



**ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GOVERNANÇA E
DESENVOLVIMENTO**

WELLINGTON LUIZ BARBOSA

**ESTUDO DE CASO DO SISTEMA X-ROAD DA ESTÔNIA: ADAPTAÇÃO DE
MODELO DE CONVERGÊNCIA ESTRATÉGICA PARA O CONTEXTO DA
ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA FEDERAL BRASILEIRA**

Brasília

2026

Estudo de Caso do Sistema X-Road da Estônia: Adaptação de Modelo de Convergência Estratégica para o Contexto da Administração Pública Federal Brasileira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Governança e Desenvolvimento pelo Programa de Mestrado Profissional em Governança e Desenvolvimento da Escola Nacional de Administração Pública - ENAP.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Moura Vieira

Brasília
2026

B238e Barbosa, Wellington Luiz
 Estudo de caso do sistema X-Road da Estônia: adaptação
 de modelo de convergência estratégica para o contexto da
 administração pública federal brasileira / Wellington Luiz
 Barbosa. -- Brasília: Enap, 2026.
 160f.: il.

 Dissertação (Mestrado – Programa de Mestrado
 Profissional em Governança e Desenvolvimento) -- Escola
 Nacional de Administração Pública, 2026.

 Orientação: Prof. Dr. Lucas Moura Vieira
 1. Governo Digital. 2. Governança de Dados. 3. Segurança
 da Informação. 4. Interoperabilidade. 5. Gestão do
 Conhecimento. 6. Estudo de Caso Comparado – Brasil –
 Estônia. 7. Administração Pública. I. Título. II. Vieira, Lucas
 Moura orient.

CDD 352.380285



Mestrado Profissional em Governança e Desenvolvimento

ATA DA BANCA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GOVERNANÇA E DESENVOLVIMENTO

Aluno: Wellington Luiz Barbosa

Ano de Ingresso: 2022

Título da Dissertação: Estudo de caso do Sistema X-Road da Estônia: Adaptação de Modelo de Convergência Estratégica para o Contexto da Administração Pública Federal Brasileira

Orientadora: Prof. Dr. Lucas Moura Vieira

Avaliadores: Prof. Dr. Ciro Campos Christo Fernandes

Prof. Dr. Mathias Alberto Möller

Avaliação:

Aprovado

Aprovado com ressalvas

Reprovado

Brasília, 30 de abril de 2026

DocuSigned by:

Ciro Campos Christo Fernandes

3CECE4511100438...

Avaliador

Signiert von:

Mathias Alberto Möller

5EB9DF73790D4FE...

Avaliador

Assinado por:

Lucas Moura Vieira

237799C70A6A420...

Orientador

ENAP

MINISTÉRIO DA
GESTÃO E DA INOVAÇÃO
EM SERVIÇOS PÚBLICOS

GOVERNO FEDERAL
BRASIL

DESENVOLVIMENTO E QUALIDADE DE VIDA
REGISTRO DE SERVIÇOS PÚBLICOS

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos desta jornada acadêmica.

"A interoperabilidade não é luxo técnico, mas requisito fundamental para viabilidade econômica e sustentabilidade de longo prazo de qualquer ecossistema de serviços digitais governamentais."

(Nordic Institute for Interoperability Solutions, 2021)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e pela força para superar todos os desafios.

À minha família, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo durante todo o período de pesquisa e escrita.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucas Moura Vieira, pela orientação dedicada, paciência e contribuições valiosas que tornaram este trabalho possível.

À Escola Nacional de Administração Pública (ENAP), pela oportunidade de realização do mestrado e por todo o suporte institucional.

Aos colegas do Programa de Mestrado em Governança e Desenvolvimento, pelos debates enriquecedores e pela troca de experiências.

Aos profissionais do Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos, que contribuíram com *insights* valiosos sobre a implementação da Infraestrutura Nacional de Dados.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A transformação digital da administração pública requer infraestruturas que viabilizem compartilhamento eficiente, seguro e transparente de dados entre instituições governamentais, superando silos informacionais historicamente consolidados. Esta dissertação investiga como convergência estratégica entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados pode fundamentar desenvolvimento de Infraestruturas Públicas Digitais robustas, mediante análise comparativa do sistema X-Road estoniano e da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) brasileira. O X-Road, operacional desde 2001, constitui caso paradigmático de Digital Public Infrastructure (DPI) madura (score 90/100 em avaliação global) que interconecta 2.000 + instituições, viabiliza 99% dos serviços públicos estonianos digitalmente e economiza estimados 2% do PIB anualmente em custos administrativos. A pesquisa adota abordagem qualitativa baseada em análise documental, revisão sistemática de literatura acadêmica e aplicação de framework de critérios de avaliação desenvolvido pela University College London. A análise identifica que sucesso do X-Road se fundamenta em três pilares: (1) arquitetura técnica descentralizada com auditabilidade radical e interoperabilidade mediante protocolos abertos; (2) governança institucional multipartidária com mandato legal obrigatório (X-Road Act, 2002); (3) capacidades organizacionais construídas mediante investimento sustentado em capacitação digital. Contrastivamente, a IND brasileira, instituída pelo Decreto no 12.198/2024, enfrenta desafios estruturais derivados de federalismo tripartite, escala populacional 164 vezes maior, heterogeneidade de sistemas legados acumulados ao longo de cinco décadas e fragmentação histórica da coordenação de tecnologia da informação governamental. A dissertação desenvolve modelo conceitual de DPI robusta baseado em quatro dimensões (técnica, institucional, organizacional e contextual) e framework analítico de cinco categorias de desafios de implementação, demonstrando que transferibilidade do X-Road para contexto brasileiro exige adaptações críticas em governança federativa, estratégias de integração de legados e sustentabilidade fiscal. Conclui-se que convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados é operacionalizável mediante DPIS quando adequadamente governadas, mas Brasil não deve replicar mecanicamente modelo estoniano deve implementar princípios universais adaptados a especificidades nacionais, usando casos internacionais como evidências de viabilidade técnica e fontes de lições processuais.

Palavras-chave: Infraestrutura Pública Digital. Governança de Dados. Governança do Conhecimento. X-Road. Interoperabilidade. Transformação Digital. Governo Digital.

ABSTRACT

Digital transformation of public administration requires infrastructures that enable efficient, secure, and transparent data sharing among government institutions, overcoming historically consolidated information silos. This dissertation investigates how strategic convergence between Knowledge Governance and Data Governance can underpin the development of robust Digital Public Infrastructures through comparative analysis of Estonia's X-Road system and Brazil's National Data Infrastructure (IND). X-Road, operational since 2001, constitutes a paradigmatic case of mature Digital Public Infrastructure (DPI) (score 90/100 in global assessment) that interconnects 2,000+ institutions, enables 99% of Estonian public services digitally, and saves an estimated 2% of GDP annually in administrative costs. The research adopts a qualitative approach based on documentary analysis, systematic literature review, and application of an evaluation criteria framework developed by University College London. The analysis identifies that X-Road's success rests on three pillars: (1) decentralized technical architecture with radical auditability and interoperability through open protocols; (2) multi-stakeholder institutional governance with mandatory legal mandate (X-Road Act, 2002); (3) organizational capabilities built through sustained investment in digital capacity building. Contrastively, Brazil's IND, established by Decree No. 12,198/2024, faces structural challenges derived from tripartite federalism, a population scale 164 times larger, heterogeneity of legacy systems accumulated over five decades, and historical fragmentation of government information technology coordination. The dissertation develops a conceptual model of robust DPI based on four dimensions (technical, institutional, organizational, and contextual) and an analytical framework of five categories of implementation challenges, demonstrating that X-Road's transferability to the Brazilian context requires critical adaptations in federative governance, legacy integration strategies, and fiscal sustainability. It concludes that convergence between Knowledge Governance and Data Governance is operationalizable through DPIs when properly governed, but Brazil should not mechanically replicate the Estonian model—it must implement universal principles adapted to national specificities, using international cases as evidence of technical feasibility and sources of procedural lessons.

Keywords: Digital Public Infrastructure. Data Governance. Knowledge Governance. X-Road. Interoperability. Digital Transformation. Digital Government.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protocolo de Análise Documental em 5 Fases	35
Figura 2 – Linha do Tempo: Trajetória de Desenvolvimento do X-Road (1997-2024)	49
Figura 3 – Arquitetura Técnica do X-Road em Camadas	56
Figura 4 – Pilha Digital: Camadas de Infraestrutura	81
Figura 5 – Blocos de Construção Modulares de DPI	85
Figura 6 – Arquitetura da Infraestrutura Nacional de Dados (IND)	95
Figura 7 – Modelo de Convergência Estratégica entre DPI e IND	111
Figura 8 – Três Dimensões Estruturantes da Convergência Estratégica	115
Figura 9 – Índices de Maturidade de DPI: Comparação Global de 12 Países	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura do Corpus Documental da Pesquisa	39
Tabela 2 – Dimensões Analíticas e Fontes Documentais da Pesquisa	41
Tabela 3 – Fases de Implementação do Sistema X-Road (1997-2024)	50
Tabela 4 – Impactos Mensuráveis do X-Road na Estônia (2024)	62
Tabela 5 – Comparação de Atributos entre DPIs Globais	70
Tabela 6 – Análise de Elementos do X-Road para o Contexto Brasileiro	73
Tabela 7 – Seis Atributos de Infraestrutura Pública Digital	82
Tabela 8 – Framework do Bem Comum Aplicado à DPI	89
Tabela 9 – Blocos Modulares de Infraestrutura Digital Pública	93
Tabela 10 – Componentes da Infraestrutura Nacional de Dados	96
Tabela 11 – Dimensões Comparativas: Governança do Conhecimento, Governança de Dados e Convergência via DPI	113
Tabela 12 – Indicadores de Desempenho e Maturidade da Infraestrutura Nacional de Dados	117
Tabela 13 – Maturidade de Infraestrutura Pública Digital: Comparação Global (12 Países)	135
Tabela 14 – Comparação Estrutural entre X-Road (Estônia) e IND (Brasil)	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A

Aadhaar - Identificação biométrica única da Índia
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI - Artificial Intelligence (Inteligência Artificial)
API - Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)

B

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento
BR - Brasil

C

CCGD - Comitê Central de Governança de Dados
CDO - Chief Data Officer (Executivo de Dados)
CDMP - Certified Data Management Professional
CGI.br - Comitê Gestor da Internet no Brasil
CKO - Chief Knowledge Officer (Executivo de Conhecimento)
COVID-19 - Coronavirus Disease 2019

D

DATAPREV - Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência
DCP - Decentralised Claims Protocol
DIKW - Data-Information-Knowledge-Wisdom (Dados-Informação-Conhecimento-Sabedoria)
DL - Decreto-Lei
DPG - Digital Public Goods (Bens Públicos Digitais)
DPI - Digital Public Infrastructure (Infraestrutura Pública Digital)
DSP - Data Space Protocol

E

ENAP - Escola Nacional de Administração Pública
ESB - Enterprise Service Bus (Barramento de Serviços Corporativos)
EU - European Union (União Europeia)
e-ID - Electronic Identity (Identidade Eletrônica)

F

FORTRAN - Formula Translation (linguagem de programação)

G

GC - Governança do Conhecimento
GD - Governança de Dados
GDPR - General Data Protection Regulation (Regulamento Geral de Proteção de Dados)
GOV.BR - Plataforma de Governo Digital Brasileiro

H

HTTP - Hypertext Transfer Protocol

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IND - Infraestrutura Nacional de Dados

INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais

J

JSON - JavaScript Object Notation

K

km² - Quilômetro quadrado

L

LAI - Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/2011)

LGPD - Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018)

M

MGI - Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos

MCP - Model Context Protocol

N

NIIS - Nordic Institute for Interoperability Solutions

NSA - National Security Agency (Agência de Segurança Nacional - EUA)

O

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONG - Organização Não Governamental

ONU - Organização das Nações Unidas

OPSI - Observatory of Public Sector Innovation

P

PDG - Plano de Dados de Governança

PIB - Produto Interno Bruto

PIX - Sistema de Pagamentos Instantâneos (Brasil)

PKI - Public Key Infrastructure (Infraestrutura de Chaves Públicas)

R

REST - Representational State Transfer

RIA - Riigi Infosüsteemi Amet (Agência de Sistemas de Informação da Estônia)

S

SERPRO - Serviço Federal de Processamento de Dados

SGD - Secretaria de Governo Digital

SISP - Sistema de Administração dos Recursos de Informação e Informática

SOAP - Simple Object Access Protocol

SPB - Sistema de Pagamentos Brasileiro

SQL - Structured Query Language (Linguagem de Consulta Estruturada)

SWIFT - Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication

T

TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol

TCU - Tribunal de Contas da União

TI - Tecnologia da Informação

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação

TLS - Transport Layer Security

U

UCL - University College London

UE - União Europeia

UPI - Unified Payments Interface (Interface de Pagamentos Unificada - Índia)

URSS - União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

USD - United States Dollar (Dólar Americano)

V

VPN - Virtual Private Network (Rede Privada Virtual)

W

W3C - World Wide Web Consortium

X

X.509 - Padrão internacional de certificados digitais

XML - eXtensible Markup Language

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	12
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Contextualização: O Paradoxo da Transformação Digital.....	17
1.2 O Problema dos Silos Digitais na Gestão Pública.....	18
1.3 Marcos Regulatórios e a Infraestrutura Nacional de Dados.....	21
1.4 Justificativa e Relevância da Pesquisa.....	25
1.5 A Escolha do Modelo Estoniano como Caso de Estudo.....	27
1.6 Delimitação da Pesquisa.....	29
1.7 Estrutura da Dissertação.....	30
1.8 Problema de Pesquisa.....	31
1.9 Objetivos da Pesquisa.....	31
2. METODOLOGIA.....	32
2.1 Definição Metodológica da Pesquisa.....	32
2.2 Justificativa da Escolha Metodológica.....	33
2.3 Delimitação do Caso e Corpus Documental.....	33
2.4 Protocolo de Análise Documental.....	34
2.5 Dimensões Analíticas e Estratégias de Validação.....	36
2.6 Limitações e Estratégias de Mitigação.....	37
3. O SISTEMA X-ROAD: ESTRUTURA, FUNCIONAMENTO E RELEVÂNCIA COMO MODELO DPI.....	39
3.1 Contextualização Histórica e Motivações.....	39
3.2 Origens e Influências Arquiteturais do X-Road.....	42
3.3 Linha do Tempo da Implementação (1997–2024).....	44
3.4 Gênese e Evolução do X-Road.....	46
3.5 Arquitetura Técnica e Princípios de Design.....	49
3.6 Governança e Modelo Institucional.....	52
3.7 Resultados e Impactos.....	57
3.8 Adoção e Impactos Mensuráveis.....	61
3.9 Análise Crítica: Forças e Limitações do Modelo X-Road.....	64
3.10 Por que o X-Road é Referência Paradigmática de DPI?.....	68
3.11 Elementos Potencialmente Replicáveis para o Brasil.....	72
4. INFRAESTRUTURA DIGITAL PÚBLICA (DPI).....	75
4.1 Conceituação.....	75
4.2 Atributos Técnicos de DPI.....	78
4.3 Interoperabilidade através de Padrões Abertos.....	80
4.4 Infraestrutura Nacional de Dados (IND) no Brasil.....	88
4.5 Convergência Estratégica entre DPI e IND.....	102
4.6 Síntese e Considerações Parciais.....	103
5. MODELO DE CONVERGÊNCIA ESTRATÉGICA ENTRE DPI e IND.....	105
5.1 Fundamentos Teóricos da Convergência Estratégica.....	105
5.2 Convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados.....	108
5.3 Elementos Estruturantes do Modelo.....	113
5.4 Indicadores de Desempenho e Maturidade.....	117
5.5 Síntese Crítica e Proposta de Implementação.....	119
6. APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE CONVERGÊNCIA ESTRATÉGICA.....	120
6.1 Comparação de Arquiteturas Técnicas.....	120
6.2 Modelos de Governança: NIIS versus SGD/MGI.....	121
6.3 Marcos Normativos Comparados.....	122
6.4 Análise de Maturidade DPI.....	122
6.5 Possibilidades de Adaptação e Limitações.....	123
6.6 Contextualização da Governança de Dados no Setor Público Brasileiro.....	124
6.7 Implementação do Modelo de Convergência Estratégica.....	126
6.8 Estudo de Caso Ilustrativo: Integração de Cadastros.....	127
6.9 Síntese e Projeções Futuras.....	128
7. RESULTADOS ESPERADOS E IMPLICAÇÕES.....	130
7.1 Convergência Teórica.....	130
7.2 Framework de Maturidade Adaptado ao Contexto Brasileiro.....	131
7.3 Trajetória de Implementação: Lições do Caso Estoniano.....	131
7.4 Implicações para Administração Pública Brasileira.....	132
7.5 Contribuições da Pesquisa.....	134

8. CONCLUSÕES	135
8.1 Síntese da Pesquisa	135
8.2 Resposta à Questão de Pesquisa	136
8.3 Contribuições da Pesquisa	137
8.4 Limitações e Estudos Futuros	138
8.5 Agenda de Pesquisa Futura	138
8.6 Considerações Finais	139
9. REFERÊNCIAS	140
GLOSSÁRIO	150
ANEXO – RECOMENDAÇÕES	156

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Contextualização: O Paradoxo da Transformação Digital na Gestão Pública Brasileira

A Administração Pública brasileira experimenta atualmente uma transformação digital paradoxal que caracteriza de forma emblemática os desafios contemporâneos da gestão estatal no país. Enquanto o Brasil conquistou reconhecimento internacional como o segundo país do mundo em maturidade de governo digital, segundo o *GovTech Maturity Index 2022* do Banco Mundial, e desenvolveu marcos regulatórios avançados culminando na criação da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) através do Decreto nº 12.198 de 24 de setembro de 2024, simultaneamente enfrenta desafios estruturais severos relacionados à fragmentação de dados e conhecimento entre seus órgãos e entidades.

