operação e recurso produtivo.
Dados temporais	Tempo total, tempo de referência, tempo de operação, duração dos acontecimentos e períodos de paragem.
Dados de produção	Quantidade planeada, quantidade produzida, quantidade conforme e quantidade rejeitada.
Resultados derivados	Disponibilidade, desempenho, qualidade e OEE, incluindo os dados e as regras utilizados no respetivo cálculo.
Elementos associados aos dados	Fontes, definições, unidades, classificações, regras de cálculo, representações nos sistemas e metadados necessários à interpretação dos dados.
Sistemas considerados	Odoo MRP e Critical Manufacturing MES, utilizados em implementações independentes do mesmo cenário produtivo.
Fonte comum do cenário	Registo controlado dos acontecimentos produtivos e dos valores de entrada aplicados nas duas implementações.
Evidência das implementações	Configurações, registos de execução, classificações, regras de cálculo e resultados produzidos pelo Odoo MRP e pelo Critical Manufacturing MES.
Intervenientes	Responsável de produção, responsável pelos dados e responsáveis técnicos pelas duas implementações, considerados enquanto funções necessárias à análise e à validação das decisões.
Limites operacionais	Uma ordem de produção, um produto, uma operação de montagem e um recurso produtivo.
Limite temporal	Uma janela de produção controlada, comum às duas implementações.
Limite físico	Um único recurso ou posto de montagem, representado separadamente nos dois sistemas.
Elementos excluídos	Outros produtos, operações, recursos e indicadores, bem como a comparação funcional completa, a seleção do melhor sistema, a utilização simultânea das duas soluções e a integração técnica entre o Odoo e o Critical Manufacturing.

Os intervenientes indicados correspondem a três das funções previstas na Tabela 4.2. A framework não exige que as sete funções sejam instanciadas por pessoas distintas, mas apenas que cada responsabilidade esteja atribuída, como se estabeleceu na Subsecção 4.2.1. Num âmbito com uma ordem de produção, um produto e um recurso, o responsável pelos dados acumula a coordenação da governança e a aprovação das definições, e o responsável de produção assume as funções

de proprietário dos dados e de responsável de domínio, não se justificando a constituição de um órgão de governança autónomo. A acumulação é, por isso, adequada à dimensão do âmbito e não constitui incumprimento.

A delimitação garante que as duas implementações são avaliadas perante as mesmas condições. A necessidade, os dados governados e os critérios de diagnóstico permanecem comuns, enquanto a evidência é recolhida separadamente em cada sistema.

Concluídas as duas primeiras atividades da metodologia, encontram-se definidos a necessidade organizacional, o objetivo, a condição de sucesso e os limites da análise. O passo seguinte consiste em preparar o cenário produtivo comum e reproduzi-lo nas duas implementações.

5.3 Preparação do cenário

Definidos o problema e o âmbito, prepara-se um cenário produtivo comum e reproduz-se separadamente em cada implementação. Esta secção fixa os valores de entrada e os acontecimentos e descreve a forma como o cenário é representado no Odoo MRP e no Critical Manufacturing MES. A evidência de governança necessária ao diagnóstico é recolhida ao longo da avaliação de cada princípio, na secção seguinte, e não numa recolha prévia autónoma.

5.3.1 Definição do cenário produtivo comum

Para que as diferenças observadas mais adiante possam ser atribuídas às estruturas de cada sistema, e não a dados distintos, o cenário produtivo é definido uma única vez e a partir dos mesmos acontecimentos. Este registo controlado constitui a fonte comum do cenário, já prevista na definição do âmbito, e é reproduzido sem alterações em cada implementação.

O cenário corresponde a uma ordem de produção de mesas executada numa janela controlada. Durante essa janela ocorrem uma paragem não planeada e uma quebra de cadência face ao tempo de referência, ficando ainda uma das unidades produzidas aquém dos requisitos de qualidade. Estes acontecimentos são escolhidos por ativarem, em simultâneo, as três dimensões habitualmente associadas ao desempenho produtivo: a disponibilidade, o desempenho e a qualidade. Deste modo, o diagnóstico posterior dispõe de evidência sobre cada uma delas.

Os parâmetros do cenário são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros do cenário produtivo comum.

Parâmetro	**Valor**	**Unidade**	**Observação**
Tempo total	250	min	Duração total da janela de produção.
Tempo de referência	20	min/unidade	Tempo previsto para processar uma mesa.
Quantidade planeada	10	unidades	Meta da ordem de produção.
Quantidade produzida	10	unidades	Total processado na janela.
Quantidade conforme	9	unidades	Unidades sem defeito.
Quantidade rejeitada	1	unidade	Unidade que não cumpriu os requisitos de qualidade.
Paragem não planeada	25	min	Interrupção não prevista da operação.
Perda de ritmo	25	min	Tempo perdido por cadência abaixo da referência.

O indicador utilizado na análise é o OEE, definido como o produto de três componentes: a disponibilidade, o desempenho e a qualidade. Esta formulação decorre do modelo das seis grandes perdas proposto por Nakajima [68] e encontra-se normalizada na ISO 22400-2 [69], que fixa as definições dos indicadores de desempenho para a gestão das operações de fabrico. É esta definição normativa, independente de qualquer sistema, que serve de referência à análise e, mais adiante, à construção da representação comum.

A partir dos valores do cenário, obtém-se um OEE de referência de 72%. Este valor funciona como âncora comum da análise: espera-se que cada implementação o reproduza a partir dos mesmos dados de entrada. A forma como cada sistema decompõe esse resultado, e as divergências que daí decorrem, é examinada na Secção 5.4.

Para tornar a janela de produção mais legível, a Figura 5.1 representa a distribuição do tempo total pelos vários acontecimentos, desde o tempo efetivamente produtivo até às perdas por paragem e por cadência.

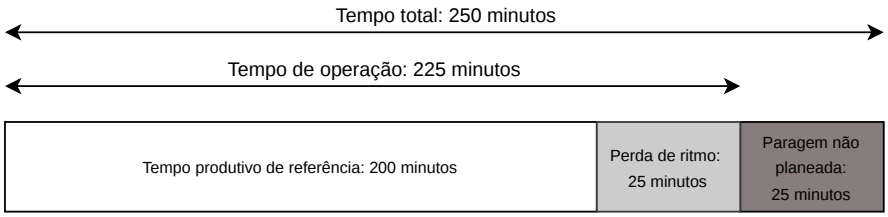


Figura 5.1: Distribuição do tempo total pelos acontecimentos do cenário produtivo.

5.3.2 Reprodução do cenário nas duas implementações

O cenário produtivo definido na subsecção anterior é reproduzido separadamente no Odoo MRP e no Critical Manufacturing MES. Em cada implementação utilizam-se os mesmos dados de entrada e os mesmos acontecimentos produtivos, preservando as condições de comparação.

Descreve-se a configuração de cada sistema e os resultados que produz; a comparação entre as duas representações é feita mais adiante, no diagnóstico.

Reprodução no Odoo MRP

No Odoo MRP, cria-se o produto `MP_Table`, associado à lista de materiais `MP_TableBOM: MP_Table`. Para representar o cenário comum, cria-se a ordem de fabrico `WH/MO/00153`, com uma quantidade planeada de 10 mesas, e associa-se a operação de montagem `MP_AssemblyStep`, executada no centro de trabalho `MP_AssemblyStation`.

Para a operação, definiu-se um tempo esperado de 200 minutos, correspondente ao tempo de referência necessário para produzir as 10 unidades, a 20 minutos por mesa. Após a execução, o sistema regista uma duração real de 250 minutos, que corresponde ao tempo total da janela de produção. Esse tempo total distribui-se por 180 minutos de *Fully Productive Time*, 25 minutos de *Equipment Failure*, 20 minutos de *Process Defect* e 25 minutos de *Reduced Speed*, registados de forma consecutiva e sem sobreposição.

A unidade não conforme do cenário é dada como refugo: das 10 mesas produzidas, uma é registada como rejeitada e as restantes nove como conformes. Essa baixa fica registada no sistema, mas não alimenta o cálculo do OEE. Em vez de reduzir uma contagem de peças, a perda de qualidade é representada por tempo: os 20 minutos correspondentes à mesa defeituosa, a sua parcela do tempo de referência, são classificados como *Process Defect* e retirados do tempo produtivo. É por esta razão que o tempo totalmente produtivo desce de 200 para 180 minutos.

O OEE resulta, assim, do rácio entre o tempo totalmente produtivo e o tempo total:

$$OEE = \frac{180}{250} \times 100 = 72\%.$$

O sistema apresenta ainda um indicador de desempenho de 88% e 1,17 horas de tempo perdido, mas o valor do OEE depende apenas daquele rácio de tempo, e não da contagem de peças conformes.

A Figura 5.2 apresenta o registo dos períodos de produtividade associados à operação.

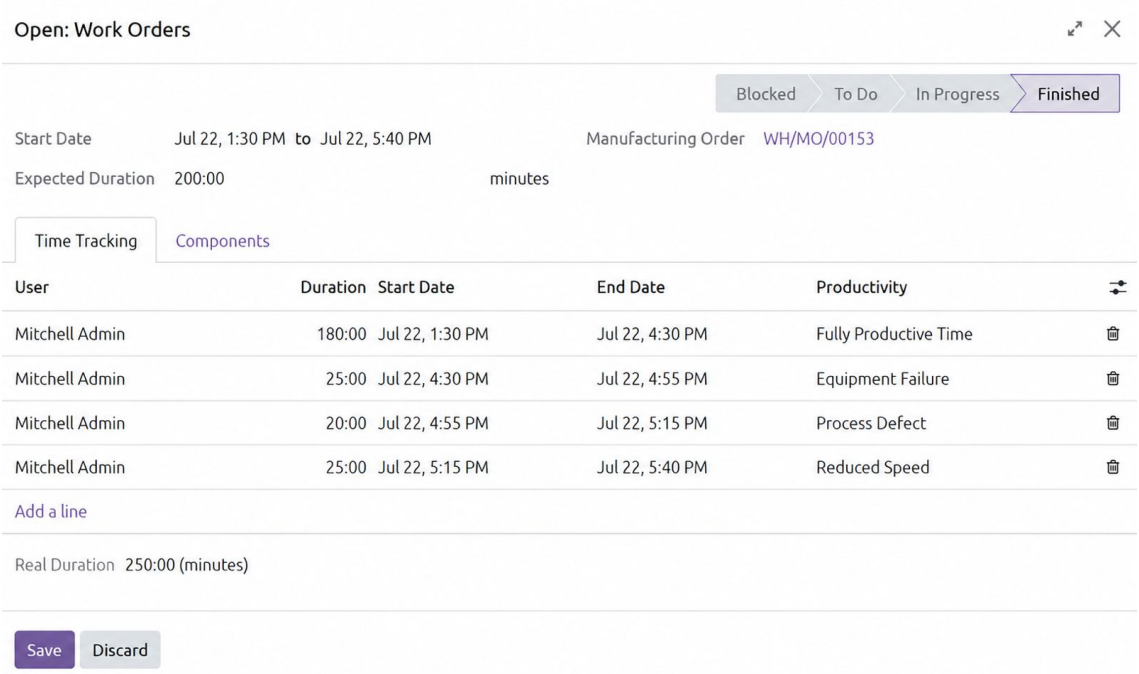


Figura 5.2: Registo dos períodos produtivos e das perdas associados à operação de montagem no Odoo MRP.