Essa aparente contradição revela a complexidade multidimensional do fenômeno dos silos digitais na gestão pública nacional, onde avanços significativos em plataformas integradas e arcabouços normativos coexistem com persistentes barreiras organizacionais e culturais que impedem a realização plena do potencial transformador da digitalização governamental.

A criação da IND representa um marco conceitual fundamental na evolução da gestão pública digital brasileira, estabelecendo pela primeira vez uma visão sistêmica que reconhece os dados como um ativo vital e como um bem público, alinhando-se com orientações de organismos internacionais como ONU, OCDE e Banco Mundial sobre a importância da Infraestrutura Pública Digital (DPI – Digital Public Infrastructure) e da produção de Bens Públicos Digitais (DPG – Digital Public Goods). Conforme estabelecido no decreto instituidor, a IND: constitui um conjunto de normas, políticas, arquiteturas, padrões, ferramentas tecnológicas e ativos de informação, com vistas a promover o uso estratégico dos dados em posse dos órgãos e das entidades do Poder Executivo federal, habilitando a descoberta, a interoperabilidade, o acesso, o uso estratégico, a privacidade, a segurança e a proteção de dados (Brasil, 2024).

No entanto, a existência de marcos regulatórios avançados contrasta dramaticamente com a realidade operacional evidenciada por dados recentes do Tribunal de Contas da União (TCU), que identificou aproximadamente 450 mil indícios de irregularidades em bases de dados de sistemas de informação geridos por diversas organizações públicas

federais, representando potencial prejuízo de aproximadamente R\$ 40 bilhões aos cofres públicos.

Esta discrepância entre potencial normativo e realidade operacional exemplifica a natureza sistêmica dos silos digitais na gestão pública brasileira, que transcendem questões meramente técnicas para configurar-se como desafio multidimensional que compromete a capacidade do Estado brasileiro de responder adequadamente às demandas crescentes da sociedade contemporânea por serviços públicos eficientes, transparentes e responsivos.

1.2 O Problema dos Silos Digitais na Gestão Pública

Os silos digitais na gestão pública brasileira manifestam-se como estruturas organizacionais e tecnológicas que isolam dados, informações e conhecimento em departamentos ou sistemas específicos, impedindo seu compartilhamento eficaz e utilização integrada para tomada de decisões estratégicas e prestação de serviços públicos de qualidade superior (Kouroubali; Katehakis, 2019).

Este fenômeno assume características particulares no contexto brasileiro devido à complexidade do pacto federativo, à diversidade de culturas organizacionais e aos diferentes níveis de maturidade tecnológica que caracterizam os mais de 37 mil órgãos públicos distribuídos pelos três níveis federativos, criando um mosaico de fragmentação que desafia abordagens uniformes de integração.

A dimensão histórica do problema dos silos digitais no Brasil pode ser traçada através da evolução incremental e descoordenada dos sistemas de informação governamentais, onde diferentes órgãos desenvolveram soluções tecnológicas em momentos históricos distintos, frequentemente sem consideração adequada para a interoperabilidade futura.

Esta evolução fragmentada resultou em uma arquitetura tecnológica complexa onde sistemas desenvolvidos há décadas coexistem com soluções modernas, muitas vezes sem interfaces adequadas para intercâmbio de dados. (Weerakkody; Omar, 2021) identificaram padrão similar na transformação digital da administração pública europeia, mas enfatizam que o contexto brasileiro é amplificado pela escala territorial, diversidade institucional e limitações históricas de recursos para investimentos coordenados em tecnologia da informação.

A persistência dos silos digitais no contexto brasileiro encontra suas raízes em fatores estruturais profundamente enraizados que transcendem questões tecnológicas para abordar aspectos organizacionais, históricos e institucionais. O primeiro fator estrutural refere-se ao modelo matricial de sistemas estabelecido pela reforma administrativa de 1967 mediante

o Decreto-Lei nº 200, que organizou a administração federal combinando verticalização das atividades finalísticas específicas de cada ministério com horizontalização das atividades-meio comuns a todos os órgãos e entidades—incluindo tecnologia da informação, finanças, orçamento, planejamento e organização (Brasil, 1967). Este arranjo, avançado quando concebido, previa que atividades de TI seriam providas de forma centralizada e padronizada por empresas públicas especializadas, especialmente o Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO), criado em 1964, e a Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência (DATAPREV), criada em 1974, funcionando como prestadoras internas de serviços que atendiam horizontalmente toda a administração federal.

A partir de 1994, com a criação do Sistema de Administração dos Recursos de Tecnologia da Informação (SISP) mediante Decreto nº 1.048/1994, posteriormente reestruturado pelo Decreto nº 7.579/2011, formalizou-se estrutura matricial de coordenação destinada a planejar, coordenar, organizar, operar, controlar e supervisionar recursos de TI da administração pública federal direta, autárquica e fundacional — estrutura inspirada no modelo do DL 200, não em rede. O problema não reside, portanto, em suposta hierarquização vertical de tradição burocrática weberiana — que não corresponde à realidade histórica da organização de TI no Brasil — mas sim na incapacidade do órgão central do SISP de exercer plenamente seu potencial de coordenação, resultando na obsolescência e fragmentação progressiva deste modelo matricial ao longo de décadas sem inovações estruturais significativas.

Três dinâmicas de deterioração explicam a formação de silos apesar da concepção originalmente horizontal: (a) Autonomização das unidades de TI setoriais: Embora SISP preveja coordenação central pela Secretaria de Governo Digital (SGD), na prática cada ministério desenvolveu suas próprias unidades de TI (Coordenações-Gerais, Subsecretarias, Departamentos de TI) que, com autonomia orçamentária e decisória crescente a partir dos anos 1990, passaram a contratar soluções tecnológicas independentes priorizando necessidades setoriais sobre integração horizontal — fenômeno agravado pela Lei de Licitações (Lei nº 8.666/1993 e posteriormente Lei nº 14.133/2021) que trata aquisições de TI como compras isoladas ao invés de parte de arquitetura governamental unificada; (b) Obsolescência tecnológica do SERPRO e DATAPREV: As empresas públicas de TI, concebidas nos anos 1960-1970 para mainframes e processamento *batch*, enfrentaram dificuldades de adaptação a paradigmas de computação distribuída, internet, *cloud computing* e APIs — perdendo progressivamente mercado para fornecedores privados contratados diretamente por cada órgão, fragmentando o parque tecnológico federal; (c) Ausência de arquitetura de referência obrigatória: SISP estabelece diretrizes genéricas mas historicamente não impôs padrões

técnicos de interoperabilidade vinculantes — cada órgão escolhe livremente linguagens de programação, bancos de dados, protocolos de comunicação, gerando heterogeneidade técnica que inviabiliza integração posterior sem custos proibitivos de refatoração.

O resultado é paradoxal: Brasil possui estrutura formal de coordenação horizontal de TI (SISP) mas opera na prática como arquipélago de sistemas verticalizados e incompatíveis. A IND (Infraestrutura Nacional de Dados), estabelecida pelo Decreto nº 12.198/2024, busca justamente resgatar o princípio original de horizontalização do DL 200/1967 mediante imposição de camada de interoperabilidade obrigatória que force sistemas heterogêneos a conversarem independentemente de suas diferenças internas—análogo ao que X-Road estoniano conseguiu impor mediante X-Road Act de 2002. A diferença crítica é que Estônia construiu X-Road "from scratch" em 2001 quando informatização governamental estava iniciando; Brasil tentou caminho análogo em 2005 com a e-PING (Padrões de Interoperabilidade de Governo Eletrônico), que buscava exatamente o que o X-Road Act estoniano fez: impor padrões vinculantes de interoperabilidade ao aparato estatal. A diferença de resultado é reveladora: a e-PING jamais alcançou massa crítica comparável, permanecendo como arcabouço normativo sem aderência técnica generalizada — reflexo da ausência de mandato legal compulsório e da incapacidade de impor padrões sobre sistemas desenvolvidos de forma descoordenada ao longo de quatro décadas. A IND tenta resgatar esse projeto inacabado, mas agora sobre um legado de 50+ anos, exigindo estratégia de "envelopamento" (wrapping) de sistemas legados ao invés de substituição, o que aumenta substancialmente complexidade técnica e política da implementação.

Esta cultura organizacional, embora tenha contribuído historicamente para a profissionalização do serviço público, criou incentivos para que diferentes órgãos desenvolvam competências e sistemas isolados, dificultando a coordenação horizontal necessária para abordagens integradas de gestão de dados e conhecimento. Como observa, a interoperabilidade eficaz requer não apenas compatibilidade técnica, mas também alinhamento organizacional e cultural que transcende fronteiras institucionais tradicionais.

O segundo fator estrutural relaciona-se com a complexidade inerente ao federalismo brasileiro, onde diferentes níveis de governo (federal, estadual e municipal) frequentemente desenvolvem soluções tecnológicas sem consideração adequada para a interoperabilidade futura. Esta complexidade é exemplificada pela diversidade de sistemas de gestão utilizados pelos 5.570 municípios brasileiros, onde estudos indicam que menos de 15% possuem sistemas efetivamente integrados com outros níveis de governo, criando ilhas de

informação que limitam a capacidade de coordenação de políticas públicas que requerem ação articulada entre diferentes esferas administrativas.

O reconhecimento desta limitação levou o Decreto nº 12.198/2024 a estabelecer que "a Secretaria de Governo Digital, no âmbito da IND, poderá promover a governança e a integração de dados entre os entes federativos", sinalizando uma mudança de paradigma em direção à coordenação interfederativa.

O terceiro fator estrutural refere-se à histórica escassez de recursos para investimentos em tecnologia da informação no setor público, que resultou em soluções fragmentadas desenvolvidas em diferentes momentos históricos sem arquitetura unificada.

Tal evolução, incremental e descoordenada, criou um mosaico tecnológico complexo, onde sistemas desenvolvidos há décadas coexistem com soluções modernas, frequentemente sem interfaces adequadas para intercâmbio de dados. *Codagnone; Liva; Barcevicus (2020)* identificaram padrão similar na União Europeia, mas enfatizam que a superação desta fragmentação requer investimentos coordenados em arquiteturas de interoperabilidade que transcendem upgrades tecnológicos pontuais para abordar aspectos de governança e gestão organizacional.

Os custos sistêmicos da fragmentação digital na gestão pública brasileira manifestam-se através de múltiplas dimensões que impactam tanto a eficiência operacional quanto a eficácia das políticas públicas, criando um círculo vicioso onde a fragmentação gera custos que limitam recursos para investimentos em integração.

A primeira dimensão refere-se aos custos diretos de duplicação de esforços, evidenciados pela necessidade de diferentes órgãos desenvolverem soluções similares para problemas idênticos.

Um exemplo paradigmático desta ineficiência é observado no desenvolvimento de sistemas de gestão de recursos humanos, onde praticamente cada órgão federal possui seu próprio sistema, gerando custos de desenvolvimento, manutenção e treinamento que poderiam ser significativamente reduzidos através de abordagens integradas preconizadas pela Estratégia Federal de Governo Digital 2024-2027.

A segunda dimensão dos custos relaciona-se com a perda de oportunidades de criação de valor público através da combinação inteligente de dados e conhecimentos distribuídos em diferentes organizações. (Mergel; Edelman; Haug, 2019) demonstram que a transformação digital eficaz no setor público emerge frequentemente da capacidade de conectar domínios de conhecimento tradicionalmente separados, criando insights e capacidades que transcendem a soma das contribuições individuais.

No contexto brasileiro, esta perda de oportunidades é quantificada pela diferença entre o potencial teórico de economia gerada por integração de sistemas e os resultados efetivamente alcançados, mesmo considerando sucessos pontuais como o programa Conecta GOV.BR.

Um exemplo concreto desta dinâmica é ilustrado pelos resultados do programa Conecta GOV.BR, que demonstra tanto o potencial quanto as limitações da abordagem atual de integração. O programa gerou economia de R\$ 1,57 bilhão no primeiro trimestre de 2025, através de aproximadamente 300 milhões de transações que eliminaram a necessidade de cidadãos apresentarem informações já disponíveis em bases governamentais, totalizando 1,8 bilhão de transações desde sua criação. Embora estes resultados sejam significativos e demonstram evolução crescente (R\$ 317,02 milhões em 2023, R\$ 634,98 milhões em 2024), representam apenas uma fração do potencial de economia e melhoria de serviços que poderia ser alcançado através de integração mais ampla e profunda entre sistemas governamentais, conforme preconizado pelos objetivos da IND.

A terceira dimensão dos custos manifesta-se na redução da qualidade das decisões públicas, consequência direta da fragmentação informacional que impede gestores de acessarem informações completas e atualizadas necessárias para formulação de políticas eficazes. (Bharosa; Lips; Draheim, 2020) argumentam que a qualidade das decisões governamentais está diretamente relacionada à capacidade de integrar múltiplas fontes de evidência, mas silos organizacionais criam barreiras artificiais que forçam gestores a decidir com base em informações incompletas ou desatualizadas.

Esta limitação é particularmente problemática em um contexto em que problemas públicos complexos – como mudanças climáticas, desigualdade social, transformação tecnológica e gestão de crises sanitárias – requerem compreensão holística que só pode ser alcançada através da integração de múltiplas perspectivas e fontes de conhecimento.

O caso da resposta governamental à pandemia de COVID-19 ilustra dramaticamente estas limitações, onde a fragmentação de dados epidemiológicos, socioeconômicos e de capacidade de resposta do sistema de saúde dificultou a formulação de estratégias integradas e baseadas em evidências.

A experiência pandêmica catalisou o reconhecimento da urgência de abordagens mais integradas, contribuindo para o desenvolvimento da Estratégia Federal de Governo Digital e da IND como instrumentos para enfrentar desafios sistêmicos que requerem coordenação interorganizacional eficaz.

A quarta dimensão dos custos relaciona-se com o impacto negativo sobre a confiança dos cidadãos na capacidade do Estado de prestar serviços eficientes e transparentes. (Andersson, 2021) demonstra que a percepção pública sobre a eficácia governamental está intimamente relacionada à qualidade da experiência de interação com serviços públicos, mas silos organizacionais frequentemente forçam cidadãos a fornecer as mesmas informações múltiplas vezes para diferentes órgãos, criando experiências frustrantes que corroem a legitimidade estatal. No contexto brasileiro, esta dinâmica é particularmente relevante considerando que a plataforma GOV.BR conta com 140 milhões de usuários, representando 80% da população brasileira acima de 18 anos, criando expectativas elevadas por experiências integradas e eficientes.

A análise detalhada dos dados do TCU revela que a evolução da governança e gestão de dados na administração pública federal brasileira tem sido lenta e ainda está longe do ideal, evidenciando que os silos digitais não são simplesmente resultado de limitações tecnológicas, mas refletem desafios organizacionais e culturais mais profundos que requerem abordagens sistêmicas (Tribunal de Contas da União, 2023).

Os problemas identificados incluem inconsistência e insuficiência dos dados avaliados, comprometendo a tomada de decisões e a eficácia das políticas públicas, além de dificuldades de execução de políticas devido à ausência de integração entre sistemas e compartilhamento insuficiente de dados, resultando em indisponibilidade de informações essenciais e prejuízos financeiros.

As causas subjacentes identificadas pelo TCU incluem baixa integração entre sistemas de informação, dificuldade de acesso a bases de dados de outros órgãos, insuficiência de controles de sistemas e rotinas de tratamento de dados, catálogos de bases de dados incompletos ou inexistentes, baixa priorização do tema pela alta administração, ausência de normatização consistente, e falta de campanhas de conscientização sobre cultura de dados nas organizações. Esta síntese diagnóstica revela que a superação dos silos digitais requer abordagem multidimensional que transcende soluções tecnológicas pontuais para abordar aspectos organizacionais, culturais e de governança, perspectiva incorporada na concepção da IND como conjunto de normas, políticas, arquiteturas, padrões, ferramentas tecnológicas e ativos de informação (Brasil, 2024).

1.3 - Marcos Regulatórios e a Infraestrutura Nacional de Dados

A persistência destes desafios torna-se ainda mais paradoxal quando consideramos que o Brasil possui marcos regulatórios avançados que, em teoria, deveriam facilitar a integração de dados governamentais. A Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD - Lei nº 13.709/2018), a Lei de Acesso à Informação (LAI - Lei nº 12.527/2011) e a Lei do Governo Digital (Lei nº 14.129/2021) estabelecem princípios e instrumentos que poderiam sustentar abordagens mais integradas de gestão de dados governamentais. A IND, instituída pelo Decreto nº 12.198/2024, representa a culminação desta evolução normativa, estabelecendo pela primeira vez uma arquitetura integrada que articula todos estes marcos em uma visão sistêmica de transformação digital.

O Decreto nº 12.198/2024 estabelece que a IND visa transformar dados em ativos estratégicos da sociedade, permitir a elaboração de políticas assertivas, viabilizar serviços públicos personalizados, integrados e de qualidade, fortalecer a soberania nacional, promover a transparência, a segurança, a privacidade e a proteção de dados, disponibilizar um ambiente de confiança para a sociedade, apoiar a integração federativa, estimular o uso de novas tecnologias, racionalizar custos e impulsionar o desenvolvimento econômico e social do país. Esta articulação de objetivos evidencia uma compreensão madura dos desafios sistêmicos que os silos digitais representam e da necessidade de abordagens integradas para sua superação.

O contraste entre o potencial regulatório e a realidade operacional evidencia que a superação dos silos digitais não pode ser alcançada simplesmente através de mandatos legais ou investimentos tecnológicos isolados. A implementação eficaz destes marcos requer capacidades organizacionais e técnicas que muitos órgãos ainda não desenvolveram adequadamente, além de mudanças culturais que promovam colaboração e compartilhamento de conhecimento entre organizações tradicionalmente isoladas.

Kattel; Mergel, 2019) argumentam que transformações digitais bem-sucedidas no setor público requerem convergência entre visão estratégica, capacidades organizacionais, infraestrutura tecnológica e cultura colaborativa, elementos que devem ser desenvolvidos de forma coordenada e sustentada ao longo do tempo.

A urgência da superação dos silos digitais na gestão pública brasileira é amplificada por fatores do contexto contemporâneo que tornam a integração não apenas desejável, mas essencial para a manutenção da legitimidade e eficácia estatal. Primeiro, as expectativas crescentes dos cidadãos por serviços públicos digitais de qualidade, moldadas por experiências com plataformas privadas que oferecem serviços integrados e personalizados. Segundo a necessidade de resposta eficaz a crises complexas que requerem coordenação rápida entre múltiplas organizações e níveis de governo. Terceiro, pressões fiscais que exigem

otimização de recursos públicos através da eliminação de redundâncias e aproveitamento de sinergias. Quarto, a competição internacional por investimentos e talentos, onde a qualidade da infraestrutura digital governamental torna-se fator diferencial de competitividade nacional.

A IND representa uma resposta institucional madura a estes desafios, reconhecendo que assim como a infraestrutura básica de água, energia e transporte é crucial para a vida em uma sociedade moderna, os dados tornaram-se fundamentais para a integração e tomada de decisões. Esta analogia com infraestruturas físicas é particularmente reveladora, pois sugere uma mudança paradigmática na compreensão dos dados como bem público que requer governança coordenada e investimentos sustentados, similar àqueles dedicados a infraestruturas tradicionais (Brasil, 2024).

No entanto, a eficácia da IND dependerá fundamentalmente de sua capacidade de superar os mesmos desafios que limitaram iniciativas anteriores de integração. A criação de Comitês de Governança Digital em todos os órgãos e entidades, conforme estabelecido no artigo 5º do Decreto nº 12.198/2024, representa um primeiro passo importante para institucionalizar a coordenação necessária. Da mesma forma, a elaboração obrigatória de Planos de Transformação Digital, Planos Diretores de Tecnologia da Informação e Comunicação e Planos de Dados Abertos cria mecanismos concretos para operacionalizar a integração preconizada.

1.4 Justificativa e Relevância da Pesquisa

Esta pesquisa justifica-se por sua relevância acadêmica, prática, social e por sua originalidade em abordar temática emergente e estratégica para a transformação digital do Estado brasileiro.

Relevância Acadêmica

Do ponto de vista acadêmico, esta pesquisa contribui para preencher lacuna teórica significativa na literatura sobre infraestrutura pública digital (DPI), especificamente no que concerne à convergência estratégica entre governança do conhecimento e governança de dados. Embora estudos anteriores tenham abordado separadamente aspectos de governança de dados (BHAROSA; LIPS; DRAHEIM, 2020; JANSSEN; KUK, 2016) e governança do conhecimento (Cordella; Tempini, 2015) no setor público, existe escassez de pesquisas que investiguem sistematicamente como estas duas dimensões podem convergir em contextos de DPI interoperável para gerar capacidades superiores de criação de valor público. A análise comparativa entre o modelo estoniano consolidado (X-Road) e a iniciativa brasileira emergente

(IND) oferece oportunidade única de examinar empiricamente esta convergência em diferentes estágios de maturidade, contribuindo para o avanço teórico do campo de transformação digital governamental.

Relevância Prática

Em termos práticos, esta pesquisa oferece contribuições diretas para a implementação eficaz da Infraestrutura Nacional de Dados (IND), instituída pelo Decreto nº 12.198/2024, que representa investimento estratégico significativo do governo brasileiro na superação dos silos digitais. A análise detalhada do caso estoniano, reconhecido internacionalmente como benchmark de interoperabilidade governamental (OECD, 2019; ANTHES, 2015), permite identificar elementos transferíveis, adaptações necessárias ao contexto brasileiro e antecipação de desafios de implementação. As recomendações derivadas desta pesquisa podem orientar gestores públicos, tecnólogos governamentais e formuladores de políticas envolvidos na operacionalização da IND, potencialmente reduzindo riscos, acelerando resultados e otimizando investimentos em transformação digital. Adicionalmente, o modelo conceitual proposto pode ser aplicado por órgãos e entidades para avaliar sua própria maturidade em governança de dados e conhecimento, subsidiando planejamento de capacitações e investimentos.

Relevância Social

A relevância social desta pesquisa manifesta-se em seu potencial de contribuir para a melhoria concreta da qualidade dos serviços públicos prestados aos cidadãos brasileiros. Conforme evidenciado pelos dados do Tribunal de Contas da União (TCU, 2023), a fragmentação digital atual gera prejuízos estimados em R\$ 40 bilhões aos cofres públicos, além de impor aos cidadãos experiências frustrantes caracterizadas pela necessidade de fornecer repetidamente as mesmas informações a diferentes órgãos. A implementação eficaz da IND, orientada por evidências e lições aprendidas de casos internacionais bem-sucedidos, pode transformar radicalmente a experiência cidadã com serviços públicos digitais, aproximando-a dos padrões de qualidade, integração e personalização oferecidos por plataformas privadas contemporâneas. Em um contexto em que a plataforma GOV.BR já conta com 140 milhões de usuários (80% da população adulta), melhorias incrementais na qualidade da experiência digital governamental impactam diretamente parcela significativa da sociedade brasileira, com efeitos especialmente relevantes para populações vulneráveis que dependem mais intensamente de serviços públicos.

Originalidade

Esta pesquisa apresenta originalidade em múltiplas dimensões. Primeiro, constitui a primeira investigação acadêmica brasileira que examina sistematicamente a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) desde uma perspectiva comparativa internacional, especificamente em relação ao sistema X-Road estoniano. Segundo, inova ao propor framework conceitual que articula governança do conhecimento e governança de dados como dimensões convergentes e mutuamente constitutivas em contextos de DPI, superando abordagens fragmentadas que tratam estas governanças isoladamente. Terceiro, desenvolve modelo analítico original que combina quatro dimensões (interoperabilidade técnica, governança institucional, segurança e privacidade, capacitação organizacional) com cinco categorias de desafios de implementação específicos ao contexto brasileiro (escala federativa, heterogeneidade de maturidade, legados tecnológicos, coordenação intergovernamental, cultura organizacional). Quarto, a pesquisa é pioneira ao aplicar o framework analítico da *University College London* (UCL) para avaliação de sistemas de e-government ao caso específico da IND brasileira, adaptando-o ao contexto de análise comparativa com casos internacionais. Esta combinação de originalidade teórica, metodológica e empírica posiciona a pesquisa como contribuição singular para o emergente campo de estudos sobre infraestrutura pública digital no Brasil e no Sul Global.

1.5 A Escolha do Modelo Estoniano como Caso de Estudo

Diante deste cenário complexo, onde avanços normativos significativos coexistem com desafios operacionais persistentes, a análise de modelos internacionais que conseguiram superar desafios similares torna-se essencial para identificar caminhos viáveis para a transformação da gestão pública brasileira.

O X-Road estoniano constitui caso paradigmático de Infraestrutura Pública Digital bem-sucedida, reconhecido internacionalmente como benchmark para interoperabilidade governamental (Anthes, 2015; Margetts; Dunleavy, 2013; OECD, 2019) e classificado como segunda DPI mais madura globalmente segundo análise comparativa de 12 países (score 90/100), superado apenas pela Índia. Sua capacidade de superar silos digitais é empiricamente demonstrada: 99% dos serviços públicos estonianos operam digitalmente mediante compartilhamento integrado de dados entre 2.000+ instituições (E-Estonia, 2024), eliminando 85% de coletas redundantes de informações e economizando estimados 2% do PIB anualmente em custos administrativos evitados (Kalvet; Toots, 2016; Vassil, 2015).

O sucesso estoniano fundamenta-se em abordagem sociotécnica que combina inovação arquitetural - infraestrutura descentralizada ponto-a-ponto com auditabilidade radical e segurança by-design (Kotka et al., 2016; Parsons et al., 2017) - com transformação institucional mediante marco legal obrigatório (X-Road Act de 2002) e mudança cultural sustentada por investimento massivo em capacitação digital (2% do orçamento de TI dedicado a treinamento ao longo de 24 anos) (Kalvet, 2012; Tammpuu; Masso, 2018).

Estudos acadêmicos identificam o X-Road como exemplar de convergência estratégica entre governança de dados (mediante protocolos de compartilhamento, logs imutáveis e conformidade automatizada com regulações de privacidade) e governança do conhecimento (viabilizando aprendizado organizacional cross-institucional, reutilização de soluções e coordenação de políticas públicas baseadas em visão integrada do Estado) que gera capacidades superiores de criação de valor público mensuradas em eficiência administrativa, inclusão digital, transparência e confiança cidadã (Cordella; Tempini, 2015; Drechsler; Madise, 2020; Sullivan; Burger, 2017). Como afirmam (Mazzucato et al., 2024) em análise de DPIs globais, "o X-Road demonstra que infraestruturas digitais públicas, quando adequadamente governadas, podem transformar fundamentalmente relação Estado-cidadão mediante redução de fricções burocráticas, aumento de accountability e capacitação para políticas públicas *data-driven*".

A relevância desta análise comparativa é reforçada pelas similaridades contextuais entre Brasil e Estônia em termos de necessidade de construção de capacidades estatais modernas em contextos de recursos limitados, embora as escalas e complexidades sejam evidentemente diferentes.

Ambos os países enfrentaram a necessidade de superar legados de fragmentação institucional e desenvolver soluções inovadoras que maximizam o impacto de investimentos limitados em transformação digital. Mais importante ainda, ambos reconheceram que a superação dos silos digitais requer não apenas soluções tecnológicas, mas transformações organizacionais e culturais que promovam colaboração e compartilhamento de conhecimento entre diferentes atores e organizações.

A experiência estoniana oferece lições particularmente relevantes sobre como implementar convergência estratégica entre governança de dados e governança do conhecimento, criando sinergias que transcendem a soma das contribuições individuais. O *X-Road* não representa simplesmente uma plataforma tecnológica, mas um modelo integrado de governança que articula aspectos técnicos, organizacionais e culturais em uma arquitetura coerente de transformação digital. Esta abordagem holística oferece insights valiosos para a

implementação da IND no contexto brasileiro, especialmente considerando os desafios de coordenação interfederativa e diversidade institucional que caracterizam o país.

1.6 Delimitação da Pesquisa

Esta pesquisa delimita-se à análise comparativa de dois casos específicos de infraestrutura pública digital: o sistema X-Road da Estônia e a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) do Brasil. O recorte temporal abrange o período de 2001 a 2026 para o X-Road e de 2020 a 2026 para a IND.

O estudo foca na dimensão de governança e interoperabilidade das DPIs, não abrangendo aspectos de implementação tecnológica específica, cibersegurança técnica detalhada ou análise jurídica aprofundada dos marcos regulatórios.

A análise concentra-se no nível federal de governo no Brasil, embora reconheça as implicações interfederativas da IND. Não se pretende realizar estudo de campo com gestores ou desenvolvedores, baseando-se em análise documental e bibliografia especializada.

1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, além desta introdução e das referências bibliográficas.

O Capítulo 1 apresenta a metodologia de pesquisa, caracterizando a abordagem qualitativa adotada, os procedimentos de análise documental, o *framework* analítico baseado na *University College London*, e as limitações metodológicas da pesquisa.

O Capítulo 2 analisa detalhadamente o sistema X-Road da Estônia, abordando sua contextualização histórica, gênese e evolução, arquitetura técnica, modelo de governança institucional, indicadores de adoção e impactos mensuráveis, além de análise crítica dos fatores de sucesso e elementos potencialmente replicáveis.

O Capítulo 3 desenvolve o quadro teórico-conceitual da pesquisa, articulando a conceituação de Infraestrutura Pública Digital (DPI) e seus atributos técnicos, perspectivas funcionais e relação com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, bem como a fundamentação da convergência estratégica entre governança do conhecimento e governança de dados.