Reprodução no Critical Manufacturing MES

No Critical Manufacturing MES, o mesmo cenário é reproduzido a partir do modelo de estados do recurso, definido segundo a norma SEMI E10 [70]. A janela de produção é declarada como um período de 250 minutos e cada intervalo de tempo é atribuído a um estado, não existindo tempo classificado como não trabalhado.

Dos 250 minutos da janela, 225 são classificados como *Productive* e 25 como *UnscheduledDown*, correspondendo estes últimos à paragem não planeada do cenário. Os restantes estados previstos pelo modelo não registam tempo. A distribuição resultante é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Distribuição da janela de produção pelos estados do recurso no Critical Manufacturing MES.

Estado	**Sigla**	**Tempo (min)**	**Correspondência no cenário**
Productive	PR	225	Tempo em produção, incluindo a perda de cadência.
UnscheduledDown	UD	25	Paragem não planeada.
Standby	SB	0	Sem ocorrência no cenário.
Engineering	EN	0	Sem ocorrência no cenário.
ScheduledDown	SD	0	Sem ocorrência no cenário.
NonScheduled	NS	0	Sem ocorrência no cenário.
Total		250	Janela de produção considerada.

A quebra de cadência não corresponde a nenhum estado. Os 25 minutos perdidos por produção abaixo do ritmo previsto permanecem contabilizados como tempo produtivo e manifestam-se apenas na relação entre o tempo de ciclo previsto e o tempo de ciclo efetivo. O tempo de ciclo de referência é declarado em 1200 segundos, equivalentes aos 20 minutos por mesa, enquanto o tempo de ciclo efetivo resulta da divisão do tempo líquido de produção pelo volume total processado, ou seja, 13 500 segundos por 10 unidades, o que corresponde a 1350 segundos.

Desta relação decorre a taxa de eficiência, de 88,9%. A eficiência operacional, que compara o tempo produtivo com o tempo produtivo acrescido do tempo em espera, é de 100%, uma vez que o cenário não regista tempo em *Standby*. O desempenho resulta do produto destes dois fatores, ficando, por isso, determinado exclusivamente pela cadência.

A unidade não conforme é registada como refugo, mantendo-se o volume total em 10 unidades e o volume rejeitado em 1. A qualidade é calculada a partir desta contagem, e não a partir de tempo: das 10 unidades processadas, 9 são conformes, o que corresponde a 90%. O tempo consumido na produção da unidade rejeitada permanece classificado como produtivo e é considerado no cálculo do tempo de ciclo efetivo, uma vez que o volume utilizado nesse cálculo inclui as unidades rejeitadas.

A disponibilidade resulta da relação entre o tempo total e o tempo de paragem, ambos derivados dos estados do recurso. Com 25 minutos em *UnscheduledDown* sobre os 250 minutos da janela, obtêm-se 90%. As componentes do indicador são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Componentes do OEE apresentadas pelo Critical Manufacturing MES.

Componente	**Derivação no sistema**	**Valor**
Disponibilidade	Tempo total menos tempo de paragem, sobre o tempo total: $(250 - 25)/250$.	90,0%
Desempenho	Taxa de eficiência multiplicada pela eficiência operacional: $(1200/1350) \times 1{,}00$.	88,9%
Qualidade	Volume processado menos refugo, sobre o volume processado: $(10 - 1)/10$.	90,0%
OEE	Disponibilidade $\times$ desempenho $\times$ qualidade.	72,0%

O indicador resulta, assim, do produto de três rácios independentes:

$$OEE = 0{,}90 \times 0{,}889 \times 0{,}90 \times 100 = 72\%.$$

Ao contrário do que sucede no Odoo, nenhuma das perdas é representada como uma categoria de tempo subtraída a um numerador comum. A disponibilidade deriva dos estados do recurso, o desempenho deriva da relação entre tempos de ciclo e a qualidade deriva da contagem de unidades. Estas características da representação são retomadas no diagnóstico.

A Figura 5.3 apresenta a decomposição do indicador.

OEE			
KPI Name		%	Formula
Availability	AVA	90,00%	(TT - DT) / TT
Performance	PER	88,89%	RE x OE
Quality	QUA	90,00%	(Normalize Volume - Normalize Loss) / Normalize Volume
Overall Operational Efficiency	OEE	72,00%	AVA x PER x QUA

Figura 5.3: Componentes do OEE e respetivas fórmulas no Critical Manufacturing MES.

5.4 Diagnóstico e tratamento das lacunas

Reproduzido o cenário, aplicam-se as atividades centrais da metodologia: o diagnóstico e a avaliação da maturidade, a leitura da divergência que dele decorre, a seleção e o tratamento das lacunas relevantes e a verificação do resultado na representação comum. Estas atividades são apresentadas nas subsecções seguintes.

5.4.1 Diagnóstico e avaliação da maturidade

Com o cenário reproduzido, aplica-se a primeira atividade analítica da framework: o diagnóstico e a avaliação da maturidade. É neste momento que se determina, princípio a princípio, o que a organização já tem estabelecido e o que lhe falta. Nenhuma conclusão sobre governança foi tirada antes deste ponto; ela nasce aqui, do confronto entre as condições de cada princípio e a evidência observada.

O diagnóstico conduz-se como um levantamento. Nos domínios governados, colocam-se duas questões por princípio, uma sobre a decisão e outra sobre a sua concretização, e procura-se o artefacto que sustenta cada uma. Esta distinção é deliberada: uma resposta afirmativa orienta a análise, mas só confirma o cumprimento quando existe evidência observável que a suporte, como estabelecido no Capítulo 4. Perguntar se a organização tem um responsável pelos dados não basta; é preciso que esse responsável conste de um registo que se possa verificar. Como o cenário é construído para a demonstração, os artefactos de governança aqui considerados são estipulados para o caso de uso e representam o tipo de evidência que a organização apresentaria numa aplicação real.

A avaliação incide sobre as estruturas, as definições, as regras e os metadados que sustentam a construção do indicador, e não sobre o valor final que dele resulta, cuja leitura se faz na subsecção seguinte. As questões utilizadas em cada princípio, que operacionalizam as condições do Capítulo 4 num guião concreto, são apresentadas na Tabela 5.7. O princípio C0, por corresponder à dimensão de governança, é interrogado apenas no nível de decisão.

Tabela 5.7: Guião de diagnóstico aplicado a cada princípio.

Princípio	**Questão no nível de decisão**	**Questão no nível de execução**
C0. Responsabilização explícita	Os dados estão identificados e as responsabilidades de decisão, validação, execução e monitorização estão atribuídas?	Não aplicável.
C1.1. Fonte autoritativa	Existe registo da aprovação de uma fonte autoritativa para cada dado, com regra definida para tratar valores divergentes?	As fontes estão identificadas e registadas num catálogo em utilização, e existe um mecanismo que determina que valores são efetivamente utilizados?
C1.2. Consistência semântica	Existe registo da aprovação das definições de referência do indicador e das suas componentes?	As representações de cada sistema estão catalogadas e relacionadas entre si através de um mapeamento em utilização?
C2.1. Qualidade dos dados	Existe registo da aprovação dos requisitos de qualidade face à finalidade?	As regras são verificadas e as não conformidades registadas e tratadas?
C2.2. Rastreabilidade dos dados	Existe registo da aprovação da rastreabilidade exigida e das regras de versão aplicáveis?	É possível reconstruir a origem, o percurso e as transformações relevantes dos dados?

Três princípios encontram-se assegurados no âmbito analisado. À pergunta sobre a responsabilização (C0), a organização aponta um catálogo de dados governados e uma matriz de responsabilidades onde constam o responsável de produção, o responsável pelos dados e os responsáveis técnicos pelos dois sistemas, com autoridade para aprovar e rever as decisões aplicáveis; o princípio cumpre. Na qualidade dos dados (C2.1), os requisitos aplicáveis aos tempos e às quantidades estão definidos e aprovados face à finalidade, existindo registo dessa aprovação, o que satisfaz o nível de decisão; as regras são efetivamente verificadas, existindo registos das verificações e do tratamento das não conformidades, incluindo a unidade rejeitada do cenário, que é registada em ambos os sistemas ainda que cada um a represente de forma distinta, o que satisfaz o nível de execução; o princípio cumpre. A qualidade dos dados avalia se os valores estão corretos dentro das regras de cada sistema, e não se essas regras coincidem entre sistemas; esta última questão pertence à consistência semântica (C1.2) e é aí que a divergência de representação é tratada. Na rastreabilidade (C2.2), a profundidade exigida e as regras de versão estão estabelecidas e registadas e, no plano da execução, o identificador da ordem de produção percorre os dois sistemas e os registos permitem reconstruir a origem e o percurso dos dados até às componentes do indicador; o princípio cumpre igualmente.

A classificação atribuída a C0 merece uma justificação explícita, uma vez que se poderia argumentar que a autoridade, embora atribuída, não foi exercida sobre as definições e as fontes até à intervenção. O argumento é correto quanto aos factos, mas não afeta C0. Como se estabeleceu na Subsecção 4.2.1, o objeto deste princípio é a atribuição dos direitos de decisão e não o seu exercício: verificar se a autoridade produziu efetivamente a aprovação de uma fonte ou de um

mapeamento pertence ao nível de decisão do domínio governado correspondente. É precisamente aí que a falta se regista neste caso, no nível de decisão de C1.1, e não em C0. A distinção evita que a mesma lacuna seja contabilizada duas vezes, em C0 e no domínio afetado, e localiza-a no princípio sobre o qual a intervenção tem de incidir. Acresce que, por não possuir nível de execução, C0 não admite classificação parcial: no modelo adotado, a autoridade está ou não está atribuída.

Os dois princípios restantes ficam a meio caminho, e é neles que a intervenção se vai concentrar. Falham, contudo, em sentidos opostos.

Na questão da fonte autoritativa (C1.1), o nível de execução está assegurado: as fontes existentes estão identificadas e registadas num catálogo em utilização, e uma delas é efetivamente utilizada para os valores de entrada, existindo evidência dessa utilização. O que falta situa-se no nível de decisão, uma vez que não existe registo de aprovação da fonte autoritativa de cada dado nem regra estabelecida para proceder perante valores divergentes. A prática está em utilização sem que uma decisão a sustente, pelo que o princípio é classificado como parcial, na situação de execução não governada.

Na consistência semântica (C1.2), a situação é inversa. O nível de decisão está assegurado: existe um glossário de negócio que fixa o significado do indicador e das suas componentes e que incorpora o registo da respetiva aprovação, identificando quem aprovou cada definição, em que data e com que periodicidade de revisão. É este registo, e não a mera existência do glossário, que demonstra a decisão, conforme o critério estabelecido na Subsecção 4.3.1. No nível de execução, o glossário está em utilização e um catálogo de metadados documenta a forma como o Odoo e o Critical Manufacturing nomeiam, estruturam e classificam os dados correspondentes; falta, porém, a peça que os relaciona, o mapeamento entre as definições de referência e as representações de cada sistema. Sem esse mapeamento, as diferenças entre as representações estão identificadas, mas não relacionadas nem controladas, e não existe uma representação comum que permita interpretá-las em conjunto. O nível de execução não está, por isso, estabelecido: a decisão foi tomada e nunca chegou a produzir efeito sobre os dados, pelo que o princípio é classificado como parcial, na situação de decisão não materializada. A divergência entre as representações não reside nos valores, que estão corretos em cada sistema segundo as suas próprias regras, mas nas definições que os produzem. Por esse motivo constitui uma lacuna de consistência semântica, e não de qualidade dos dados: cada sistema, isoladamente, teria os seus dados como válidos, e só o confronto entre as definições revela a incompatibilidade. Esta é a lacuna mais próxima do problema em análise.

O perfil de maturidade resultante é apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Perfil de maturidade dos princípios no caso de uso.

Princípio	**Dec.**	**Exec.**	**Classificação**	**Lacuna identificada**
C0. Responsabilização explícita	Sim	n.a.	Cumpre	Sem lacuna relevante no âmbito.
C1.1. Fonte autoritativa	Não	Sim	Parcial: execução não governada	As fontes estão identificadas e uma delas é utilizada na prática, sem que exista aprovação formal da fonte autoritativa nem regra de precedência.
C1.2. Consistência semântica	Sim	Não	Parcial: decisão não materializada	As definições de referência estão aprovadas e as representações catalogadas, sem que exista mapeamento que as relacione.
C2.1. Qualidade dos dados	Sim	Sim	Cumpre	Sem lacuna relevante no âmbito.
C2.2. Rastreabilidade dos dados	Sim	Sim	Cumpre	Sem lacuna relevante no âmbito.

O perfil é diferenciado e, mais do que isso, as duas lacunas identificadas são de natureza oposta. No princípio C1.1 existe uma prática em utilização que nenhuma decisão sustenta; no princípio C1.2 existe uma decisão aprovada que nenhum mecanismo materializa. Uma classificação agregada arrumaria ambas sob o mesmo rótulo e ocultaria esta diferença, quando é precisamente ela que determina o tipo de intervenção necessária: num caso trata-se de aprovar o que já se faz, no outro de concretizar o que já foi decidido.

Esta distinção é também o que permite localizar a origem do problema. A lacuna do princípio C1.1 incide sobre a autoridade atribuída às fontes, que num cenário de fonte única não afeta a interpretação dos resultados. A do princípio C1.2 incide sobre a relação entre as representações dos dois sistemas, que é exatamente a condição de que depende a equivalência de interpretação que a organização pretende determinar. Por esse motivo, a ausência de mapeamento é a lacuna candidata à origem do problema. A subsecção seguinte confirma-o, mostrando o que acontece ao indicador quando essa relação não está estabelecida.

5.4.2 A divergência na decomposição do OEE

O diagnóstico apontou a ausência de mapeamento (C1.2) como a lacuna candidata à origem do problema. Para confirmar essa suspeita, observa-se agora o que cada implementação produz a partir do mesmo cenário. À primeira vista, o resultado tranquiliza: o Odoo e o Critical Manufacturing devolvem exatamente o mesmo OEE de 72%.

A igualdade dura apenas até se perguntar como cada sistema chega a esse número. Os dois partem dos mesmos dados de entrada, mas constroem o indicador segundo modelos que não são

comparáveis entre si. O Odoo trata o OEE como um único rácio de tempo: divide o tempo efetivamente produtivo pelo tempo total (180/250) e obtém 72%.[1] Nesse modelo, a disponibilidade, a cadência e a qualidade não são fatores do cálculo; são apenas categorias de perda de tempo que reduzem o numerador. O Critical Manufacturing, pelo contrário, calcula o OEE como o produto de três rácios independentes, $A \times P \times Q$, cada um com o seu próprio denominador, e faz a qualidade pesar no indicador através da contagem de peças. A Tabela 5.9 reúne as divergências que daqui resultam.

Tabela 5.9: Divergências na construção do OEE entre as duas implementações.

Aspeto	**Odoo MRP**	**Critical Manufacturing MES**	**Camada**
Modelo de cálculo	Rácio de tempo único (180/250).	Produto de três rácios ($A \times P \times Q$).	Regra de cálculo
Papel das perdas	Categorias de tempo que reduzem o numerador.	Fatores independentes de disponibilidade, desempenho e qualidade.	Modelo e metadados
Qualidade no OEE	Entra pelo tempo: 20 min classificados como *Process Defect*.	Entra pela contagem: uma unidade rejeitada em dez.	Definição
Registo da rejeição	A peça é dada como rejeitada, mas a baixa não alimenta o OEE.	A baixa da peça é o que alimenta a componente de qualidade.	Master data
Representação da cadência	Categoria de tempo (*Reduced Speed*, 25 min).	Rácio entre o tempo de ciclo ideal e o real.	Metadados
Base da disponibilidade	Duração real registada da operação.	Estados SEMI E10 do recurso e tempo total do calendário.[2]	Definição e fonte

Os dois sistemas concordam sobre a realidade física: em ambos, foram produzidas dez mesas, nove conformes e uma rejeitada. A divergência não está no que aconteceu, mas na forma como cada um faz essa perda pesar no indicador. No Odoo, a mesa defeituosa reduz o OEE por via do tempo, através dos 20 minutos de *Process Defect*; a baixa da peça é registada, mas fica à margem do cálculo. No Critical Manufacturing, é a própria rejeição que reduz a componente de qualidade, através da contagem. A mesma perda vive, assim, como minutos num sistema e como unidades no outro.

Esta diferença de representação é invisível enquanto se olha apenas para o OEE, e é precisamente aí que se torna perigosa. Um controlo de interoperabilidade que se limite a comparar o valor do indicador concluiria, sem hesitar, que as duas implementações são equivalentes. Concluiria mal. Cruzar dados entre os dois sem os relacionar seria igualmente arriscado: o campo "peças

[1] O Odoo apresenta ainda um indicador de desempenho junto do OEE, mas este não entra no cálculo do indicador, que resulta apenas do rácio entre o tempo produtivo e o tempo total.

[2] O Critical Manufacturing classifica os estados do recurso segundo a norma SEMI E10, distinguindo, entre outros, os estados *Productive*, *Standby*, *UnscheduledDown* e *ScheduledDown*. No cenário, a paragem não planeada corresponde ao estado *UnscheduledDown*.

rejeitadas" do Critical Manufacturing não tem correspondência direta no OEE do Odoo, onde a mesma informação está guardada como 20 minutos de uma categoria de tempo. Sem uma regra que declare que esses 20 minutos e aquela unidade representam o mesmo acontecimento, os dois números não são comparáveis.

A coincidência dos 72% não é, aliás, arbitrária, e compreender a sua origem mostra por que razão é frágil. No cenário definido, a eficiência operacional do Critical Manufacturing é de 100%, por não existir tempo em *Standby*, e todas as unidades partilham o mesmo tempo de referência. Nestas condições, o produto dos três rácios reduz-se algebricamente ao rácio único que o Odoo calcula:

$$\frac{225}{250} \times \frac{200}{225} \times \frac{9}{10} = \frac{200 \times 0{,}9}{250} = \frac{180}{250} = 72\%.$$

A igualdade resulta, portanto, de duas condições particulares do cenário, e não de uma equivalência entre os modelos. Basta remover uma delas para que os agregados divirjam, como se demonstra em seguida.

Ensaio contrafactual: introdução de um período de espera

Para verificar que a coincidência depende do cenário e não dos modelos, considera-se uma variação em que a janela de produção inclui 20 minutos em que o recurso está disponível mas não produz, correspondentes ao estado *Standby* da norma SEMI E10. Todos os restantes valores do cenário permanecem inalterados: 225 minutos produtivos, 25 minutos de paragem não planeada, 10 unidades produzidas, 9 conformes e um tempo de referência de 20 minutos por unidade. A janela passa, assim, de 250 para 270 minutos.

Esta variação é escolhida por incidir exatamente sobre a divergência registada na última linha da Tabela 5.9: o Critical Manufacturing deriva a disponibilidade do tempo total de calendário, ao passo que o Odoo a deriva da duração real registada da operação. O período de espera ocorre fora da ordem de fabrico, uma vez que a operação não está em execução, pelo que não integra a duração registada pelo Odoo, mas integra necessariamente o calendário do recurso no Critical Manufacturing. A Tabela 5.10 apresenta o resultado.

Tabela 5.10: Efeito da introdução de 20 minutos de espera sobre o indicador.

Implementação	**Derivação**	**OEE**
Odoo MRP	O tempo de espera não integra a duração registada da ordem. O rácio mantém-se: $180/250$.	72,0%
Critical Manufacturing MES	Disponibilidade $(270-25)/270 = 90{,}7\%$; desempenho $(1200/1350) \times (225/245) = 81{,}6\%$; qualidade $9/10 = 90{,}0\%$.	66,7%
Representação comum	Disponibilidade $225/270 = 83{,}3\%$; desempenho $200/225 = 88{,}9\%$; qualidade $9/10 = 90{,}0\%$.	66,7%

Os dois sistemas passam a apresentar valores distintos, 72,0% e 66,7%, uma diferença de 5,3 pontos percentuais a partir de acontecimentos produtivos idênticos. A divergência de representação, que no cenário base permanecia oculta sob um agregado coincidente, torna-se agora visível no próprio valor do indicador.

O ensaio permite três observações. Primeira, confirma que a igualdade observada no cenário base é uma propriedade desse cenário e não uma equivalência entre os modelos, o que reforça a leitura de que a comparação de agregados não constitui verificação de interoperabilidade. Segunda, mostra que a lacuna de consistência semântica se manifesta de forma intermitente: os mesmos dois sistemas, com as mesmas definições divergentes, tanto podem concordar como discordar consoante os acontecimentos que ocorram na janela observada, o que torna a deteção por comparação de valores não apenas insuficiente mas instável. Terceira, e mais relevante para a proposta, o diagnóstico da framework é indiferente a esta variação: a lacuna de C1.2 seria identificada exatamente da mesma forma nos dois cenários, porque incide sobre a existência do mapeamento e não sobre o valor produzido. O diagnóstico deteta a condição em falta independentemente de esta se manifestar ou não no resultado observado.