O Capítulo 4 propõe modelo conceitual de convergência estratégica entre Governança do Conhecimento (GC) e Governança de Dados (GD), apresentando os

fundamentos teóricos, dimensões analíticas (interoperabilidade, governança, segurança e capacitação) e sua aplicação ao contexto brasileiro.

O Capítulo 5 realiza análise comparativa entre X-Road e IND, estruturada em quatro dimensões: arquitetural (interoperabilidade técnica), governança institucional, maturidade de implementação, e identificação de *gaps* e desafios específicos do contexto brasileiro.

O Capítulo 6 apresenta recomendações estratégicas para implementação eficaz da IND, organizadas em três níveis: técnico-arquitetural, governança institucional e capacitação e cultura organizacional.

O Capítulo 7 consolida as conclusões da pesquisa, apresentando síntese dos principais achados, contribuições teóricas e práticas, limitações do estudo, e sugestões para trabalhos futuros.

Em síntese, o problema dos silos digitais na gestão pública brasileira representa desafio sistêmico que transcende questões tecnológicas para abordar aspectos fundamentais de governança, cultura organizacional e coordenação interfederativa. Embora o país tenha desenvolvido marcos regulatórios avançados culminando na criação da IND, a eficácia desta iniciativa dependerá de sua capacidade de traduzir visões normativas em transformações operacionais concretas que superem as barreiras estruturais que perpetuam a fragmentação.

A análise do modelo *X-Road* da Estônia oferece perspectivas valiosas sobre como operacionalizar a convergência estratégica entre governança de dados e governança do conhecimento, fornecendo orientações práticas para a implementação bem-sucedida da transformação digital na gestão pública brasileira.

1.8 Problema de Pesquisa

Diante do cenário descrito, emerge o seguinte problema de pesquisa: ^[17]^[18] **Como a convergência estratégica entre governança do conhecimento e governança de dados pode contribuir para a superação dos silos digitais na gestão pública brasileira, considerando as lições aprendidas de modelos internacionais bem-sucedidos de Infraestrutura Pública Digital?**

Este problema desdobra-se em três questões específicas:

- 1) Quais são os elementos constitutivos e princípios de funcionamento de infraestruturas públicas digitais exitosas, exemplificadas pelo sistema X-Road da Estônia?
- 2) Como se configura a convergência entre governança do conhecimento e governança de dados em contextos de infraestrutura pública digital interoperável?
- 3) Quais são os principais desafios e oportunidades para implementação da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) no contexto brasileiro, considerando as especificidades do federalismo tripartite, escala populacional e heterogeneidade de maturidade tecnológica?

1.9 Objetivos da Pesquisa

Objetivo Geral:

Analisar a convergência estratégica entre governança do conhecimento e governança de dados mediante estudo comparativo do sistema X-Road da Estônia e da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) brasileira, identificando elementos transferíveis, desafios de implementação e oportunidades de criação de valor público.

Objetivos Específicos:

- 1) Caracterizar os elementos constitutivos, arquitetura técnica e modelo de governança do sistema X-Road estoniano, identificando fatores críticos de sucesso para interoperabilidade governamental;
- 2) Desenvolver modelo conceitual de convergência entre governança do conhecimento e governança de dados em contextos de infraestrutura pública digital, articulando dimensões técnicas, organizacionais e institucionais;
- 3) Analisar comparativamente os atributos de maturidade, governança e arquitetura do X-Road estoniano e da IND brasileira, identificando *gaps* e oportunidades de aprendizado;
- 4) Propor recomendações para implementação eficaz da IND no contexto brasileiro, considerando especificidades do federalismo, escala e heterogeneidade institucional.

2. METODOLOGIA

2.1 Definição Metodológica da Pesquisa

A presente dissertação adota Abordagem Qualitativa Comparativa baseada em análise documental sistemática, fundamentada na necessidade de compreender em profundidade como o modelo X-Road da Estônia e a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) podem orientar a transformação digital da Administração Pública Federal.

Esta escolha metodológica alinha-se com a natureza exploratória e explicativa da investigação, que busca não apenas descrever um fenômeno contemporâneo, mas também compreender os mecanismos subjacentes que possibilitam a convergência entre governança do conhecimento e governança de dados em contextos governamentais, através de análise documental sistemática e rigorosa de dois casos específicos de Infraestrutura Pública Digital.

2.2 Justificativa da Escolha Metodológica

A opção pelo estudo de caso com base em análise documental fundamenta-se em considerações epistemológicas e pragmáticas cuidadosamente ponderadas. Como observa Yin (2015), o estudo de caso é particularmente adequado quando se busca compreender fenômenos contemporâneos em seus contextos reais, mesmo quando o acesso direto ao fenômeno é limitado.

A abundância de documentação disponível sobre o *X-Road* – incluindo especificações técnicas, relatórios de implementação, avaliações de impacto e análises acadêmicas – permite construir uma compreensão robusta do sistema sem necessidade de coleta de dados primários.

A natureza das questões que orientam esta pesquisa – centradas no como e no porquê – justifica plenamente a abordagem documental. A documentação existente, quando analisada sistematicamente, revela não apenas o funcionamento do *X-Road*, mas também as decisões de design, os desafios enfrentados e as soluções adotadas ao longo de sua evolução. Esta profundidade analítica é possível através da triangulação de múltiplas fontes documentais, cada uma oferecendo perspectivas complementares sobre o fenômeno.

Ademais, a análise documental apresenta vantagens metodológicas significativas para esta investigação. Permite examinar a evolução temporal do *X-Road* através de documentos produzidos em diferentes momentos, oferecendo uma perspectiva longitudinal que seria difícil de capturar através de outros métodos.

A estabilidade dos documentos – que não são alterados pela presença ou questionamento do pesquisador – garante maior objetividade na análise. Além disso, a disponibilidade de documentação em língua inglesa sobre o caso estoniano e a riqueza de material sobre a administração pública brasileira viabilizam uma análise comparativa profunda e fundamentada.

2.3 Delimitação do Caso e Corpus Documental

O caso selecionado para investigação compreende dois sistemas de Infraestrutura Pública Digital: o sistema X-Road da Estônia e a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) do Brasil, analisados através de um corpus documental abrangente que inclui documentação técnica oficial, relatórios governamentais, avaliações de organismos internacionais, estudos acadêmicos publicados e análises de casos de uso específicos. A delimitação temporal abrange desde os primeiros documentos de concepção do *X-Road* (2001) até publicações recentes (2025) para o caso estoniano, e de 2020 a 2026 para o caso brasileiro.

O corpus documental será estruturado em três categorias principais, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 Estrutura do Corpus Documental da Pesquisa

Categoria	Tipos de Documentos	Fontes Principais	Período
Documentação Oficial e Técnica	<ul style="list-style-type: none"> • Especificações técnicas do X-Road • Aspectos de Segurança da Informação • Frameworks de governança • Decreto nº 12.198/2024 (IND) 	<ul style="list-style-type: none"> • Governo da Estônia • <i>Nordic Institute for Interoperability Solutions (NIIS)</i> • Secretaria de Governo Digital (SGD/MGI) • e-Estonia Portal • Portal IND no GOV.BR 	2001-2025 (EST) 2020-2026 (BR)
Literatura Acadêmica e Análises Especializadas	<ul style="list-style-type: none"> • Livros internacionais • Artigos científicos • Dissertações e teses • Estudos de caso • Análises comparativas • Revisões sistemáticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Web of Science • Scopus • Ferramentas IA de Pesquisa Acadêmica • Repositórios institucionais • Periódicos especializados 	2005-2025
Contexto Brasileiro e Comparativo	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnósticos da Transformação digital • Estratégia Federal de Governo Digital • Análises de levantamentos realizados pelo TCU • Documentos de organismos internacionais 	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamentos realizados pelo Tribunal de Contas da União • OCDE • Banco Mundial • BID • Repositórios governamentais 	2015-2025

Fonte: Elaboração própria (2026).

A primeira compreende documentação oficial e técnica, incluindo especificações do X-Road, arquitetura do sistema, protocolos de segurança, frameworks de governança e relatórios de implementação produzidos pelo governo estoniano e pela *Nordic Institute for Interoperability Solutions (NIIS)*, bem como o Decreto nº 12.198/2024 que institui a IND, documentação técnica da Secretaria de Governo Digital e Relatórios de Implementação.

A segunda categoria abrange literatura acadêmica e análises especializadas, incorporando artigos científicos, dissertações, teses e estudos de caso publicados sobre o X-Road e a IND, além de iniciativas correlatas de interoperabilidade governamental.

A terceira categoria engloba documentação sobre o contexto brasileiro, incluindo diagnósticos da transformação digital na Administração Pública Federal, documentos como a Estratégia Federal de Governo Digital, relatórios sobre iniciativas existentes, e análises acadêmicas sobre os desafios de integração digital no Brasil. Esta triangulação documental permitirá construir uma compreensão multifacetada e contextualizada do fenômeno investigado.

2.4 Protocolo de Análise Documental

O desenvolvimento da pesquisa seguirá um protocolo estruturado em cinco fases complementares, adaptado especificamente para maximizar o potencial da análise documental como método principal de investigação, conforme ilustrado na Figura 1.

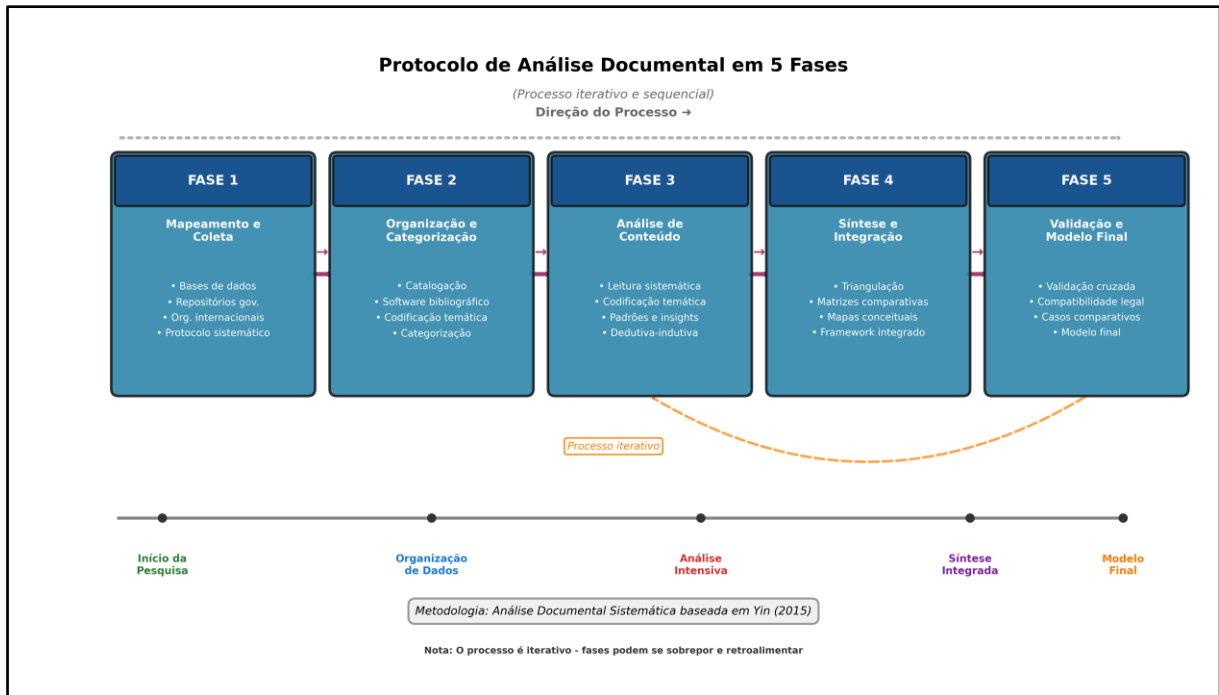


Figura 1 – Protocolo de Análise Documental em 5 Fases
Fonte: Elaboração própria baseada em (Yin, 2015)

A primeira fase dedicar-se-á ao mapeamento e coleta sistemática de documentos relevantes. Serão utilizadas bases de dados acadêmicas (Web of Science, Scopus, Google Scholar), repositórios governamentais (e-Estonia, Portal GOV.BR), sites de organizações internacionais (OCDE, Banco Mundial, BID) e bibliotecas digitais especializadas.

A busca seguirá protocolo sistemático com termos-chave em português e inglês, critérios de inclusão e exclusão claramente definidos, e registro detalhado de todas as fontes consultadas.

Na segunda fase, realizar-se-á a organização e categorização do corpus documental. Cada documento será catalogado segundo sua natureza (técnico, acadêmico, governamental), origem (estoniana, brasileira, internacional), período de produção e temática principal. Será utilizado software de gerenciamento bibliográfico para organização das referências e software de análise qualitativa para codificação e categorização dos documentos.

A terceira fase concentrar-se-á na análise de conteúdo propriamente dita. Através de leitura sistemática e codificação temática, serão identificados padrões, temas recorrentes e insights relevantes. A análise seguirá uma abordagem dedutivo-indutiva, partindo de categorias teóricas pré-definidas, mas permitindo a emergência de novas categorias a partir dos dados. Especial atenção será dedicada à identificação de fatores de sucesso documentados, barreiras relatadas, lições aprendidas e recomendações registradas nos diversos documentos.

Na quarta fase, proceder-se-á à síntese e integração dos achados. Os *insights* extraídos dos diferentes documentos serão triangulados e integrados para construir uma compreensão holística do *X-Road* e da IND, bem como suas possibilidades de aprendizado mútuo e adaptação ao contexto brasileiro. Serão elaboradas matrizes comparativas e mapas conceituais que sintetizem o conhecimento acumulado. Esta síntese fundamentará o desenvolvimento do modelo de convergência proposto, assegurando que cada elemento do modelo esteja ancorado em evidências documentais sólidas.

A fase final dedicar-se-á à validação documental cruzada e elaboração do modelo final. A proposta será confrontada com documentos normativos brasileiros, verificando compatibilidade legal e regulatória. Serão examinados casos documentados de tentativas similares de integração digital em outros países, identificando fatores de sucesso e fracasso que podem informar a adaptação brasileira. O modelo resultante será apresentado com referências explícitas às fontes documentais que sustentam cada componente e recomendação.

2.5 Dimensões Analíticas e Estratégias de Validação

A análise documental será estruturada em quatro dimensões principais, cada uma examinada através de fontes documentais específicas, conforme sistematizado na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões Analíticas e Fontes Documentais da Pesquisa

Dimensão	Aspectos Analisados	Fontes Documentais	Estratégias de Validação
Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões de interoperabilidade • Conceitos e cases de Infraestrutura Digital • Aspectos de Segurança da Informação • Arquitetura de sistemas • Protocolos de comunicação • Infraestrutura técnica 	<ul style="list-style-type: none"> • Especificações técnicas X-Road • Documentação NIIS • Normas e padrões (ISO, W3C) • Análise do Decreto 12.198/2024 	<ul style="list-style-type: none"> • Triangulação de especificações técnicas • Comparação com padrões internacionais • Análise de documentação evolutiva
Organizacional	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de governança • Estruturas institucionais • Cultura organizacional • Processos de mudança • Capacitação de equipes 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos sobre mudança organizacional • Documentos de boas práticas • Normas e Padrões 	<ul style="list-style-type: none"> • Triangulação de fontes governamentais e acadêmicas • Análise temporal de mudanças
Institucional	<ul style="list-style-type: none"> • Marcos legais e regulatórios • Acordos interinstitucionais 	<ul style="list-style-type: none"> • Leis e decretos (Estônia e Brasil) • X-Road Act (2002) • Decreto 12.198/2024 	<ul style="list-style-type: none"> • Análise comparativa de marcos legais • Verificação de compatibilidade

Dimensão	Aspectos Analisados	Fontes Documentais	Estratégias de Validação
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compliance</i> e conformidade • Políticas públicas • Mecanismos de coordenação 	<ul style="list-style-type: none"> • Análises jurídicas comparativas 	normativa <ul style="list-style-type: none"> • Consulta a documentos oficiais
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusão digital • Impactos socioeconômicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Análises sobre transformação digital • Dados de plataformas (GOV.BR, e-Estonia) 	<ul style="list-style-type: none"> • Triangulação de dados quantitativos e qualitativos • Comparação de múltiplas pesquisas • Análise de tendências temporais

Fonte: Elaboração própria baseada em (Yin, 2015) e adaptação do framework UCL (2026).