Este ensaio constitui uma variação analítica sobre o cenário e não uma segunda execução nos sistemas; os valores resultam da aplicação das regras de cálculo documentadas na Secção 5.3 aos parâmetros alterados. A análise regressa, a partir daqui, ao cenário base definido na Tabela 5.4.

Antes de retirar conclusões, importa considerar uma hipótese alternativa. Face ao modelo das seis grandes perdas [68], que sustenta a formulação multiplicativa normalizada na ISO 22400-2 [69], as paragens completas são habitualmente imputadas à disponibilidade e a produção abaixo do ritmo previsto ao desempenho. Poderia, por isso, argumentar-se que a configuração do Odoo não constitui uma definição alternativa legítima, mas antes uma configuração incorreta, e que o problema observado seria de natureza técnica, resolúvel por correção, e não de natureza semântica, resolúvel por governança.

Esta hipótese não se sustenta no caso analisado. O valor produzido pelo Odoo é aritmeticamente equivalente ao que resulta da formulação multiplicativa, e as categorias de perda que utiliza correspondem às mesmas perdas que esta distingue: a falha do equipamento à disponibilidade, a velocidade reduzida ao desempenho e o defeito à qualidade. A diferença não está na imputação das perdas, mas na primitiva através da qual a perda de qualidade é medida, o tempo num sistema e a contagem de unidades no outro, o que constitui uma divergência de representação e não um erro de cálculo.

Ainda que assim não fosse, a conclusão manter-se-ia. Se uma das configurações estivesse efetivamente incorreta, a organização não disporia de meio para o determinar: sem uma definição de referência aprovada que fixasse a forma de imputar cada perda, e sem um mapeamento que relacionasse as duas representações, não existiria critério face ao qual verificar qualquer das configurações. É precisamente a ausência dessa definição que torna indistinguíveis uma divergência legítima e um erro de configuração, e que faz com que ambos permaneçam invisíveis enquanto o valor agregado coincidir. A lacuna de governança subsiste, por isso, em qualquer das leituras.

Confirma-se, deste modo, a lacuna do princípio C1.2 e a sua ligação direta ao problema. Cada implementação é coerente com as suas próprias definições e regras; o que falta é o nível acima, a definição de referência que fixe o significado de cada componente e o mapeamento que relacione as duas representações. O passo seguinte consiste em construir esse nível. A divergência aqui evidenciada não é corrigida nesta subsecção: constitui o ponto de partida para a intervenção que se segue.

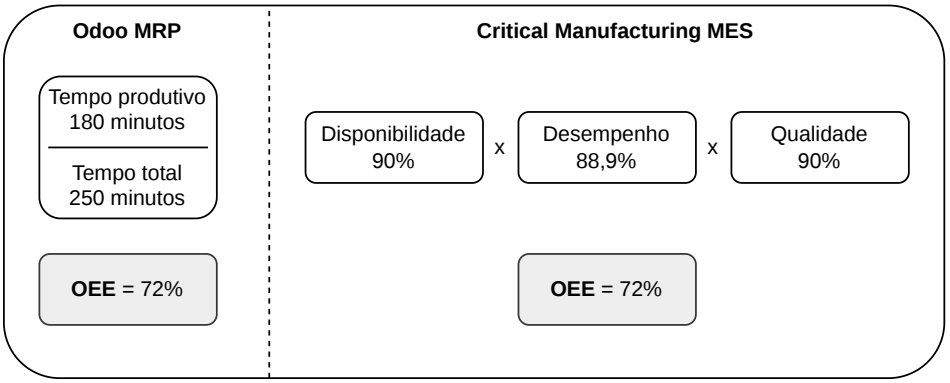


Figura 5.4: Duas construções distintas do mesmo valor de OEE.

5.4.3 Seleção e tratamento das lacunas

O diagnóstico identificou duas lacunas, ambas classificadas como parciais mas em sentidos opostos: a ausência de decisão que sustente a utilização da fonte (C1.1) e a ausência de execução que materialize as definições aprovadas (C1.2). As duas são relevantes para a necessidade da organização e ambas são tratadas nesta intervenção. Importa, contudo, distingui-las quanto ao efeito, porque atuam sobre condições diferentes.

A lacuna do princípio C1.1 diz respeito à autoridade sobre as fontes. Num cenário de fonte única para os dados de entrada, esta lacuna não produz a divergência observada na Subsecção 5.4.2; o seu tratamento melhora a governança das fontes, mas não é o que a resolve. A lacuna do princípio C1.2, pelo contrário, é a causa direta dessa divergência: é a ausência de mapeamento que permite que o mesmo indicador seja construído por modelos incompatíveis sem que essa incompatibilidade seja detetada, e é por isso o seu tratamento que a elimina. Esta distinção é importante para não atribuir à aprovação da fonte um efeito que pertence ao mapeamento.

A Tabela 5.11 resume a decisão sobre cada lacuna.

Tabela 5.11: Priorização e decisão sobre as lacunas identificadas.

Lacuna	**Princípio**	**Relação com o problema**	**Decisão**
Fonte autoritativa por aprovar	C1.1	Não causa a divergência; afeta a autoridade sobre as fontes.	Tratar
Ausência de mapeamento entre as representações	C1.2	Causa direta da divergência; impede a equivalência de interpretação.	Tratar

Os princípios C0, C2.1 e C2.2, classificados como cumpridos, não originam ação e permanecem apenas sob monitorização. As duas subsecções seguintes descrevem o tratamento de cada lacuna, pela ordem dos princípios.

Tratamento da lacuna de fonte autoritativa

O que falta no princípio C1.1 situa-se no nível de decisão. As fontes já estão identificadas e registadas e, na prática, é utilizada uma fonte única para os dados de entrada, pelo que a intervenção não cria mecanismos novos: submete a aprovação o que já se encontra em utilização. Para cada dado do âmbito, aprova-se e regista-se a fonte autoritativa aplicável, estabelece-se a regra a seguir perante valores divergentes e define-se a periodicidade de revisão da decisão, identificando quem detém autoridade para a rever. Deste modo, a execução existente passa a decorrer de uma decisão explícita e verificável, e o princípio passa a cumprir.

Tratamento da lacuna de consistência semântica

O que falta no princípio C1.2 situa-se no nível de execução. A decisão já está tomada e foi verificada no diagnóstico: o glossário de negócio fixa o significado do indicador e das suas componentes, incorporando o registo da respetiva aprovação, e o catálogo de metadados técnicos documenta como cada sistema representa esses dados. A intervenção não reabre nem repete essa aprovação; parte destas duas peças e constrói a que as relaciona, materializando uma decisão que até aqui permanecia sem efeito sobre os dados.

As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam, como contexto, um excerto de cada uma dessas peças pré-existentes.

Tabela 5.12: Excerto do glossário de negócio (contexto).

Ref.	**Termo**	**Definição de referência**
G03	Tempo total	Duração total da janela de produção considerada.
G07	Perda de qualidade	Produção que não cumpre os requisitos, expressa em unidades.
G11	Disponibilidade	Fração do tempo total em que o recurso esteve efetivamente a produzir.

Tabela 5.13: Excerto do catálogo de metadados técnicos.

Componente	**Representação no Odoo**	**Representação no Critical Manufacturing MES**
Perda de qualidade	*Process Defect*, expressa em minutos.	Unidades rejeitadas, expressas por contagem.
Perda de cadência	*Reduced Speed*, expressa em minutos.	Rácio de desempenho.

Com estas duas peças como base, constrói-se o mapeamento. Para cada definição de referência, o mapeamento identifica a representação correspondente em cada sistema e a regra de transformação que as relaciona. É aqui que a divergência da Subsecção 5.4.2 passa a estar declarada e controlada: a regra que associa os 20 minutos de *Process Defect* do Odoo à unidade rejeitada do Critical Manufacturing torna explícito que ambos representam o mesmo acontecimento. A Tabela 5.14 apresenta o mapeamento.

Tabela 5.14: Mapeamento entre as definições de referência e as representações.

Definição de referência	**Odoo**	**Critical Manufacturing MES**	**Regra de transformação**
Tempo total	Duração real da ordem.	Tempo total de calendário.	Identidade (minutos), desde que não exista tempo de espera fora da ordem.
Perda de disponibilidade	*Equipment Failure*.	Estado *UnscheduledDown*.	Identidade (minutos).
Perda de cadência	*Reduced Speed*.	Rácio de desempenho.	Converter minutos em rácio.
Perda de qualidade	*Process Defect* (minutos).	Unidades rejeitadas (contagem).	20 min correspondem a 1 unidade, ao tempo de referência.
Unidades conformes	Produzidas menos refugo.	Contagem de conformes.	Identidade (unidades).

A condição associada à primeira linha do mapeamento merece registo, por decorrer diretamente do ensaio contrafactual. A identidade entre a duração da ordem no Odoo e o tempo de calendário no Critical Manufacturing só é válida enquanto não existir tempo em que o recurso esteja disponível fora da execução da ordem. O mapeamento declara esta condição em vez de a pressupor, o que torna explícito o limite de validade da correspondência e obriga a rever a regra caso essa condição deixe de se verificar.

Do mapeamento resulta, como consequência, uma representação comum. Esta não é uma premissa introduzida à partida, mas o produto de relacionar as definições de referência com as

representações mapeadas: uma estrutura única onde cada componente do indicador tem uma definição, uma unidade e uma regra de derivação comuns, alinhadas com a formulação normativa do indicador [69], e para a qual os dois sistemas passam a poder ser traduzidos. A Tabela 5.15 apresenta a estrutura da representação comum, cujo preenchimento numérico é feito na subsecção seguinte.

Tabela 5.15: Estrutura da representação comum do indicador.

Componente	**Definição de referência**	**Unidade**
Disponibilidade	Tempo de operação sobre tempo total.	%
Desempenho	Tempo de ciclo ideal sobre tempo de operação.	%
Qualidade	Unidades conformes sobre unidades produzidas.	%
OEE	Disponibilidade $\times$ desempenho $\times$ qualidade.	%

Por fim, o mapeamento e a representação comum ficam sujeitos a controlo de versões. Sempre que uma definição de referência ou uma regra de mapeamento é alterada, regista-se uma nova versão com a data, o autor e o motivo da alteração, e a representação comum passa a referir a versão em vigor. Este registo assegura que a relação entre os dois sistemas permanece rastreável ao longo do tempo e não se degrada silenciosamente à medida que as definições evoluem.