A dimensão tecnológica será investigada através de documentação técnica, especificações de arquitetura, padrões publicados e análises técnicas especializadas.

A dimensão organizacional será explorada através de relatórios de governança, estudos sobre mudança organizacional, documentos de boas práticas e casos documentados de transformação institucional.

A dimensão institucional será analisada através de marcos legais e regulatórios, documentos de política pública, acordos de cooperação interinstitucional e análises jurídicas comparativas.

A dimensão social será examinada através de estudos de impacto, pesquisas de satisfação documentadas, relatórios de adoção e uso, e análises acadêmicas sobre transformação digital e sociedade.

Para assegurar o rigor metodológico, serão adotadas múltiplas estratégias de validação. A triangulação de fontes garantirá que achados importantes sejam corroborados por múltiplos documentos independentes. A análise temporal verificará a consistência de informações ao longo do tempo, identificando evoluções e mudanças no modelo. A comparação entre documentos oficiais e análises independentes permitirá identificar possíveis vieses ou lacunas na documentação oficial.

2.6 Limitações e Estratégias de Mitigação

O estudo reconhece as limitações inerentes à dependência exclusiva de fontes documentais. A ausência de dados primários pode limitar a compreensão de aspectos tácitos ou não documentados do funcionamento do *X-Road*. Para mitigar esta limitação, será priorizada a análise de documentos que incluam relatos detalhados de implementação, estudos etnográficos publicados e análises que capturem dimensões qualitativas da experiência estoniana.

A possível desatualização de alguns documentos será endereçada através da priorização de fontes recentes e da análise explícita da evolução temporal do sistema. Eventuais vieses na documentação oficial serão contrabalanceados através da inclusão de análises críticas, avaliações independentes e estudos acadêmicos que ofereçam perspectivas alternativas.

Esta abordagem metodológica, centrada na análise documental sistemática e rigorosa, permitirá construir uma compreensão robusta e fundamentada de como a convergência entre governança do conhecimento e governança de dados pode transformar a administração pública brasileira, superando os silos digitais através de um modelo inspirado no sucesso documentado do *X-Road* estoniano e nos desafios e oportunidades da IND, mas cuidadosamente adaptado às especificidades e desafios do contexto nacional.

3. O SISTEMA X-ROAD: ESTRUTURA, FUNCIONAMENTO E RELEVÂNCIA COMO MODELO DPI

A escolha do modelo X-Road¹ estoniano como caso paradigmático é corroborada por análise global de implementações DPI² em 12 países, que posiciona a Estônia como segunda mais madura infraestrutura pública digital mundial (score 90/100), superada apenas pela Índia (95/100) e seguida por Singapura (85/100). Comparativamente, o Brasil apresenta score de maturidade DPI de 55/100 e impacto socioeconômico de 50/100, evidenciando gap de 35 pontos em ambas as dimensões que justifica análise aprofundada do caso estoniano como referência para evolução da Infraestrutura Nacional de Dados brasileira.

3.1 Contextualização Histórica e Motivações: Da Reconstrução Estatal à Liderança Digital

A compreensão adequada do sistema X-Road e de sua relevância como modelo de infraestrutura pública digital requer inicialmente a contextualização do momento histórico singular em que foi concebido. A Estônia recuperou sua independência em agosto de 1991, após meio século de ocupação soviética que havia deixado o país com infraestrutura administrativa obsoleta, sistemas burocráticos herdados do modelo soviético, e necessidade urgente de reconstrução institucional completa. Diferentemente de nações que evoluíram gradualmente seus sistemas administrativos ao longo de décadas ou séculos, a Estônia enfrentou oportunidade rara na história contemporânea: construir infraestrutura estatal inteiramente nova, sem compromissos com legados tecnológicos ou organizacionais do passado.

Este contexto de "tabula rasa" institucional, embora nascido de circunstâncias traumáticas, criou condições únicas para inovação administrativa. Como observa Kattel; Mergel, 2019), a necessidade de construir capacidades estatais modernas com recursos financeiros extremamente limitados – a economia estoniana nos anos 1990 era uma fração do PIB per capita europeu médio – forçou líderes governamentais a fazerem escolhas estratégicas ousadas sobre onde concentrar investimentos escassos. A decisão de priorizar infraestrutura digital como fundamento da reconstrução estatal, ao invés de seguir modelos tradicionais de

-
- 1 X-Road (pronuncia-se "cross-road") é a plataforma de interoperabilidade estoniana. O termo combina "X" (representando cruzamento/intersecção) com "Road" (estrada/caminho), simbolizando "encruzilhada digital" onde diferentes sistemas se encontram e trocam dados.
 - 2 Digital Public Infrastructure (DPI) refere-se a sistemas digitais essenciais que servem de base para prestação de serviços públicos e privados em larga escala, incluindo sistemas de identidade digital, pagamentos e intercâmbio de dados.

desenvolvimento administrativo, representou aposta calculada de que tecnologias emergentes da informação poderiam permitir que pequena nação de 1,3 milhão de habitantes construísse capacidades governamentais comparáveis às de países muito maiores e mais ricos, mas com fração dos custos.

A visão estratégica que orientou esta aposta fundamentava-se em três reconhecimentos fundamentais. Primeiro, que a escala populacional e territorial limitada da Estônia – 45.227 km² e população menor que muitas cidades médias europeias – tornava viável experimentações administrativas que seriam impraticáveis em contextos maiores, permitindo iterações rápidas e correções de curso quando necessário. Segundo, que a ausência de sistemas legados burocráticos enraizados, embora dolorosa no curto prazo, eliminava resistências institucionais que frequentemente sabotam transformações digitais em administrações públicas estabelecidas. Terceiro, que investimentos em infraestrutura digital compartilhada – ao invés de sistemas verticais duplicados em cada ministério – maximizariam impacto de recursos limitados através de economias de escala e efeitos de rede.

Os primeiros projetos de digitalização governamental na Estônia emergiram já em meados da década de 1990, antes mesmo da conceptualização do X-Road. O projeto e-Tax, lançado em 1999, permitiu que cidadãos declarassem impostos eletronicamente, reduzindo drasticamente custos administrativos tanto para contribuintes quanto para o estado. O projeto e-School, iniciado em 2002, criou sistema nacional integrado para gestão educacional. O projeto e-Health começou a construir registros médicos eletrônicos nacionais. Cada um destes sistemas verticais demonstrou potencial transformador da digitalização, mas também revelou problema emergente: na ausência de camada de interoperabilidade, cada novo serviço digital requeria desenvolvimento de integrações customizadas com múltiplos sistemas existentes, criando complexidade exponencial e custos crescentes de manutenção.

Foi precisamente este reconhecimento – de que sucesso de serviços digitais individuais criava paradoxalmente desafio de fragmentação – que motivou a concepção do X-Road. Em vez de continuar desenvolvendo sistemas verticais isolados, arquitetos da transformação digital estoniana perceberam necessidade de camada horizontal de interoperabilidade que permitisse que todos os sistemas, presentes e futuros, comunicassem-se de forma padronizada e segura. Como documenta o *Nordic Institute for Interoperability Solutions*, o X-Road nasceu da compreensão de que "interoperabilidade não é luxo técnico, mas requisito fundamental para viabilidade econômica e sustentabilidade de longo prazo de qualquer ecossistema de serviços digitais governamentais" (NIIS, 2021).

A decisão de desenvolver solução própria de interoperabilidade, ao invés de adotar tecnologias comerciais existentes, decorreu de considerações tanto técnicas quanto estratégicas. Tecnicamente, soluções de mercado disponíveis no início dos anos 2000 focavam primordialmente em integração corporativa dentro de organizações individuais, não em intercâmbio seguro de dados entre múltiplas organizações autônomas com requisitos regulatórios complexos. Estrategicamente, líderes estonianos reconheceram que infraestrutura de interoperabilidade constituía ativo estratégico nacional cuja soberania tecnológica deveria ser preservada, evitando dependência de fornecedores externos que poderiam descontinuar produtos ou alterar modelos comerciais de formas prejudiciais ao interesse público (Nortal, 2024).

3.2 Origens e Influências Arquiteturais do X-Road

O X-Road não surgiu do vazio, mas sintetizou e adaptou conceitos técnicos e organizacionais de iniciativas anteriores de *e-government* e interoperabilidade: Influência Nórdica: Sistemas de Registro Populacional A tradição nórdica de registros populacionais centralizados (Suécia desde 1947, Finlândia desde 1969, Dinamarca desde 1968) forneceu modelo conceitual de identificação única persistente que permite vincular informações de um cidadão através do tempo e entre instituições (Kalvet, 2012). Estônia adaptou este conceito criando *Personal Identification Code* (isikukood) que serve como chave unificadora em todos os sistemas governamentais — similar ao CPF brasileiro, mas com maior amplitude de uso. Inspiração em Arquiteturas de Middleware Corporativas Tecnicamente, *X-Road* assemelha-se a *Enterprise Service Bus* (ESB) da computação corporativa dos anos 1990 — camada intermediária que permite diferentes sistemas conversarem sem integrações ponto-a-ponto (Anthes, 2015). Arquitetos do X-Road (especialmente Linnar Viik e Taavi KOTKA) inspiraram-se em produtos comerciais como IBM MQ Series e TIBCO, mas criaram versão especializada para requisitos governamentais: auditabilidade radical, identidade digital integrada, conformidade legal automática.

Lições de Fracassos de Projetos Europeus Centralizados Observação de fracassos de iniciativas europeias de interoperabilidade excessivamente centralizadas (como tentativas de criar “bases de dados europeias únicas”) levou arquitetos estonianos a adotarem princípio de descentralização (Margetts; Dunleavy, 2013). Decisão consciente de manter dados distribuídos sob custódia das instituições originárias, ao invés de centralizá-los, foi reação a críticas sobre privacidade e custos de projetos centralizados fracassados.

Influência de Movimentos Open Source e Padrões Abertos Filosofia do X-Road de usar protocolos abertos (XML, SOAP, posteriormente REST) e eventualmente liberar código como open source (2016) foi influenciada por movimentos de software livre e experiências de governos como Reino Unido (Government Digital Service, estabelecida em 2011) que promoviam “open standards, open source, open data” (Parsons et al., 2017). Aprendizados de Sistemas Financeiros Interbancários Mecanismos de segurança do X-Road (criptografia ponta-a-ponta, timestamping, não repúdio) foram inspirados em redes interbancárias como SWIFT (Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication) que desde os anos 1970 operavam comunicações seguras entre instituições com interesses potencialmente conflitantes (Anthes, 2015). Conceito de “security server” em cada nó é análogo a “correspondent banks” em redes financeiras.

Diferencial Estoniano: Síntese Inovadora Embora influenciado por modelos anteriores, X-Road inovou ao:

- Combinar identidade digital pessoal com infraestrutura de interoperabilidade (conceitos antes separados).
- Impor auditabilidade radical (logs imutáveis) desde o design inicial, não como adição posterior - Criar governança que obriga setor público E permite participação voluntária do setor privado (modelo híbrido incomum).
- Tornar-se open source e estabelecer governança internacional (NIIS)³ para permitir adoção por outros países.

Segundo (Kalvet; Katell, 2006), genialidade estoniana foi menos inovação técnica radical e mais síntese pragmática de práticas consolidadas internacionalmente, adaptadas a contexto específico de país pequeno, pós-soviético, com urgência de modernizar Estado rapidamente e poucos recursos para soluções proprietárias caras.

3.3 Linha do Tempo da Implementação (1997-2024)

³ Nordic Institute for Interoperability Solutions (NIIS) é organização internacional sem fins lucrativos fundada em 2017 por Estônia e Finlândia para governar o desenvolvimento do X-Road como projeto *open-source*. Esta trajetória de 27 anos evidencia evolução incremental de sistema nacional para plataforma global de infraestrutura digital pública, com cada fase construindo sobre aprendizados da anterior e expandindo escopo sem comprometer estabilidade operacional.

A trajetória de desenvolvimento do X-Road pode ser periodizada em cinco fases distintas, cada uma com marcos tecnológicos e institucionais específicos:

FASE 1: Concepção e Protótipo (1997-2001):

1997: Publicação do documento “Princípios da Política de Informação do Estado Estoniano”, estabelecendo visão de e-government integrado.

1998: Lançamento do projeto piloto “X-tee” (nome estoniano original), desenvolvido pelo Centro de Informática da Estônia.

2000: Primeiras conexões testem entre 3 registros governamentais (População, Impostos, Saúde).

2001: Lançamento oficial do X-Road com 30 serviços conectados e implementação do primeiro *Security Server*.

FASE 2: Consolidação Nacional (2002-2008):

2002: Aprovação da “X-Road Act” (Lei do X-Road) tornando uso obrigatório para órgãos públicos - 2003: 100 instituições conectadas; lançamento do e-Tax (declaração de impostos online via X-Road).

2005: 500 serviços disponíveis; integração com sistema de saúde nacional.

2007: Ataque cibernético em larga escala à Estônia (primeira guerra cibernética da história) testa resiliência do X-Road — sistema mantém-se operacional.

2008: 900 instituições conectadas; 99% dos serviços públicos disponíveis digitalmente.

FASE 3: Maturação e Expansão Regional (2009-2016):

2010: Finlândia adota X-Road; primeira implementação internacional.

2012: 1.200 instituições conectadas; processando 500 milhões de transações anuais.

2014: Lançamento da versão X-Road 6 com arquitetura modular aprimorada.

2015: Assinatura do memorando Estônia-Finlândia para X-Road transnacional.

2016: Criação do projeto *X-Road Open Source*; código disponibilizado publicamente no *GitHub*.

FASE 4: Internacionalização (2017-2020):

2017: Fundação do *Nordic Institute for Interoperability Solutions* (NIIS) por Estônia e Finlândia como organização sem fins lucrativos para governança internacional do X-Road.

2018: Islândia junta-se ao NIIS; implementações piloto na Namíbia e Azerbaijão.

2019: Faroe Islands implementa X-Road; comunidade global atinge 40 países interessados.

2020: 2.000+ instituições conectadas na Estônia; 1+ bilhão de transações anuais.

FASE 5: Consolidação Global e Nova Geração (2021-2024):

2021: Ucrânia inicia implementação do X-Road (projeto Trembita).

2022: Expansão para América Latina (implementações piloto no Brasil - Mato Grosso e Piauí).

2023: Lançamento do X-Road 7 com melhorias em *REST API*, *cloud-native architecture* e conformidade com GDPR.

2024: Mais de 60 países em diferentes estágios de adoção; X-Road processa 3+ bilhões de transações anuais globalmente.



Figura 2 – Linha do Tempo: Trajetória de Desenvolvimento do X-Road (1997-2024)

Fonte: Elaboração própria baseada em (E-Estonia, 2024) (2024), NIIS (2021) e X-ROAD GLOBAL (2024).

Esta trajetória de 27 anos evidencia evolução incremental de sistema nacional para plataforma global de infraestrutura digital pública, com cada fase construindo sobre aprendizados da anterior e expandindo escopo sem comprometer estabilidade operacional.

Tabela 3 – Fases de Implementação do Sistema X-Road (1997-2024)

Fase	Período	Foco Principal	Marcos de Destaque
1. Concepção	1997–2001	Nascimento e Protótipo	Lançamento oficial (2001) com 30 serviços e o primeiro <i>Security Server</i> .
2. Consolidação	2002–2008	Obrigatoriedade Nacional	Resiliência provada após o ciberataque de 2007; 99% dos serviços digitais.
3. Maturação	2009–2016	Expansão e Open Source	Adoção pela Finlândia e abertura do código no GitHub (2016).
4. Internacional	2017–2020	Governança Global	Criação do NIIS e expansão para Namíbia, Islândia e Azerbaijão.
5. Nova Geração	2021–2024	Cloud-Native e Escala	X-Road 7; entrada na América Latina (Brasil) e 3+ bilhões de transações.