Com o mapeamento estabelecido, a representação comum construída e o controlo de versões definido, o nível de execução do princípio C1.2 fica assegurado, e o princípio passa a cumprir. Tratadas as duas lacunas, resta verificar o efeito da intervenção sobre o indicador. É o que a subsecção seguinte faz, recalculando o OEE na representação comum.

5.4.4 Recálculo do OEE na representação comum

Tratadas as lacunas, verifica-se o efeito da intervenção sobre o indicador. Os dados de entrada são os mesmos do cenário; o que mudou foi a existência de definições de referência e de um mapeamento que permitem traduzir cada sistema para uma representação comum. É nessa representação que o OEE é agora recalculado.

Aplicando as definições de referência, cada componente do indicador passa a ter uma regra de derivação única, correspondente à formulação normativa apresentada na Secção 5.3. A disponibilidade resulta do tempo de operação sobre o tempo total, ou seja, dos 225 minutos que restam depois de descontada a paragem de 25 minutos, sobre os 250 minutos da janela, o que dá 90%. O desempenho resulta do tempo de ciclo ideal sobre o tempo de operação, dos 200 minutos ideais para as 10 unidades sobre os 225 de operação, o que dá 88,9%. A qualidade resulta das unidades conformes sobre as produzidas, nove em dez, o que dá 90%. O OEE é o produto das três componentes.

A Tabela 5.16 apresenta o recálculo.

Tabela 5.16: Recálculo do OEE na representação comum.

Componente	**Derivação na representação comum**	**Valor**
Disponibilidade	Tempo de operação sobre tempo total: 225/250.	90,0%
Desempenho	Tempo de ciclo ideal sobre tempo de operação: 200/225.	88,9%
Qualidade	Unidades conformes sobre produzidas: 9/10.	90,0%
OEE	Produto das três componentes.	72,0%

Importa esclarecer um ponto que a tabela poderia sugerir. As componentes da representação comum coincidem numericamente com as apresentadas pelo Critical Manufacturing na Tabela 5.6, o que poderia levar a concluir que a representação comum é o modelo desse sistema adotado como referência. Não é. A representação comum deriva da definição normativa do indicador estabelecida na ISO 22400-2 [69], fixada na Subsecção 5.3.1 antes de qualquer sistema ter sido observado, e a coincidência explica-se por o Critical Manufacturing já seguir essa formulação multiplicativa. A diferença entre ambos é, aliás, verificável: as derivações não são idênticas. O desempenho da representação comum resulta diretamente do rácio 200/225, ao passo que o do Critical Manufacturing resulta do produto entre a taxa de eficiência e a eficiência operacional, decomposição que a norma não prevê e que, como o ensaio contrafactual mostrou, produz um valor distinto quando existe tempo em espera. A representação comum não é, por isso, nenhum dos dois sistemas, mas o referencial externo para o qual ambos são traduzidos.

O valor do OEE é o mesmo dos 72% obtidos por cada sistema na Subsecção 5.4.2. O que mudou não foi o resultado, mas a sua interpretação. Antes, os 72% coincidiam a partir de dois modelos incompatíveis, um que dividia tempo e outro que multiplicava rácios, por força de condições particulares do cenário e sem que essa incompatibilidade fosse detetável a partir do valor. Agora, os 72% resultam de uma única decomposição, com componentes definidas, unidades declaradas e regras de transformação registadas, para a qual ambos os sistemas podem ser traduzidos.

O desempenho merece uma nota. Na representação comum, o desempenho de referência é de 88,9%, correspondente ao rácio 200/225. O Odoo apresentava um valor arredondado de 88%, e é o produto pelas componentes de 90% que reproduz exatamente os 72%. Esta diferença não indica um erro de nenhum dos sistemas; resulta apenas de o Odoo apresentar o desempenho arredondado, e ilustra a razão pela qual a comparação exige definições e regras comuns, e não apenas a leitura dos valores apresentados.

A ambiguidade que motivou a intervenção fica, assim, resolvida. A organização passa a conseguir explicar cada componente do indicador, identificar a origem de cada valor em cada sistema e relacionar as duas representações sem depender da coincidência do agregado. A verificação de que esta resolução satisfaz a condição de sucesso definida no início é feita na secção seguinte.

5.5 Avaliação da eficácia e síntese do caso de uso

Concluída a intervenção, avalia-se a sua eficácia perante o problema e a condição de sucesso estabelecidos no início da aplicação. A avaliação da eficácia não coincide com a avaliação da maturidade: a primeira determina se a necessidade foi tratada, enquanto a segunda caracteriza as condições de governança. Uma classificação de maturidade pode melhorar sem que o problema fique resolvido; por isso, a eficácia retoma explicitamente a condição de sucesso definida na ficha de identificação.

Verificação da condição de sucesso

A condição de sucesso estabelecia que a organização deveria passar a conseguir identificar e explicar os dados, as regras e os resultados produzidos por cada implementação, e determinar se estes representam de forma equivalente a mesma realidade produtiva. A verificação confronta essa condição com a evidência disponível após a intervenção, resumida na Tabela 5.17.

Tabela 5.17: Verificação da condição de sucesso após a intervenção.

Condição de sucesso	**Evidência após a intervenção**	**Estado**
Identificar os dados de cada implementação	As representações do Odoo e do Critical Manufacturing estão catalogadas e relacionadas com as definições de referência.	Satisfeita
Explicar as regras de cada implementação	O mapeamento declara a regra de transformação de cada componente, incluindo a conversão entre tempo e contagem.	Satisfeita
Relacionar os resultados de forma inequívoca	Os resultados dos dois sistemas são traduzíveis para a representação comum, onde o indicador tem uma decomposição única.	Satisfeita

Antes da intervenção, a organização observava o mesmo valor de OEE nos dois sistemas, mas não dispunha de meios para determinar se esse valor significava o mesmo. Depois da intervenção, o valor continua a ser 72%, mas passa a ser explicável: cada componente tem uma definição de referência, cada representação está mapeada e a divergência entre os modelos está declarada e controlada. A condição de sucesso fica, assim, satisfeita, e a eficácia da intervenção confirma-se.

Importa distinguir este resultado da simples subida das classificações de maturidade. Os princípios C1.1 e C1.2 passaram a cumprir, o primeiro pela aprovação da decisão que faltava e o segundo pela materialização da decisão que já existia, mas não é essa alteração que demonstra a eficácia. A eficácia demonstra-se por a organização passar a conseguir interpretar e relacionar os dados, que era o objetivo declarado, e não por os princípios terem mudado de classificação.

Síntese e contributo para a demonstração

O caso de uso percorreu a metodologia da framework do princípio ao fim: partiu de uma necessidade organizacional, delimitou o âmbito, reproduziu um cenário comum em dois siste-

mas, diagnosticou a maturidade dos cinco princípios, identificou as lacunas, tratou as relevantes e verificou a eficácia. Ao longo desse percurso, o resultado mais expressivo foi a divergência na decomposição do OEE: dois sistemas a produzir o mesmo valor agregado a partir de modelos semanticamente incompatíveis, uma coincidência que uma leitura assente apenas no valor do indicador interpretaria, erradamente, como equivalência. Designa-se esta situação por falso positivo de interoperabilidade, por corresponder a um resultado que satisfaz o teste habitual de comparação sem que a condição que esse teste pretende verificar se encontre satisfeita.

O ensaio contrafactual apresentado na Subsecção 5.4.2 acrescenta precisão a este resultado. A introdução de vinte minutos de espera no recurso, mantendo todos os restantes acontecimentos, faz os dois sistemas divergirem em 5,3 pontos percentuais. Daqui decorre que o falso positivo não é um estado estável dos sistemas, mas um efeito dependente dos acontecimentos que ocorram na janela observada: a mesma incompatibilidade de definições tanto pode produzir concordância como discordância. Uma verificação assente na comparação de agregados é, por isso, não apenas insuficiente como instável, ao passo que o diagnóstico da framework identifica a condição em falta de forma idêntica nos dois cenários, por incidir sobre a existência do mapeamento e não sobre o valor produzido.

A ordem pela qual o caso decorreu é relevante para o alcance do que demonstra. A lacuna do princípio C1.2 foi identificada na Subsecção 5.4.1, a partir da grelha de diagnóstico e da evidência de governança recolhida, antes de a decomposição do indicador ter sido examinada. Só depois, na Subsecção 5.4.2, se observou a divergência que essa lacuna permitia antecipar. O diagnóstico não foi, por isso, uma justificação construída a posteriori para uma divergência já conhecida: a grelha apontou a condição em falta e a observação subsequente confirmou-a. É esta sequência que distingue a aplicação da framework de uma interpretação retrospetiva do caso.

O contributo da proposta mede-se, também, pelo que sucederia na sua ausência. Sem definições de referência aprovadas e sem mapeamento entre as representações, a organização disporia apenas dos dois valores do indicador para avaliar a equivalência entre as implementações. Sendo esses valores coincidentes, a comparação seria dada como bem-sucedida e os dados poderiam ser cruzados entre sistemas com base numa equivalência que não existe. A divergência não se manifestaria como erro nem como alerta, mas como concordância. O que a framework acrescenta não é, portanto, a correção de um resultado incorreto, mas a capacidade de detetar uma incompatibilidade que o resultado ocultava.

A localização das divergências constitui um segundo resultado, com alcance para além do caso analisado. Todas as divergências reunidas na Tabela 5.9 residem nas definições, nos metadados ou nos dados mestre de cada sistema, e nenhuma reside nos dados transacionais. Os dois sistemas concordam sobre o que aconteceu na janela de produção: dez unidades processadas, nove conformes e uma rejeitada, uma paragem de vinte e cinco minutos e uma quebra de cadência equivalente. Divergem apenas nas estruturas através das quais esses acontecimentos são classificados e convertidos em indicador. Esta regularidade sustenta empiricamente o critério de fronteira estabelecido no Capítulo 4 entre a qualidade dos dados e a consistência semântica e indica, para outros casos, em que camada as divergências desta natureza devem ser procuradas.

A avaliação em dois níveis revelou-se determinante para o diagnóstico. As duas lacunas identificadas seriam indistinguíveis sob uma classificação agregada, quando na realidade são opostas: no princípio C1.1 existe uma prática em utilização que nenhuma decisão sustenta, ao passo que no princípio C1.2 existe uma decisão aprovada que nenhum mecanismo materializa. É esta segunda situação que produz a divergência observada no indicador. O problema industrial em causa não decorre, assim, da ausência de governança, mas da desarticulação entre uma decisão tomada e os mecanismos de gestão que a deveriam executar, o que confirma que o objeto da proposta é a ligação entre os dois planos e não qualquer um deles isoladamente.

O caso permite ainda observar o comportamento da framework perante as condições que já se encontram asseguradas. Os princípios C0, C2.1 e C2.2 foram classificados como cumpridos e não originaram qualquer ação, permanecendo apenas sob monitorização. A intervenção limitou-se aos dois princípios com lacunas identificadas e, dentro de cada um, ao nível em falta, preservando o glossário, o catálogo de metadados e o catálogo de fontes já existentes. Esta seletividade corresponde ao comportamento previsto na Secção 4.3 e distingue a proposta de uma abordagem que exigisse a implementação integral de um modelo de referência.

O alcance do que aqui se demonstra deve, contudo, ser lido com a delimitação já estabelecida na Secção 5.1. O caso isola a consistência semântica como objeto central e recorre a um cenário construído e simplificado, com dois sistemas não integrados. Não reproduz um ciclo completo de governança num ambiente operacional real, com múltiplos produtos, integração entre sistemas ou evolução das definições ao longo do tempo. Acresce que os artefactos de governança considerados no diagnóstico foram estipulados para a demonstração, e não observados numa organização, pelo que o que o caso demonstra é a aplicabilidade do instrumento e não a sua eficácia em condições de campo.

O próprio desenho do cenário impõe uma segunda ressalva, que a avaliação em dois níveis torna mais precisa. Nenhum princípio foi exercitado nos dois níveis em simultâneo. Os princípios C0, C2.1 e C2.2 não foram sujeitos a condições capazes de os fazer falhar em qualquer dos planos: no caso de C0, o âmbito envolve um número reduzido de intervenientes, sem sobreposição de competências nem conflito de autoridade entre áreas, situação em que a atribuição de responsabilidades não é posta à prova; no caso de C2.1, as não conformidades resumem-se a uma unidade, registada em ambos os sistemas; e no caso de C2.2, as transformações consideradas são diretas e o identificador da ordem percorre os dois sistemas sem alteração. Os princípios C1.1 e C1.2 falharam, cada um, num nível apenas, pelo que o caso demonstra a capacidade de distinguir uma decisão por concretizar de uma prática por governar, mas não a de detetar a ausência simultânea de ambos. As classificações atribuídas refletem, por isso, a ausência de adversidade no âmbito analisado, e não uma verificação da capacidade de diagnóstico da framework em toda a sua extensão. O que se demonstra é a sua aplicabilidade e o seu valor analítico num âmbito delimitado, e não a sua generalização, discussão retomada no capítulo de conclusões.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo apresenta as conclusões da dissertação, retoma as questões de investigação e os objetivos, sintetiza os contributos e identifica as limitações do trabalho e as possibilidades de desenvolvimento futuro.

6.1 Conclusões

A digitalização da indústria conduziu à coexistência de sistemas de IT e de OT que representam os mesmos processos através de identificadores, unidades, estruturas, definições ou regras de cálculo distintas. A existência de ligações técnicas e de formatos compatíveis não assegura, por isso, que os dados sejam interpretados de forma consistente.

Para responder a este problema, foi desenvolvida uma framework de governança e gestão de dados para contextos industriais IT/OT, independente de sistemas e tecnologias específicos e assente em cinco princípios: responsabilização explícita, fonte autoritativa, consistência semântica, qualidade dos dados e rastreabilidade dos dados. O primeiro corresponde à dimensão de governança, ao fixar os direitos de decisão sobre os dados; os restantes correspondem a domínios governados. Esta distinção evita tratar todos os elementos da proposta como capacidades da mesma natureza.

Cada domínio governado é assegurado a dois níveis, ligados pela cadeia de políticas, processos e práticas. No nível de decisão aprovam-se as fontes, as definições e as regras aplicáveis; no nível de execução, essas decisões materializam-se em catálogos, glossários, mapeamentos e registos. A avaliação separada dos dois níveis distingue situações que uma classificação agregada apresentaria como equivalentes: uma decisão aprovada que nenhum mecanismo materializa exige a construção desse mecanismo, ao passo que uma prática em utilização que nenhuma decisão sustenta exige a formalização da decisão.

A framework estabelece ainda um critério explícito de fronteira entre a qualidade dos dados e a consistência semântica. A primeira avalia se os valores registados representam adequadamente os acontecimentos, dentro das regras de cada sistema; a segunda avalia se essas regras são partilhadas

e relacionadas entre sistemas. Dois valores podem, assim, estar corretos nos respetivos sistemas sem representarem a mesma realidade organizacional.

A metodologia parte de um problema ou objetivo organizacional, delimita o âmbito, diagnostica individualmente os cinco princípios com base em evidência observável e traduz as lacunas em ações de melhoria. A eficácia dessas ações é avaliada perante a condição de sucesso inicial, e não através da alteração das classificações de maturidade.

A proposta foi demonstrada num caso de uso industrial simplificado, centrado na representação da eficácia global dos equipamentos, o OEE, no Odoo MRP e no Critical Manufacturing MES. O mesmo cenário produtivo, com uma paragem não planeada, uma perda de cadência e uma unidade não conforme, foi reproduzido de forma independente nos dois sistemas.

Ambos apresentaram um OEE de 72%, construído, contudo, por modelos diferentes. No Odoo, o indicador corresponde a um único rácio entre o tempo totalmente produtivo e o tempo total, com as perdas a reduzirem o numerador e a unidade não conforme convertida em tempo. No Critical Manufacturing, resulta do produto de componentes independentes, com a qualidade determinada pela contagem de unidades. A coincidência do agregado não demonstrava, portanto, a equivalência dos modelos. Esta situação foi designada por falso positivo de interoperabilidade: a comparação do resultado final sugeria compatibilidade semântica sem que a condição necessária para essa conclusão estivesse assegurada.

O ensaio contrafactual confirmou-o. A introdução de um período de espera de vinte minutos, mantendo os restantes acontecimentos, produziu uma diferença de 5,3 pontos percentuais entre os dois sistemas. A concordância inicial dependia, assim, das condições particulares do cenário, e a mesma incompatibilidade semântica tanto podia produzir valores iguais como diferentes. A comparação de indicadores agregados constitui, por esse motivo, um critério insuficiente e instável para verificar a interoperabilidade: a equivalência tem de ser analisada nos dados de entrada, nas definições, nas fronteiras temporais, nas unidades, nas classificações e nas regras de cálculo que produzem o resultado.

O diagnóstico identificou a condição em falta antes de a decomposição do indicador ter sido examinada. A consistência semântica apresentava definições de referência aprovadas, mas não o mapeamento que as relacionasse com as representações dos sistemas; a observação posterior confirmou a consequência dessa lacuna. O diagnóstico não constituiu, por isso, uma explicação construída a posteriori.

O perfil inicial classificou a responsabilização explícita, a qualidade dos dados e a rastreabilidade como cumpridas. A fonte autoritativa e a consistência semântica foram classificadas como parciais, mas por razões opostas: na primeira existia uma prática não aprovada, na segunda uma decisão não materializada. Uma classificação única indicaria apenas que ambos os princípios estavam parcialmente assegurados, sem revelar que um exigia a formalização de uma decisão e o outro a construção de um mecanismo.

O tratamento preservou os elementos já adequados. O glossário de negócio e o catálogo de metadados não foram substituídos; foram acrescentadas apenas as peças em falta: a aprovação

formal das fontes autoritativas, o mapeamento entre as definições de referência e as representações de cada sistema, a representação comum do indicador e o respetivo controlo de versões. Essa representação comum não corresponde à adoção do modelo de nenhum dos sistemas, mas a um referencial externo, baseado na definição normativa do indicador, para o qual ambos podem ser traduzidos. Os sistemas mantêm as suas estruturas internas, desde que as diferenças sejam conhecidas, documentadas e controladas.

Após a intervenção, os mesmos dados continuaram a produzir um OEE de 72%, mas passaram a originar uma decomposição única: 90% de disponibilidade, 88,9% de desempenho e 90% de qualidade. A diferença não está no valor final, mas na capacidade de explicar a sua construção e de relacionar de forma inequívoca as duas representações. A condição de sucesso foi, deste modo, satisfeita, e a eficácia resulta da resolução da necessidade organizacional, e não da subida das classificações de maturidade.

Relativamente à primeira questão de investigação, conclui-se que uma framework aplicável a contextos industriais heterogéneos deve distinguir os direitos de decisão dos domínios sobre os quais estes se exercem e articular a responsabilização, as fontes autoritativas, a consistência semântica, a qualidade e a rastreabilidade. Estes princípios foram derivados das áreas funcionais identificadas no estado da arte.

Quanto à segunda, conclui-se que a operacionalização através de políticas, processos e práticas relaciona as decisões de governança com os mecanismos que as executam, e que a avaliação separada dos dois níveis, sustentada por evidência observável, identifica com maior precisão a natureza das lacunas.

Quanto à terceira, conclui-se que a metodologia estabelece uma ligação explícita entre a necessidade organizacional, o âmbito, o diagnóstico, a priorização das lacunas, as ações e a avaliação da eficácia. No caso analisado, essa ligação permitiu localizar o problema na consistência semântica, em vez de o classificar genericamente como um problema de integração ou de qualidade.

Os quatro objetivos foram concretizados: a estrutura conceptual assente em princípios derivados e num âmbito delimitado (O1); a operacionalização e os critérios que verificam separadamente cada nível (O2); a metodologia orientada por problemas organizacionais (O3); e a demonstração no caso de uso (O4).

A resposta à questão principal resulta da articulação destes elementos. Uma framework de governança e gestão de dados pode apoiar a utilização consistente, fiável e rastreável dos dados industriais quando parte da necessidade da organização, delimita o âmbito, avalia separadamente as decisões e a sua execução e utiliza as lacunas para orientar ações específicas. A tecnologia suporta os mecanismos necessários, mas não substitui as decisões que determinam o significado, a autoridade e as condições de utilização dos dados.

6.2 Síntese dos contributos

Os contributos anunciados no Capítulo 1 concretizam-se em quatro resultados.

O primeiro é a framework, cujos princípios são derivados das áreas funcionais relevantes e não enumerados, e que inclui um critério explícito de fronteira entre a consistência semântica e a qualidade dos dados.

O segundo é o mecanismo de avaliação em dois níveis, que distingue quatro situações que uma classificação agregada confundiria e associa a cada uma delas uma orientação de intervenção distinta. O caso de uso mostrou o seu valor prático: duas lacunas classificadas como parciais correspondiam a problemas opostos.

O terceiro é a metodologia de aplicação, que liga uma necessidade concreta ao diagnóstico, às ações e à avaliação da eficácia, permitindo concentrar a intervenção nos princípios com lacunas e, dentro de cada um, no nível em falta.