Fonte: Elaboração própria baseada em (E-Estonia, 2024) (2024) e NIIS (2021).

3.4 Gênese e Evolução do X-Road: De Projeto Nacional a Padrão Global

O sistema X-Road – originalmente denominado "X-tee" em língua estoniana – foi oficialmente lançado em 2001, resultado de esforços coordenados entre a Agência de Sistemas de Informação da Estônia (RIA - Riigi Infosüsteemi Amet) e parceiros tecnológicos do setor privado estoniano. A primeira versão do sistema focou em resolver desafio específico, mas crítico: permitir que sistema de impostos eletrônicos (e-Tax) acessasse dados do registro populacional nacional sem necessitar duplicar estas informações em suas próprias bases de dados. Esta funcionalidade aparentemente simples – consultar dados mantidos por outra organização através de interface segura e padronizada – estabeleceu princípio arquitetural fundamental que definiria toda evolução subsequente do X-Road: dados deveriam ser mantidos em sua fonte original, acessados quando necessário, nunca duplicados desnecessariamente.

A primeira década de operação do X-Road (2001-2010) caracterizou-se por expansão gradual, mas consistente do número de organizações conectadas e de serviços disponibilizados. Inicialmente restrito a poucos órgãos centrais do governo federal, o sistema expandiu progressivamente para incluir ministérios adicionais, agências regulatórias, governos locais e, significativamente, organizações do setor privado. Esta última dimensão – abertura do X-Road para participação privada – revelou-se decisão estratégica crucial que diferenciou o modelo estoniano de muitas outras iniciativas de interoperabilidade governamental que

permaneceram restritas ao setor público. Ao permitir que bancos, seguradoras, provedores de telecomunicações e outras empresas conectassem-se ao X-Road, a Estônia criou ecossistema digital integrado onde serviços públicos e privados podiam combinar-se fluidamente, oferecendo experiências de usuário superiores e desbloqueando inovações de modelo de negócio previamente impossíveis.

A arquitetura técnica do X-Road evoluiu significativamente ao longo de suas duas décadas de operação, refletindo tanto amadurecimento tecnológico quanto aprendizados operacionais. A versão 4 do sistema, lançada em 2009, introduziu melhorias substanciais em escalabilidade e performance, além de refinamentos nos protocolos de segurança baseados em experiências do ciberataque massivo que a Estônia sofreu em 2007 – evento que testou resiliência da infraestrutura digital nacional e validou princípios de design descentralizado que impediram que atacantes derrubassem completamente os sistemas governamentais. A versão 6, lançada em 2015, representou reescrita arquitetural mais profunda, modernizando base de código para incorporar padrões contemporâneos de desenvolvimento de software e preparar sistema para escalabilidade internacional (X-Road Global, 2024).

Um marco fundamental na evolução do X-Road ocorreu em 2013, quando primeiros-ministros da Estônia e Finlândia assinaram Memorando de Entendimento para colaborar no "desenvolvimento e manutenção de ambiente de software que habilite conectividade segura, buscas e transferências de dados entre diversos bancos de dados governamentais e privados" entre os dois países. Esta decisão bilateral teve múltiplas motivações estratégicas. Economicamente, Estônia e Finlândia possuem economias profundamente integradas, com milhares de cidadãos commuting diariamente através do Golfo da Finlândia e empresas operando em ambos mercados simultaneamente. Administrativamente, esta integração econômica criava demandas crescentes por serviços públicos que transcendessem fronteiras nacionais – trabalhadores estonianos na Finlândia precisavam acessar serviços de saúde; empresas finlandesas operando na Estônia precisavam cumprir requisitos regulatórios; famílias binacionais necessitavam de documentos reconhecidos em ambas as jurisdições.

A implementação prática desta visão materializou-se em 2015, quando Finlândia oficialmente adotou o X-Road como sua própria camada nacional de interoperabilidade, denominando-a "Suomi.fi Palveluväylä" (Camada de Serviços Finlandesa). Esta adoção não foi mera replicação: arquitetos finlandeses adaptaram configurações e políticas às especificidades regulatórias e institucionais de seu país, demonstrando flexibilidade do modelo X-Road através de sua característica de alta configurabilidade sem necessidade de modificar código-fonte

central. Em 2017, os dois países formalizaram ainda mais sua cooperação através da criação do *Nordic Institute for Interoperability Solutions* (NIIS), organização internacional sem fins lucrativos estabelecida para governar o desenvolvimento continuado do X-Road como projeto open-source compartilhado.

A transformação do X-Road de projeto nacional estoniano em solução global acelerou-se significativamente após sua disponibilização como software open-source sob licença MIT em 2017. Esta decisão de tornar o código completamente aberto e gratuito – ao invés de comercializá-lo como produto de exportação – refletiu filosofia deliberada de que infraestruturas públicas digitais deveriam ser tratadas como bens públicos globais, análogos a padrões técnicos como HTTP ou TCP/IP que fundamentam a internet. Como argumenta o próprio NIIS, "DPI eficaz não pode ser propriedade exclusiva de nenhuma nação, mas deve estar disponível para todas as nações adaptarem e melhorarem segundo suas necessidades específicas" (NIIS, 2021).

O impacto desta abertura manifestou-se rapidamente: até 2025, mais de 25 países e territórios em quatro continentes haviam adotado e adaptado o X-Road às suas realidades locais. Na Europa, além de Finlândia, Islândia implementou o sistema denominado "Straumurinn" e as Ilhas Faroe desenvolveram "Heldin", ambos tornando-se membros do NIIS e contribuindo para desenvolvimento compartilhado da tecnologia. Fora da Europa, a difusão foi ainda mais notável. Na América Latina, Brasil (X-Via), México, Argentina, Colômbia e El Salvador implementaram o sistema em contextos federativos complexos. Na Ásia, Camboja desenvolveu "CamDX" como solução nacional de intercâmbio de dados, enquanto Japão e Vietnã conduziram pilotos setoriais. Na África, Namíbia iniciou implementação voltada para serviços de identificação digital (X-Road Global, 2024); (Future Shift Labs, 2024).

Particularmente relevante para o contexto brasileiro é a experiência documentada do estado de Mato Grosso, que se tornou early adopter do X-Road (denominado localmente X-Via) em 2019. Um estudo de caso de 2024 documenta que o governo de Mato Grosso emitiu decreto estabelecendo X-Via como solução oficial de interoperabilidade para todo o estado, fornecendo "endosso legal completo que proveu fundação para desenvolvimento e integração posteriores, permitindo ao estado escalar uso do X-Road para além de departamentos governamentais internos". O Departamento de Justiça do estado expressou interesse em utilizar dados disponibilizados através do X-Road para "agilizar notificações cidadãs e aprimorar processos legais", demonstrando como interoperabilidade pode gerar valor em domínios aparentemente distantes de aplicações administrativas tradicionais (X-Road Global, 2024).

A evolução tecnológica mais recente do X-Road manifesta-se no desenvolvimento da versão 8, codinome "Spaceship", prevista para lançamento em 2026. Esta versão representa salto arquitetural significativo, transformando o X-Road de camada de interoperabilidade governamental tradicional em tecnologia compatível com "data spaces" – conceito emergente de ecossistemas de compartilhamento de dados que transcendem fronteiras organizacionais e setoriais. A versão 8 será totalmente containerizada (utilizando tecnologias Docker/Kubernetes), moverá configurações do filesystem para banco de dados facilitando backup e restauração, e incorporará protocolos de data spaces como *Data Space Protocol* (DSP) e *Decentralised Claims Protocol* (DCP), mantendo simultaneamente compatibilidade retroativa com versões anteriores (NIIS, 2025).

Esta trajetória de 24 anos – de projeto nacional experimental a padrão global de facto para interoperabilidade governamental – valida empiricamente tanto a robustez técnica quanto a relevância conceitual do modelo X-Road. Mais significativamente para os propósitos desta dissertação, demonstra que princípios de design e governança subjacentes ao sistema possuem aplicabilidade que transcende contexto estoniano original, podendo ser adaptados criativamente a realidades institucionais, econômicas e culturais profundamente diferentes.

3.5 Arquitetura Técnica e Princípios de Design: Descentralização como Fundamento

A arquitetura técnica do X-Road distingue-se fundamentalmente de modelos tradicionais de integração de sistemas governamentais através de princípio de descentralização radical que permeia todas as camadas do sistema. Diferentemente de abordagens centralizadas que criam repositórios únicos onde dados de múltiplas organizações são consolidados, ou de barramentos corporativos (Enterprise Service Bus - ESB) que roteiam todas as comunicações através de hub central, o X-Road implementa modelo federado onde dados permanecem em suas fontes originais e transações fluem diretamente entre produtor e consumidor, sem intermediação central obrigatória.

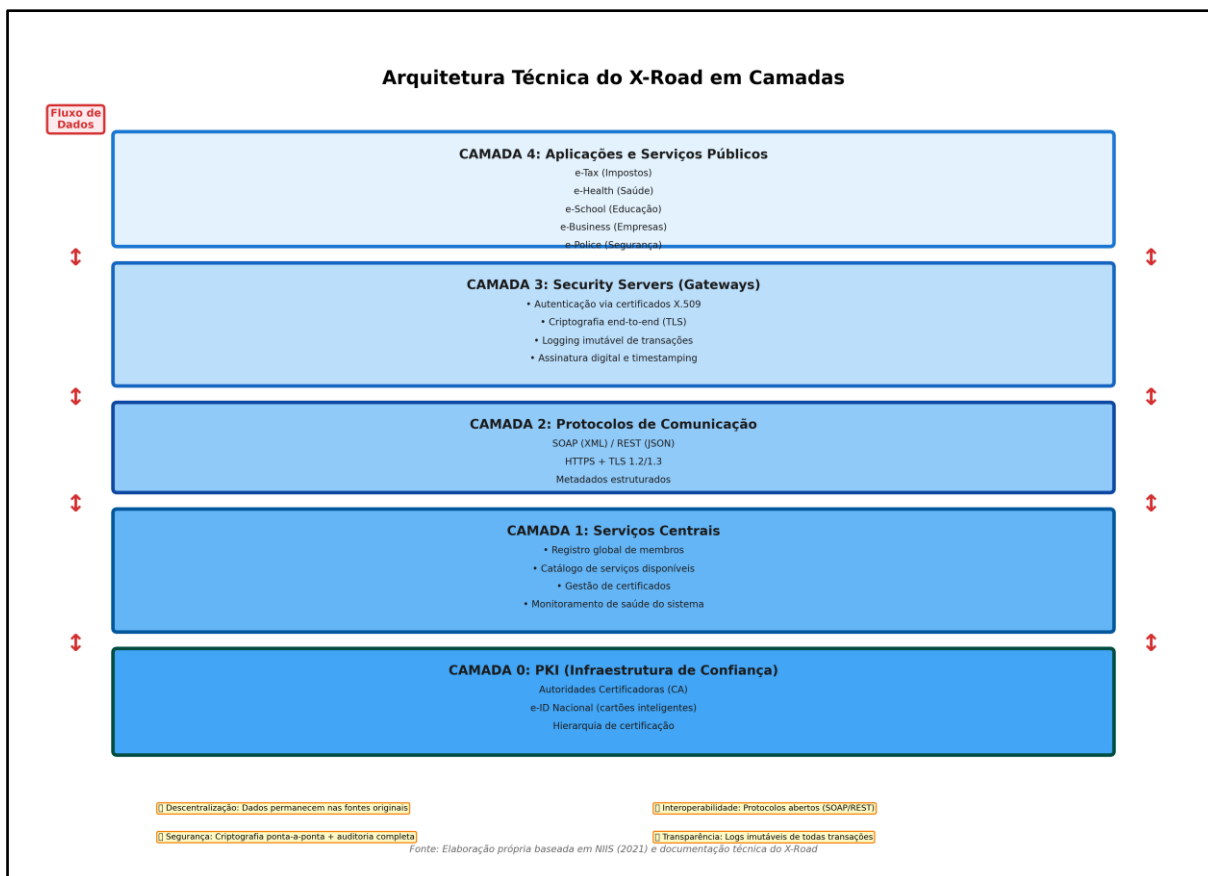


Figura 3 – Arquitetura Técnica do X-Road em Camadas

Fonte: Elaboração própria baseada em (NIIS, 2021) e documentação técnica do X-Road.

Esta escolha arquitetural fundamenta-se em múltiplas considerações técnicas e institucionais. Tecnicamente, eliminação de ponto único de falha torna sistema intrinsecamente mais resiliente: comprometimento ou indisponibilidade de qualquer componente individual afeta apenas transações específicas que dependem daquele componente, não paralisando ecossistema inteiro. Durante ciberataques massivos que Estônia sofreu em 2007, quando botnets distribuídas inundaram servidores governamentais com tráfego malicioso, arquitetura descentralizada do X-Road permitiu que serviços críticos continuassem operando mesmo quando alguns componentes estavam sob ataque, demonstrando resiliência prática do modelo (Nortal, 2024).

Institucionalmente, arquitetura descentralizada respeita autonomia e soberania de dados das organizações participantes. Cada instituição – seja ministério, agência regulatória, governo municipal ou empresa privada – mantém controle completo sobre seus próprios dados, decidindo quais informações disponibilizar através do X-Road, para quem, sob quais condições e por quanto tempo. Esta preservação de autonomia institucional é crítica tanto para viabilidade política – organizações relutariam em conectar-se a sistema que exigisse transferência de controle sobre seus ativos informacionais – quanto para conformidade regulatória,

especialmente sob regimes como GDPR na União Europeia que estabelecem responsabilidades claras de controladores de dados.

Os componentes técnicos fundamentais do X-Road organizam-se em quatro camadas conceituais. Na camada mais externa, servidores de segurança (security servers)⁴ funcionam como gateways através dos quais cada organização conecta-se ao ecossistema X-Road. Cada participante opera seu próprio security server – fisicamente sob seu controle, em suas próprias instalações ou nuvem privada – eliminando dependência de infraestrutura compartilhada que poderia tornar-se gargalo ou ponto de vulnerabilidade. Estes security servers implementam múltiplas funções críticas: autenticação de requisições usando certificados digitais X.509 emitidos por autoridades certificadoras confiáveis; criptografia de todas as comunicações através de canais TLS (Transport Layer Security); assinatura digital e timestamping de todas as transações para garantir não-repúdio e auditabilidade; logging abrangente de todas as requisições e respostas para fins de monitoramento e *compliance*.

Na camada de troca de mensagens, X-Road utiliza protocolos padronizados da web – primordialmente SOAP (Simple Object Access Protocol) nas versões anteriores e REST (Representational State Transfer) na versão 6 e posteriores – assegurando que organizações não necessitem implementar protocolos proprietários ou complexos para participar do ecossistema. Mensagens trocadas através do X-Road seguem esquemas XML ou JSON rigorosamente definidos, permitindo validação automática de conformidade e facilitando debugging quando problemas ocorrem. Metadados detalhados acompanham cada mensagem, especificando identidade do requisitante, propósito da consulta, timestamp preciso, e autorização sob qual foi executada, criando trilha de auditoria completa e imutável.

A camada de serviços centrais (central services), embora conceptualmente "central" no nome, desempenha papel de coordenação mínima ao invés de intermediação obrigatória. O servidor central mantém registro global de todos os membros do ecossistema X-Road – suas identidades digitais, certificados públicos, endereços de seus security servers – funcionando essencialmente como "catálogo telefônico" que permite que participantes descubram uns aos outros. Importante notar que este servidor central não participa da troca efetiva de dados: uma vez que organização A descobre como conectar-se à organização B através de consulta ao registro central, todas as comunicações subsequentes ocorrem diretamente entre os security servers de A e B, sem passar pelo centro. Esta arquitetura preserva privacidade – servidor central não tem visibilidade sobre conteúdo de transações – e

4 *Security Server* é o componente técnico do X-Road instalado em cada organização participante. Funciona como gateway seguro que autentica, criptografa e registra todas as transações de dados.

escalabilidade – volume de tráfego de dados não sobrecarrega infraestrutura central pois não flui através dela.