O quarto é a identificação do falso positivo de interoperabilidade. A sua relevância não se esgota no caso analisado: mostra que a comparação de agregados pode confirmar uma equivalência inexistente e que essa confirmação é instável, por depender dos acontecimentos observados. A análise mostrou ainda que todas as divergências residem nas definições, nos metadados e nos dados mestre, e nenhuma nos dados transacionais, o que indica em que camada divergências desta natureza devem ser procuradas.

6.3 Limitações

A demonstração foi realizada num cenário deliberadamente delimitado, composto por uma ordem de produção, um produto, um recurso, dois sistemas e um conjunto controlado de acontecimentos. Esta opção permitiu isolar as diferenças entre as representações e observar com clareza o funcionamento da framework, embora não reproduza toda a diversidade existente num ambiente industrial real.

Os artefactos de governança considerados no diagnóstico foram definidos para suportar a demonstração, não tendo sido recolhidos numa organização em funcionamento. Assim, o caso permite avaliar a aplicabilidade da proposta e o seu valor analítico num âmbito controlado, ficando a avaliação dos seus efeitos organizacionais e operacionais dependente de aplicações futuras em contexto real.

A configuração do cenário permitiu exercitar situações distintas nos níveis de decisão e de execução, nomeadamente uma decisão ainda não materializada e uma prática ainda não formalmente aprovada. Contudo, não foram analisadas todas as combinações possíveis entre estes níveis, como a ausência simultânea de decisão e de mecanismos de execução num mesmo princípio.

Por fim, a aplicação incidiu sobre o indicador OEE e sobre duas implementações específicas. Embora a framework tenha sido concebida de forma independente de sistemas e tecnologias, a análise de outros indicadores, processos e arquiteturas industriais será necessária para avaliar a sua transferibilidade para contextos organizacionais mais complexos.

6.4 Trabalho futuro

A framework deverá ser aplicada em organizações industriais reais e em cenários mais complexos, envolvendo vários processos, sistemas e tipos de dados, de modo a avaliar a robustez dos critérios de diagnóstico e os efeitos das ações de melhoria ao longo do tempo.

Importará testá-la, em particular, em contextos que exercitem as condições não postas à prova neste caso, como conflitos de autoridade entre áreas, não conformidades recorrentes ou transformações encadeadas por vários sistemas. Só nessas condições poderá ser avaliada a capacidade de diagnóstico em toda a sua extensão.

Poderá também ser explorada a implementação tecnológica dos artefactos propostos, nomeadamente do glossário, do catálogo de metadados, dos mapeamentos e da representação comum. Modelos como a AAS e mecanismos automáticos de validação poderão apoiar a manutenção da consistência entre sistemas, sem substituir as decisões organizacionais de governança.

A extensão da análise a outros indicadores e a outras classes de dados industriais permitirá, por fim, verificar se a concentração das divergências nas definições, nos metadados e nos dados mestre constitui uma regularidade mais ampla ou uma característica do indicador analisado.

Em síntese, a presente dissertação estabelece uma base conceptual e metodológica para relacionar as decisões de governança com os mecanismos que as concretizam em contextos industriais. A demonstração realizada evidencia que a concordância entre os resultados apresentados por sistemas distintos não assegura, por si só, uma interpretação comum dos dados. A utilização consistente, fiável e rastreável da informação depende, assim, de tornar explícitas e controláveis as decisões, definições e representações que sustentam esses resultados.

Referências

[1] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld e M. Hoffmann, «Industry 4.0,» *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, pp. 239–242, 1 de ago. de 2014. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4.

[2] H. Xu, W. Yu, D. Griffith e N. Golmie, «A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78 238–78 259, 2018, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2884906. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8558534.

[3] T. P. Raptis, A. Passarella e M. Conti, «Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97 052–97 093, 2019, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929296. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8764545/.

[4] G. Hesse, C. Matthies, W. Sinzig e M. Uflacker, «Adding Value by Combining Business and Sensor Data: An Industry 4.0 Use Case,» em *Database Systems for Advanced Applications*, vol. 11448, Springer, 2019, pp. 528–532. DOI: 10.1007/978-3-030-18590-9_80. URL: http://arxiv.org/abs/1903.06453.

[5] J. Nilsson e F. Sandin, «Semantic Interoperability in Industry 4.0: Survey of Recent Developments and Outlook,» em *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, jul. de 2018, pp. 127–132. DOI: 10.1109/INDIN.2018.8471971. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8471971.

[6] H. da Rocha, A. Espirito-Santo e R. Abrishambaf, «Semantic Interoperability in the Industry 4.0 Using the IEEE 1451 Standard,» em *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, out. de 2020, pp. 5243–5248. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254274. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9254274.

[7] B. Otto, «Data Governance,» *Business & Information Systems Engineering*, vol. 3, n.º 4, pp. 241–244, ago. de 2011, ISSN: 1867-0202. DOI: 10.1007/s12599-011-0162-8. URL: http://link.springer.com/10.1007/s12599-011-0162-8.

[8] R. Abraham, J. Schneider e J. vom Brocke, «Data governance: A conceptual framework, structured review, and research agenda,» *International Journal of Information Management*, vol. 49, pp. 424–438, 1 de dez. de 2019, ISSN: 0268-4012. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.07.008. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401219300787.

[9] V. Khatri e C. V. Brown, «Designing data governance,» *Communications of the ACM*, vol. 53, n.º 1, pp. 148–152, 2010. DOI: 10.1145/1629175.1629210.

[10] R. Y. Wang e D. M. Strong, «Beyond accuracy: what data quality means to data consumers,» *Journal of Management Information Systems*, vol. 12, n.º 4, pp. 5–33, 1 de mar. de 1996, ISSN: 0742-1222. DOI: 10.1080/07421222.1996.11518099. URL: https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099.

[11] International Organization for Standardization, «ISO 8000-61:2016 — Data Quality — Part 61: Data Quality Management: Process Reference Model,» International Organization for Standardization, Geneva, International Standard ISO 8000-61:2016, nov. de 2016. URL: https://www.iso.org/standard/63086.html.

[12] K. Weber, B. Otto e H. Österle, «One Size Does Not Fit All — A Contingency Approach to Data Governance,» *ACM Journal of Data and Information Quality*, vol. 1, n.º 1, pp. 1–27, 2009. DOI: 10.1145/1515693.1515696.

[13] J. Yebenes Serrano e M. Zorrilla, «A Data Governance Framework for Industry 4.0,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, n.º 12, pp. 2130–2138, 2021, ISSN: 1548-0992. DOI: 10.1109/TLA.2021.9480156.

[14] M. Zorrilla e J. Yebenes, «A reference framework for the implementation of data governance systems for industry 4.0,» *Computer Standards and Interfaces*, vol. 81, 2022, ISSN: 0920-5489. DOI: 10.1016/j.csi.2021.103595.

[15] F. Almada-Lobo, «The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES),» *Journal of Innovation Management*, vol. 3, pp. 16–21, 24 de jan. de 2016. DOI: 10.24840/2183-0606_003.004_0003.

[16] M. Choubey, S. Mishra e S. Bansal, «Integration of digital technologies in manufacturing: a survey of industry 4.0 applications and challenges,» *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 17, n.º 2, pp. 575–608, 2026, ISSN: 1868-5137. DOI: 10.1007/s12652-026-05046-x.

[17] G. Hwang, J. Lee, J. Park e T.-W. Chang, «Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment,» *International Journal of Production Research*, vol. 55, n.º 9, pp. 2590–2602, 2017. DOI: 10.1080/00207543.2016.1245883.

[18] P. Tambare, C. Meshram, C.-C. Lee, R. J. Ramteke e A. L. Imoize, «Performance Measurement System and Quality Management in Data-Driven Industry 4.0: A Review,» *Sensors*, vol. 22, n.º 1, p. 224, 2021. DOI: 10.3390/s22010224.

[19] F. Balaha, H. Albinali, H. Alrabiah, M. Ali e Z. Bahroun, «An analytical review of data integration for decision support in smart manufacturing,» *Decision Analytics Journal*, vol. 17, 2025, ISSN: 2772-6622. DOI: 10.1016/j.dajour.2025.100647.

[20] Y.-L. The e A. G. Kuusk, «Aligning IIoT and ISA-95 to Improve Asset Management in Process Industries,» em *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2021, pp. 153–163, ISBN: 978-3-030-64227-3. DOI: 10.1007/978-3-030-64228-0_14.

[21] MESA International, *B2MML — Business to Manufacturing Markup Language*, 7ª ed., XML implementation of the ANSI/ISA-95 and IEC 62264 family of standards, MESA International, Chandler, AZ, 2020. URL: https://mesa.org/topics-resources/b2mml/.

[22] T. Czvetkó e J. Abonyi, «Data sharing in Industry 4.0 - AutomationML, B2MML and International Data Spaces-based solutions,» *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 33, p. 100 438, 1 de jun. de 2023, ISSN: 2452-414X. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100438. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X23000110.

[23] Y. Lu, K. C. Morris e S. Frechette, «Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems,» National Institute of Standards e Technology, Gaithersburg, MD, NIST Interagency/Internal Report NISTIR 8107, fev. de 2016. DOI: 10.6028/NIST.IR.8107. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.8107.pdf.

[24] E. Y. Nakagawa, P. O. Antonino, F. Schnicke, R. Capilla, T. Kuhn e P. Liggesmeyer, «Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 156, p. 107 241, 1 de jun. de 2021, ISSN: 0360-8352. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107241. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221001455.

[25] R. Martin et al., *Industrial Internet Reference Architecture Technical Report*. 4 de jun. de 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.18076.90249.

[26] A. Kok, A. Martinetti e J. Braaksma, «The Impact of Integrating Information Technology With Operational Technology in Physical Assets: A Literature Review,» *IEEE Access*, vol. 12, pp. 111 832–111 845, 12 de ago. de 2024, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3442443.

[27] A. Kuusk e J. Gao, «Automating Data Driven Decisions for Asset Management: A How to Framework for Integrating OT/IT Operational and Information Technology, Procedures and Staff,» em *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2021, pp. 201–213, ISBN: 978-3-030-64227-3. DOI: 10.1007/978-3-030-64228-0_18.

[28] C. Hildebrandt et al., «Ontology Building for Cyber–Physical Systems: Application in the Manufacturing Domain,» *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 17, n.º 3, pp. 1266–1282, 2020. DOI: 10.1109/TASE.2020.2991777.

[29] S. R. Bader e M. Maleshkova, «The Semantic Asset Administration Shell,» em *Semantic Systems. The Power of AI and Knowledge Graphs*, M. Acosta, P. Cudré-Mauroux, M. Maleshkova, T. Pellegrini, H. Sack e Y. Sure-Vetter, eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 159–174, ISBN: 978-3-030-33220-4. DOI: 10.1007/978-3-030-33220-4_12.

[30] Y. Huang, S. Dhouib, L. Medinacelli e J. Malenfant, «Semantic Interoperability of Digital Twins: Ontology-based Capability Checking in AAS Modeling Framework,» em *2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, IEEE, 8 de mai. de 2023, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICPS58381.2023.10128003.