A quarta camada, frequentemente invisível, mas absolutamente crítica, consiste na infraestrutura de confiança baseada em *Public Key Infrastructure* (PKI)⁵. X-Road fundamenta-se em criptografia assimétrica onde cada participante possui par de chaves (pública/privada), com chaves públicas certificadas por autoridades confiáveis através de hierarquia de certificação. Na Estônia, esta infraestrutura existia previamente através do sistema nacional de ID cards eletrônicos, permitindo que X-Road aproveitasse capacidades já estabelecidas. Em outros contextos de adoção internacional, construção ou adaptação de PKI adequada constitui frequentemente um dos desafios de implementação mais significativos, exigindo coordenação entre múltiplas organizações e estabelecimento de políticas de certificação mutuamente reconhecidas.

Princípios de design que guiaram desenvolvimento do X-Road transcendem escolhas tecnológicas específicas para refletir filosofia arquitetural coerente. O princípio de interoperabilidade por design estabelece que sistemas não necessitam ser modificados para conectar-se ao X-Road – basta que exponham serviços através de protocolos web padrão e comuniquem-se através de security server intermediário que abstrai complexidades de segurança e logging. O princípio de escalabilidade horizontal assegura que sistema pode crescer indefinidamente adicionando participantes e serviços sem degradação de performance, pois arquitetura evita gargalos centralizados. O princípio de tecnologia neutra garante que organizações podem implementar seus sistemas backend em qualquer linguagem de programação ou plataforma tecnológica – Java, .NET, Python, PHP – desde que exponham interfaces compatíveis com padrões web (NIIS, 2021; IEEE, 2020).

Particularmente relevante para discussão de transferibilidade para contexto brasileiro, X-Road implementa princípio de configurabilidade sem bifurcação (*configurability without forking*). Diferentemente de muitos projetos open-source onde diferentes adotantes criam versões modificadas (*forks*) do código para atender necessidades locais – processo que fragmenta comunidade e torna manutenção insustentável – X-Road projeta-se para ser altamente configurável mantendo base de código única. Países diferentes podem implementar políticas de segurança distintas, utilizar autoridades certificadoras diferentes, estabelecer regras de governança variadas, tudo através de parâmetros de configuração ao invés de modificações de código. Esta característica é crucial para sustentabilidade de longo prazo: quando NIIS

5 *Public Key Infrastructure* (PKI) é conjunto de políticas, procedimentos e tecnologias para criação, gestão e distribuição de certificados digitais que garantem autenticidade e criptografia.

publica nova versão com melhorias de segurança ou funcionalidades adicionais, todos os adotantes globais podem atualizar-se sem perder customizações locais, fenômeno impossível em ecossistemas fragmentados por *forks* (Interoperable Europe Portal, 2021).

3.6 Governança e Modelo Institucional: Coordenação sem Coerção

A arquitetura técnica descentralizada do X-Road é complementada e viabilizada por modelo de governança que equilibra coordenação central mínima necessária com autonomia máxima dos participantes, implementando o que pode ser caracterizado como "federalismo digital". Este modelo de governança opera em múltiplos níveis interdependentes: governança do software open-source, governança de cada instância nacional ou regional do X-Road, e governança das relações bilaterais de compartilhamento de dados entre organizações participantes.

No nível de governança do software, o *Nordic Institute for Interoperability Solutions* (NIIS) atua como "steward" institucional do projeto X-Road desde 2017. O NIIS foi estabelecido como organização internacional sem fins lucrativos através de tratado entre Estônia e Finlândia, posteriormente aberto para adesão de outros países. Sua estrutura organizacional combina elementos de consórcio intergovernamental com práticas de governança de projetos open-source bem-sucedidos. O conselho diretor do NIIS inclui representantes dos países membros que contribuem financeiramente para desenvolvimento do software, assegurando que decisões estratégicas sobre roadmap tecnológico reflitam necessidades agregadas da comunidade global de usuários ao invés de prioridades de uma nação individual.

A missão do NIIS é tripla: desenvolver e manter o código-fonte core do X-Road, incorporando contribuições da comunidade e implementando melhorias identificadas através de uso operacional em diferentes contextos; publicar releases regulares e versões de segurança, seguindo ciclo de desenvolvimento previsível que permite que operadores nacionais planejem atualizações adequadamente; e prover suporte técnico e capacitação para novos adotantes, reduzindo barreiras de entrada especialmente para países com capacidades técnicas limitadas. Importante notar que NIIS não opera nenhuma instância nacional do X-Road – responsabilidade que permanece com cada país – mas fornece software e conhecimento necessários para que países operem suas próprias instâncias autonomamente (NIIS, 2021).

A governança de cada instância nacional do X-Road opera através de arranjos institucionais que variam segundo contextos legais e administrativos de cada país, mas

compartilham elementos estruturais comuns. Cada instância requer operador central – tipicamente agência governamental responsável por governo digital ou infraestrutura de TI – que desempenha funções administrativas essenciais. O operador mantém infraestrutura de serviços centrais (registro de membros, gestão de certificados, monitoramento de saúde do sistema); define políticas técnicas como perfis de certificados aceitos, padrões de segurança mínimos, e requisitos de disponibilidade; administra processo de adesão de novos membros, verificando identidade e capacidade técnica de organizações candidatas; e resolve disputas técnicas ou operacionais entre participantes.

Critically, o operador central não possui autoridade para determinar quais dados organizações devem compartilhar ou com quem – esta permanece prerrogativa exclusiva de cada participante. O papel do operador limita-se a aspectos de coordenação técnica e governança procedimental do ecossistema como um todo, não se estendendo a decisões substantivas sobre conteúdo. Esta separação clara entre governança técnica (centralizada) e governança de dados (descentralizada) é fundamental para viabilidade política do modelo, permitindo que organizações com culturas e prioridades diversas coexistam no mesmo ecossistema mantendo autonomia sobre suas informações sensíveis (X-Road Global, 2021).

A governança das relações bilaterais de compartilhamento de dados opera através de acordos explícitos entre pares de organizações para cada tipo de serviço de dados. Quando organização A deseja consumir dados mantidos por organização B através do X-Road, as duas partes devem negociar e formalizar acordo bilateral especificando: quais dados específicos serão compartilhados; para quais propósitos legítimos podem ser utilizados; com qual frequência podem ser acessados; quanto tempo logs de acesso serão retidos; responsabilidades de cada parte quanto à qualidade e atualização dos dados; procedimentos para resolver inconsistências ou disputas; e condições sob as quais acordo pode ser modificado ou terminado. Apenas após acordo bilateral estar estabelecido – processo que pode variar de simples formalidade para compartilhamentos não-sensíveis até negociações complexas para dados altamente regulados – a conexão técnica é habilitada nos security servers respectivos.

Esta abordagem de acordos bilaterais contrasta com modelos alternativos onde regras de compartilhamento são estabelecidas centralmente através de legislação ou regulação que obriga organizações a disponibilizarem certos dados para certos propósitos. Enquanto mandatos legais certamente existem e são respeitados dentro do ecossistema X-Road – leis podem estabelecer obrigações de compartilhamento em domínios específicos – o sistema não presume ou impõe tais obrigações, funcionando igualmente bem para compartilhamentos voluntários motivados por eficiência operacional ou inovação de serviço. Esta flexibilidade

permite que ecossistema evolua organicamente, com novos casos de uso emergindo da iniciativa de pares de organizações que identificam oportunidades de valor mútuo, ao invés de depender exclusivamente de mandatos de cima para baixo (OECD-OPSI, 2022).

Um aspecto particularmente sofisticado da governança do X-Road manifesta-se no conceito de *Trust Federation*⁶ para interoperabilidade transfronteiriça. Quando duas instâncias nacionais do X-Road desejam federar-se – permitindo que organizações em um país acessem serviços oferecidos por organizações em outro país – processo de governança adicional torna-se necessário. As autoridades operadoras dos dois países devem negociar acordo de federação estabelecendo reconhecimento mútuo de suas respectivas autoridades certificadoras, políticas de segurança compatíveis, mecanismos de resolução de disputas internacionais, e conformidade com regulações de proteção de dados que podem diferir entre jurisdições. A federação Estonia-Finlândia, operacional desde 2018, exemplifica este modelo: os dois países operam instâncias X-Road independentes sob suas próprias governanças nacionais, mas configuraram sistemas para reconhecer e confiar mutuamente em certificados e autorizações, permitindo fluxo de dados transfronteiriço fluido sem comprometer soberania digital de nenhuma nação (OECD-OPSI, 2022).

Lição crucial desta arquitetura de governança para contextos federativos como o brasileiro reside no equilíbrio cuidadoso entre coordenação necessária e autonomia preservada. X-Road demonstra empiricamente que interoperabilidade em larga escala não requer – e frequentemente é prejudicada por – tentativas de centralização excessiva ou harmonização forçada. Ao invés de buscar uniformidade, modelo prosperou através de coordenação mínima viável em aspectos técnicos essenciais (protocolos, segurança, identificação) combinada com máxima flexibilidade em aspectos substantivos (quais dados compartilhar, com quem, sob quais termos). Este princípio de "coordenação sem coerção" oferece orientação valiosa para implementação da IND brasileira em contexto onde União não possui autoridade constitucional para impor padrões tecnológicos a estados e municípios autônomos.

É necessário precisar o tipo de federalismo que o X-Road pratica e distingui-lo do federalismo brasileiro. O X-Road opera em federalismo organizacional: diferentes organizações têm autonomia técnica sob mandato legal centralizado pelo Estado estoniano (Estado unitário). O Brasil opera sob federalismo político constitucional: União, estados e municípios são entes autônomos com representação eleitoral e capacidade legislativa garantidas

6 *Trust Federation* (Federação de Confiança) é mecanismo que permite que duas ou mais instâncias nacionais do X-Road se conectem, reconhecendo mutuamente suas autoridades certificadoras e permitindo fluxo de dados transfronteiriço.

pela CF/88. A IND, instituída por decreto federal, não pode ser obrigatória para estados e municípios sem lei federal específica e instrumentos de governança interfederativa. O modelo adequado é o de coordenação com adesão progressiva — análogo ao SUS, que estabelece diretrizes federais e preserva autonomia de gestão subnacional.

É necessário, aqui, precisar o tipo de federalismo que o X-Road pratica — e distingui-lo do federalismo brasileiro. O "federalismo digital" do X-Road é de natureza organizacional: diferentes organizações (ministérios, agências, municípios estonianos, empresas privadas) detêm autonomia técnica sobre seus sistemas e dados, mas operam sob mandato legal centralizado pelo Estado estoniano — o X-Road Act de 2002 tornou a conexão obrigatória para órgãos públicos, eliminando a opção de não participar. Trata-se de federalismo de organizações dentro de um Estado unitário. O Brasil opera sob federalismo político constitucional: União, estados e municípios são entes autônomos com representação eleitoral própria, capacidade legislativa e orçamentos independentes garantidos pela Constituição Federal de 1988. A IND, instituída por decreto federal, alcança apenas a APF direta, autárquica e fundacional — não estados, não municípios, não estatais. Tornar a IND genuinamente nacional exigiria lei federal e, provavelmente, instrumentos de governança interfederativa ainda inexistentes. Ao mesmo tempo, a ausência de obrigatoriedade não impede avanços: estados como Mato Grosso e Piauí já implementaram versões do X-Road em seus territórios, demonstrando que a adesão voluntária com incentivos técnicos e financeiros pode produzir expansão gradual. O modelo adequado para o Brasil não é o da imposição centralizada, mas o da coordenação federativa com adesão progressiva — análogo ao SUS, que estabelece diretrizes federais vinculantes para quem acessa os recursos, mas preserva autonomia de gestão estadual e municipal na execução dos serviços. ¹

3.7 Resultados e Impactos - Dados Quantitativos de Alcance e Utilização

O X-Road atende atualmente toda a população estoniana (1,3 milhão de habitantes), sendo que 99% dos cidadãos com mais de 15 anos utilizam serviços digitais governamentais mediados pela plataforma (E-Estonia, 2024). Os dados de utilização demonstram penetração e impacto excepcionais:

Usuários Diretos: - 1,3 milhão de cidadãos estonianos (100% da população) possuem identidade digital (e-ID) que permite acesso a serviços via X-Road - 98% dos contribuintes (aproximadamente 800.000 pessoas) declaram imposto de renda online mediante

X-Road em média de 3-5 minutos - 700.000+ pacientes (54% da população) utilizam sistema e-Health conectado ao X-Road para consultar prontuários, agendar consultas e receber prescrições digitais - 95% das transações bancárias da população são realizadas via *internet banking* integrado ao X-Road para autenticação - 30.000+ empresas utilizam X-Road para interações com governo (abertura de empresa leva 15 minutos online) Volume Transacional: - 1+ bilhão de transações anuais apenas na Estônia (aproximadamente 770 transações por cidadão/ano) - Pico de 2.800 consultas por segundo durante horários de maior demanda - Média de 2.000 serviços diferentes consumidos diariamente – 52.000 + queries de dados processadas por minuto em períodos normais.

Instituições Conectadas: - 2.000+ instituições (públicas e privadas) conectadas ao X-Road estoniano - 500+ órgãos governamentais de todos os níveis administrativos - 1.500+ empresas privadas (bancos, seguradoras, operadoras telecom, utilities) integradas para serviços B2G e B2C – 900 + diferentes tipos de serviços disponibilizados através da plataforma.

Impacto Internacional: - 60+ países em diferentes estágios de implementação ou estudo do X-Road - 5 países com implementações operacionais completas (Estônia, Finlândia, Islândia, Faroe Islands, parcialmente Ucrânia) - 10+ implementações piloto em andamento (incluindo Brasil - Mato Grosso e Piauí) - 3+ bilhões de transações anuais globalmente em todas as implementações X-Road.

Economia de Tempo e Recursos: - 2% do PIB anual economizado pelo governo estoniano em custos administrativos (~820 milhões USD ao longo de 20 anos) - 1.400 anos de tempo de trabalho economizados anualmente pela população ao evitar filas, deslocamentos e preenchimentos redundantes - 5 dias úteis em média economizados por cidadão anualmente em interações com governo.

Estes números posicionam o X-Road como infraestrutura digital pública de maior penetração per capita do mundo, com utilização cotidiana comparável a utilities essenciais como energia elétrica ou água encanada — 99% dos estonianos utilizaram ao menos um serviço mediado pelo X Road no último mês, segundo pesquisa nacional de 2023.

A Tabela 4 consolida os principais indicadores de impacto do X-Road na Estônia após 24 anos de operação, demonstrando a escala e profundidade da transformação digital alcançada.

Tabela 4 – Impactos Mensuráveis do X-Road na Estônia (2024)

Indicador	Valor	Observação
População atendida	1,3 milhão (100%)	Cobertura universal
Penetração de serviços digitais	99%	Quase totalidade disponível online
Transações anuais (Estônia)	2+ bilhões	Apenas instância nacional
Transações per capita/ano	~1.500	Por cidadão estoniano
Instituições conectadas	2.000+	Públicas e privadas
Serviços diferentes disponíveis	900+	Múltiplos domínios
Economia anual (% PIB)	2%	Custos administrativos reduzidos
Economia acumulada (24 anos)	€820 milhões	Desde 2001
Tempo economizado/cidadão/ano	5 dias úteis	Evita filas e deslocamentos
Tempo de trabalho coletivo economizado	1.400 anos/ano	População total
Disponibilidade (uptime)	>99,9%	Sistema crítico nacional
Violações de segurança confirmadas	0	Em 24 anos de operação
Países com implementações	60+	Em diferentes estágios
Transações anuais globais	3+ bilhões	Todas instâncias X-Road
Adoção de e-Tax	98%	Declaração impostos online
Adoção de e-Health	54%	Consulta prontuários

Fonte: Elaboração própria com dados de (Nortal, 2024), (E-Estonia, 2024), (Future Shift Labs, 2024) e (X-Road Global, 2024).