[31] H. Yang, «Governance: Perspectives of public administration, health administration, and primary care,» *Chinese General Practice Journal*, vol. 2, n.º 1, p. 100 045, 1 de abr. de 2025, ISSN: 2950-5593. DOI: 10.1016/j.cgpj.2025.100045. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950559325000021.

[32] S. De Haes e W. Van Grembergen, «IT Governance Structures, Processes and Relational Mechanisms: Achieving IT/Business Alignment in a Major Belgian Financial Group,» em *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, HI, USA: IEEE, 2005, 237b–237b. DOI: 10.1109/HICSS.2005.362. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/1385726/.

[33] M. N. Kooper, R. Maes e E. E. O. R. Lindgreen, «On the governance of information: Introducing a new concept of governance to support the management of information,» *International Journal of Information Management*, vol. 31, n.º 3, pp. 195–200, 1 de jun. de 2011, ISSN: 0268-4012. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2010.05.009. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401210000708.

[34] I. Alhassan, D. Sammon e M. Daly, «Data governance activities: an analysis of the literature,» *Journal of Decision Systems*, vol. 25, pp. 64–75, sup1 10 de jun. de 2016, ISSN: 1246-0125. DOI: 10.1080/12460125.2016.1187397. URL: https://doi.org/10.1080/12460125.2016.1187397.

[35] P. Brous, M. Janssen e R. Vilminko-Heikkinen, «Coordinating Decision-Making in Data Management Activities: A Systematic Review of Data Governance Principles,» em *Electronic Government (EGOV 2016)*, sér. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9820, Springer, 2016, pp. 115–125. DOI: 10.1007/978-3-319-44421-5_9.

[36] M. Al-Ruithe, E. Benkhelifa e K. Hameed, «A systematic literature review of data governance and cloud data governance,» *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 23, n.º 5, pp. 839–859, 1 de nov. de 2019, ISSN: 1617-4917. DOI: 10.1007/s00779-017-1104-3. URL: https://doi.org/10.1007/s00779-017-1104-3.

[37] J. Gao, Y. Sun, R. Rameezdeen e C. Chow, «Understanding Data Governance Requirements in IoT Adoption for Smart Ports: A Gap Analysis,» *Maritime Policy & Management*, vol. 51, n.º 4, pp. 617–630, 2024, ISSN: 0308-8839. DOI: 10.1080/03088839.2022.2155318.

[38] L. Guerreiro, J. Martins, M. d. R. Bernardo, H. S. Mamede e F. Branco, «Impact of a Master Data Management Framework to Trigger Data Governance Maturity: A Systematic Literature Review,» *IEEE Access*, vol. 13, pp. 190 644–190 667, 31 de out. de 2025, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3627855.

[39] DAMA International, *DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge*, 2ª ed. Basking Ridge, NJ: Technics Publications, 2017, ISBN: 978-1634622349.

[40] C. Cichy e S. Rass, «An Overview of Data Quality Frameworks,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24 634–24 648, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2899751.

[41] L. Ehrlinger e W. Wöß, «A Survey of Data Quality Measurement and Monitoring Tools,» *Frontiers in Big Data*, vol. 5, p. 850 611, 2022. DOI: 10.3389/fdata.2022.850611.

[42] M. D. Wilkinson et al., «The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship,» *Scientific Data*, vol. 3, n.º 1, p. 160 018, 15 de mar. de 2016, ISSN: 2052-4463. DOI: 10.1038/sdata.2016.18. URL: https://www.nature.com/articles/sdata201618.

[43] E. Schultes et al., «FAIR Digital Twins for Data-Intensive Research,» *Frontiers in Big Data*, vol. 5, 11 de mai. de 2022, ISSN: 2624-909X. DOI: 10.3389/fdata.2022.883341. URL: https://www.frontiersin.org/journals/big-data/articles/10.3389/fdata.2022.883341/full.

[44] D. Peters e S. Schindler, «FAIR for digital twins,» *CEAS Space Journal*, vol. 16, n.º 3, pp. 367–374, 1 de mai. de 2024, ISSN: 1868-2510. DOI: 10.1007/s12567-023-00506-y. URL: https://doi.org/10.1007/s12567-023-00506-y.

[45] T. Bjarsch, K. Drechsler e J. Schilp, «Ontologies for FAIR Data in Additive Manufacturing: A Use Case-Based Evaluation,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 27, n.º 8, p. 2 401 528, 2025, ISSN: 1527-2648. DOI: 10.1002/adem.202401528. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.202401528.

[46] M. C. Paulk, B. Curtis, M. B. Chrissis e C. V. Weber, «Capability Maturity Model for Software, Version 1.1,» Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, rel. téc. CMU/SEI-93-TR-024, 1993.

[47] IBM Data Governance Council, «The IBM Data Governance Council Maturity Model: Building a Roadmap for Effective Data Governance,» IBM Corporation, Somers, NY, rel. téc., 2007.

[48] EDM Council, «Data Management Capability Assessment Model (DCAM),» Enterprise Data Management Council, New York, rel. téc., 2020. URL: https://edmcouncil.org/frameworks/dcam/.

[49] ISACA, *COBIT 2019 Framework: Governance and Management Objectives*. Schaumburg, IL: ISACA, 2019, ISBN: 978-1-60420-728-6.

[50] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, «ISO/IEC 38505-1:2017 — Information Technology — Governance of IT — Governance of Data — Part 1: Application of ISO/IEC 38500 to the Governance of Data,» International Organization for Standardization, Geneva, International Standard ISO/IEC 38505-1:2017, 2017. URL: https://www.iso.org/standard/56639.html.

[51] L. F. C. Cardoso e E. D. Canedo, «Data Governance Maturity Models and Practices: A Systematic Literature Review,» em *Communications in Computer and Information Science*, sér. Communications in Computer and Information Science, vol. 2676, Springer, 2026, pp. 161–170, ISBN: 978-3-032-05726-6. DOI: 10.1007/978-3-032-05727-3_16.

[52] W. A. C. Lopes, S. M. Ruggero e M. T. Okano, «An Assessment Framework for IT/OT Convergence Maturity in Industrial Environments,» em *2026 IEEE 16th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, IEEE, jan. de 2026. DOI: 10.1109/CCWC67433.2026.11393794.

[53] A. Awasthi, L. Krpalkova e J. Walsh, «Bridging the Maturity Gaps in Industrial Data Science: Navigating Challenges in IoT-Driven Manufacturing,» *Technologies*, vol. 13, n.º 1, p. 22, 6 de jan. de 2025, ISSN: 2227-7080. DOI: 10.3390/technologies13010022.

[54] T. Harland, C. Hocken, T. Schröer e V. Stich, «Towards a Democratization of Data in the Context of Industry 4.0,» *Sci*, vol. 4, n.º 3, p. 29, 14 de jul. de 2022, ISSN: 2413-4155. DOI: 10.3390/sci4030029.

[55] C. Bahim et al., «The FAIR Data Maturity Model: An Approach to Harmonise FAIR Assessments,» *Data Science Journal*, vol. 19, n.º 1, p. 41, 2020. DOI: 10.5334/dsj-2020-041.

[56] M. Zorrilla, F. M. Somohano-Rodriguez e J. R. Yebenes, «On Building a Data-Driven Culture in SMEs,» *IEEE Access*, vol. 13, pp. 203 875–203 896, 2025, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3638456.

[57] M. Jacoby, F. Volz, C. Weißenbacher, L. Stojanovic e T. Usländer, «An approach for Industrie 4.0-compliant and data-sovereign Digital Twins,» *at - Automatisierungstechnik*, vol. 69, n.º 12, pp. 1051–1061, 1 de dez. de 2021, ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2021-0074. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/auto-2021-0074/html?lang=en.

[58] M. Angos-Mediavilla, M. Gorenzweig, G. Pahnke, A. Pomp, M. Freund e T. Meisen, «Advancing Industry 4.0: Integrating Data Governance into Asset Administration Shell for Enhanced Interoperability,» em *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS)*, vol. 1, SciTePress, 2024, pp. 128–140, ISBN: 978-989-758-692-7. DOI: 10.5220/0012632900003690.

[59] M. Angos-Mediavilla et al., «Enabling Value Chain Interoperability: Integrating and Evaluating Robust Data Governance Aspects Into the Asset Administration Shell,» em *Lecture Notes in Business Information Processing*, sér. Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 567, Springer, 2026, pp. 178–213, ISBN: 978-3-032-08572-6. DOI: 10.1007/978-3-032-08573-3_8.

[60] A. Munoz-Arcentales, S. López-Pernas, A. Pozo, Á. Alonso, J. Salvachúa e G. Huecas, «Data Usage and Access Control in Industrial Data Spaces: Implementation Using FIWARE,» *Sustainability*, vol. 12, n.º 9, p. 3885, jan. de 2020, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su12093885. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3885.

[61] A. Bagozi, D. Bianchini, M. Garda, M. Melchiori e A. Rula, «A multi-layered data service model for Cyber-Physical Production Networks,» *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 50, 2026, ISSN: 2452-414X. DOI: 10.1016/j.jii.2025.101043.

[62] P. Mudgal, «A Data-Centric Framework for Implementing Artificial Intelligence in Smart Manufacturing,» *Electronics*, vol. 14, n.º 16, 2025, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics14163304.

[63] J. Yebenes e M. Zorrilla, «Towards a data governance framework for third generation platforms,» em *Procedia Computer Science*, vol. 151, Elsevier B.V., 2019, pp. 614–621. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.082.

[64] M. Zorrilla e J. Yebenes, «Architecture Building Blocks for Data Governance in Data Spaces,» *Information*, vol. 16, n.º 11, 2025, ISSN: 2078-2489. DOI: 10.3390/info16110927.

[65] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park e S. Ram, «Design Science in Information Systems Research,» *MIS Quarterly*, vol. 28, n.º 1, pp. 75–105, 2004. DOI: 10.2307/25148625.

[66] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger e S. Chatterjee, «A Design Science Research Methodology for Information Systems Research,» *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, n.º 3, pp. 45–77, 2007. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

[67] R. J. Wieringa, *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-662-43839-8.

[68] S. Nakajima, *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

[69] International Organization for Standardization, «ISO 22400-2:2014 — Automation Systems and Integration — Key Performance Indicators (KPIs) for Manufacturing Operations Management — Part 2: Definitions and Descriptions,» International Organization for Standardization, Geneva, International Standard ISO 22400-2:2014, jan. de 2014. URL: https://www.iso.org/standard/54497.html.

[70] SEMI, «SEMI E10 — Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) and Utilization,» SEMI, Milpitas, CA, Industry Standard SEMI E10, 2017.