Estes números posicionam o X-Road como infraestrutura digital pública de maior penetração per capita do mundo, com utilização quotidiana comparável a *utilities* essenciais como energia elétrica ou água encanada.

O X-Road reduziu os Silos Institucionais? Sim, substancialmente, mas não completamente.

Análise de implementação estoniana evidencia que X-Road eliminou silos técnicos (sistemas incompatíveis que impediam compartilhamento) mas, enfrentou resistência de silos organizacionais (culturas institucionais de não-compartilhamento):

Sucesso na redução de Silos Técnicos:

Integração Saúde-Farmácia (2008): Antes do X-Road, hospitais, clínicas e farmácias operavam sistemas isolados — médico prescrevia em papel, paciente levava

fisicamente a farmácia. Pós-X-Road, prescrição digital flui automaticamente sistema hospitalar → sistema nacional saúde → sistema farmácia. Resultado: 99% das prescrições são digitais; farmacêutico vê histórico completo de medicamentos do paciente, evitando interações perigosas (Kalvet; Toots, 2016).

Integração Impostos-Empregadores-Previdência (2003): Antes, empregadores reportavam salários separadamente à Receita Federal (impostos), Seguro Social (previdência) e Seguro Desemprego — redundância e inconsistências. X-Road permitiu “single reporting” empregador reporta uma vez, dados fluem automaticamente entre instituições. Impacto: Redução de 70% no tempo de compliance empresarial (Anthes, 2015).

Integração Polícia-Judiciário-Prisões (2010): Sistema de justiça criminal eliminou papelada redundante — quando polícia prende suspeito, ficha automaticamente disponível para promotor, juiz, defensor público e sistema prisional. Benefício: Redução de 40% no tempo entre prisão e julgamento (Parsons et al., 2017).

Métricas Quantitativas de Derrubada de Silos: - Antes do X-Road (2000): Estônia possuía ~300 sistemas governamentais isolados que não se comunicavam; cidadão precisava fornecer mesmos dados 15-20 vezes em média ao longo da vida para diferentes órgãos - Após X-Road (2024): 2.000+ sistemas interconectados; princípio “once-only” garante que cidadão fornece cada informação uma única vez—compartilhamento subsequente é automatizado mediante consentimento - Redução de redundância: Estudos estimam que X-Road eliminou 85% de coletas redundantes de dados, economizando ~1.400 anos de tempo de trabalho coletivo anualmente.

Persistência de Silos Organizacionais:

Contudo, derrubada técnica não eliminou completamente resistências organizacionais:

Silos de cultura institucional: Alguns órgãos continuam relutantes em compartilhar dados mesmo com X-Road disponível, invocando preocupações de privacidade ou alegando “particularidades” de seus dados (Kalvet, 2012). X-Road Act (lei) foi necessária precisamente porque adesão voluntária encontrava resistência.

Silos de competência: Integração revelou inconsistências—mesmo dado (ex: endereço de cidadão) registrado diferentemente em sistemas de impostos, saúde e eleitor.

Derrubada técnica de silos expôs necessidade de governança de dados (quem é “dono” autoritativo de cada tipo de dado?).

Silos internacionais: X-Road estoniano conecta-se ao finlandês, mas interoperabilidade com outros países UE ainda é limitada. Tentativas de criar X-Road paneuropeu enfrentam resistências nacionais sobre soberania de dados.

Conclusão: X-Road foi condição necessária, mas não suficiente para a redução dos *Silos*. Infraestrutura técnica removeu barreiras tecnológicas, mas transformação completa exigiu também mudanças legais (X-Road Act obrigando compartilhamento), culturais (treinamento de funcionários), e de governança (criação de papéis como *Chief Data Officer* em cada órgão). Como afirmam (Cordella; Tempini, 2015), “technology enables but doesn’t determine” — X-Road habilitou derrubada de silos, mas sucesso dependeu de orquestração sociotécnica que combinou infraestrutura, legislação, incentivos e liderança política.

3.8 Adoção e Impactos Mensuráveis: Da Eficiência Administrativa à Transformação Social

A avaliação de impacto de infraestruturas públicas digitais enfrenta desafios metodológicos significativos: como isolar efeitos de plataforma tecnológica dos múltiplos outros fatores que influenciam eficiência governamental e satisfação cidadã? No caso do X-Road, beneficiamo-nos de duas décadas de operação que geraram corpus substancial de evidências quantitativas e qualitativas permitindo estimativas razoavelmente robustas de impacto. Os dados apresentados a seguir derivam tanto de fontes oficiais estonianas quanto de análises independentes de organismos internacionais, oferecendo triangulação que aumenta confiabilidade das estimativas.

No contexto estoniano original, X-Road alcançou escala genuinamente nacional: até 2024, aproximadamente 1.000 instituições públicas e privadas estavam diretamente conectadas à plataforma, provendo ou consumindo serviços de dados. Estas 1.000 organizações conectadas diretamente catalisam participação indireta de estimadas 52.000 organizações adicionais que acessam serviços X-Road através de intermediários, criando ecossistema digital que permeia virtualmente toda economia estoniana (Nortal, 2024). Mais de 900 serviços de dados distintos são oferecidos através da plataforma, abrangendo domínios de registros civis, saúde, educação, impostos, previdência social, registros empresariais, propriedade de veículos, e dezenas de outros. Anualmente, sistema processa mais de 2 bilhões de transações de dados — número impressionante considerando que população estoniana é de apenas 1,3 milhão,

implicando média de aproximadamente 1.500 transações por cidadão por ano (Future Shift Labs, 2024).

Métricas de confiabilidade técnica validam robustez operacional do sistema: disponibilidade (uptime) do X-Road mantém-se consistentemente acima de 99,9%, significando que plataforma permanece funcional virtualmente todo tempo, com interrupções limitadas a janelas planejadas de manutenção de poucas horas anuais. Latência média de transações – tempo entre requisição e resposta – situa-se na ordem de centenas de milissegundos, suficientemente rápida para não degradar experiência de usuário em serviços digitais que dependem do X-Road (X-Road Global, 2024). Mais significativamente, em seus 24 anos de operação, X-Road nunca sofreu violação de segurança confirmada onde atacantes conseguissem comprometer integridade ou confidencialidade de dados transitando pela plataforma, testemunho de solidez de seu design de segurança mesmo face a Estônia ser alvo frequente de ciberataques devido a tensões geopolíticas com Rússia (Nortal, 2024).

Impactos econômicos quantificáveis manifestam-se em múltiplas dimensões. Estudos governamentais estonianos estimam que X-Road gera economia anual equivalente a aproximadamente 2% do PIB nacional – mais de 600 milhões de euros – através de múltiplos mecanismos: redução de custos administrativos pela eliminação de processamento manual e digitalização de fluxos de trabalho; redução de tempo que cidadãos e empresas gastam interagindo com governo, tempo que pode ser redirecionado para atividades produtivas; redução de erros e fraudes através de validação automática de dados contra fontes autoritativas; e habilitação de novos modelos de negócio digitais que dependem de acesso eficiente a dados governamentais (Future Shift Labs, 2024). Para cidadão médio estoniano, estimativas sugerem economia de aproximadamente duas semanas anuais de tempo que de outra forma seria gasto em filas, preenchimento de formulários, e viagens a escritórios governamentais – tempo recuperado através de serviços digitais fluidos viabilizados pelo X-Road (Nortal, 2024).

Impactos qualitativos sobre experiência cidadã e qualidade de serviços públicos são documentados através de múltiplas lentes. Pesquisas de satisfação consistentemente indicam que estonianos avaliam serviços públicos digitais como superiores em velocidade, conveniência e confiabilidade comparados a canais presenciais tradicionais, invertendo padrão comum em muitos países onde cidadãos relutam em usar serviços digitais por percebê-los como inferiores. Taxa de adoção de serviços digitais na Estônia situa-se acima de 95% para maioria dos serviços governamentais frequentes – declaração de impostos, acesso a registros médicos, matrícula escolar – indicando que população não apenas tem acesso teórico mas efetivamente utiliza canais digitais como primeira escolha (Future Shift Labs, 2024).

Casos de uso emblemáticos ilustram valor prático concreto da interoperabilidade viabilizada pelo X-Road. No domínio de saúde, sistema de prescrições eletrônicas (e-Prescription) permite que médico prescreva medicamento eletronicamente, prescrição sendo imediatamente visível para farmácias através do X-Road, eliminando necessidade de paciente transportar papel e permitindo que qualquer farmácia no país dispense medicamento baseando-se em registro autoritativo. Este sistema processou mais de 100 milhões de prescrições desde implementação, com taxa de erro significativamente inferior a sistema baseado em papel que precedeu, além de permitir funcionalidades impossíveis analogicamente como alertas automáticos sobre interações medicamentosas perigosas detectadas através de cruzamento com histórico de prescrições do paciente (X-Road Global, 2024).

No domínio de serviços empresariais, integração através do X-Road entre registro empresarial, autoridade tributária, e instituições financeiras permite que empreendedor registre nova empresa inteiramente online em minutos ao invés de dias, com todas as obrigações fiscais e bancárias sendo automaticamente configuradas através de fluxos de dados entre sistemas. Este processo exemplifica princípio "once-only" onde cidadão fornece informação uma única vez ao governo, que então reutiliza internamente essa informação conforme necessário com consentimento apropriado, ao invés de forçar cidadão a repetir mesmas informações para múltiplas agências – prática comum que gera frustração e erros de transcrição.

A experiência brasileira emergente com X-Road, embora ainda em estágios relativamente iniciais comparados ao caso estoniano, já demonstra impactos mensuráveis em contexto radicalmente diferente. O estudo de caso de Mato Grosso documenta que "uso crescente de X-Via, particularmente em estados como Mato Grosso, levou a surto na geração de dados e logs", necessitando desenvolvimento de "estratégia clara de gestão de dados e melhorias contínuas em lidar eficientemente com grandes volumes de dados" – desafio de crescimento indicativo de adoção bem-sucedida (X-Road Global, 2024). Significativamente, o caso brasileiro evidencia desafio de coordenação federativa que Estônia unitária não enfrenta: expansão para nível municipal em Mato Grosso revelou-se "camada de governança mais complexa, onde restrições políticas e de recursos apresentam novos desafios à expansão", sublinhando que transferibilidade de modelo técnico não elimina necessidade de adaptações institucionais profundas para contextos federativos.

Casos comparativos de adoção em outros contextos de países em desenvolvimento oferecem insights adicionais. Camboja implementou CamDX como solução nacional de intercâmbio de dados baseada em X-Road, focando inicialmente em casos de uso de alto impacto social como registros de nascimento e sistemas de proteção social. Argentina

utilizou X-Road para conectar sistemas de diferentes províncias, enfrentando desafios similares de coordenação federativa aos brasileiros. Colômbia empregou tecnologia para lançar serviços digitais orientados ao cidadão que integram informações de múltiplas agências. Cada um destes casos demonstra que princípios do X-Road são transferíveis para contextos com capacidades técnicas e recursos financeiros muito inferiores aos estonianos, desde que acompanhados por compromisso político sustentado e investimentos adequados em capacitação institucional (X-Road Global, 2021); (X-Road Global, 2024).

3.9 Análise Crítica: Forças e Limitações do Modelo X-Road

Uma análise crítica equilibrada do X-Road requer reconhecimento tanto de suas forças validadas empiricamente quanto de limitações intrínsecas e desafios de transferibilidade que tornam modelo não-trivialmente replicável em contextos substancialmente diferentes do estoniano. Esta seção sintetiza ambos os aspectos, fundamentando-se tanto em literatura acadêmica quanto em avaliações práticas de implementadores em diversos países.

Forças Fundamentais Validadas Empiricamente

A primeira e mais significativa força do X-Road reside em sua interoperabilidade demonstrada na prática ao longo de duas décadas de operação em escala nacional. Diferentemente de muitos sistemas de integração governamental que permanecem parcialmente implementados ou limitados a casos de uso específicos, X-Road alcançou cobertura genuinamente abrangente do aparato estatal estoniano e extensões significativas ao setor privado, validando empiricamente que arquitetura descentralizada e federada pode funcionar em escala real sem degradação de performance ou segurança. O relatório da UCL confirma esta avaliação ao atribuir ao X-Road pontuação perfeita (7 de 7) em variáveis de interoperabilidade avaliadas, colocando-o entre sistemas com maior alinhamento documentado aos princípios de DPI globalmente (Fetter; Rao; Eaves, 2025).

A segunda força fundamental relaciona-se à governança transparente e bem-estruturada que sustenta o sistema. O estabelecimento do NIIS como organização internacional dedicada exclusivamente ao desenvolvimento do X-Road criou modelo de governança que transcende interesses de qualquer nação individual, permitindo que roadmap tecnológico reflita necessidades agregadas de comunidade global crescente de adotantes. Mecanismos claros de accountability – incluindo conselho diretor com representantes de países membros, processos abertos de tomada de decisão, e disponibilidade pública de código-fonte e documentação –

geram confiança institucional necessária para que organizações invistam em tecnologia cujo futuro não está sujeito a caprichos de fornecedor comercial único. O relatório da UCL identifica esta transparência de governança como atributo essencial presente em apenas 44% dos sistemas de data exchange globalmente, posicionando X-Road como exceção positiva ao invés de norma (FETTER; RAO; EAVES, 2025, Tabela 6).

A terceira força manifesta-se na replicabilidade documentada: mais de 25 implementações em contextos diversos – países unitários e federações, economias avançadas e em desenvolvimento, culturas políticas autoritárias e democráticas – demonstram que princípios subjacentes ao X-Road não são peculiares ao contexto estoniano, mas possuem aplicabilidade genuinamente ampla. Particularmente significativa é adoção bem-sucedida em contextos de renda média como Brasil, México e Camboja, refutando argumento de que modelo seria viável apenas para países ricos com capacidades técnicas excepcionais. Estudo IEEE sobre pré-requisitos de adoção do X-Road identificou que "embora certas capacidades institucionais e técnicas sejam necessárias, estas podem ser construídas progressivamente durante processo de implementação ao invés de constituírem barreiras absolutas de entrada" (IEEE, 2020).

A quarta força relaciona-se à segurança robusta operacionalmente validada. Em ambiente geopolítico onde Estônia enfrenta ameaças cibernéticas persistentes e sofisticadas, X-Road manteve registro perfeito de ausência de violações confirmadas de dados ao longo de 24 anos de operação. Este histórico não deriva de obscuridade ou falta de atenção de atacantes – Estônia foi alvo de ciberataques massivos notórios em 2007 e continua sendo alvo prioritário – mas de design de segurança robusto que incorpora múltiplas camadas de defesa: autenticação forte através de certificados digitais, criptografia de todas as comunicações, assinaturas digitais para não-repúdio, e logging abrangente que permite detecção de atividades anômalas (Nortal, 2024); (Future Shift Labs, 2024).

Pontos Fortes Identificados na Literatura

A literatura acadêmica e relatórios técnicos internacionais convergem na identificação de seis forças estruturais do X-Road que explicam seu sucesso e replicabilidade:

1. Arquitetura Descentralizada Ponto-a-Ponto Diferentemente de modelos centralizados que concentram dados em repositórios únicos, o X-Road mantém dados sob custódia das instituições originárias, compartilhando-os sob demanda mediante protocolos seguros (Anthes, 2015; Vassil, 2015). Vantagens identificadas:

- (a) redução de riscos de vazamento massivo (não há “honeypot” central atrativo para hackers);

- (b) conformidade facilitada com regulações de proteção de dados (dados permanecem sob controle do responsável legal); e
- (c) escalabilidade horizontal (adicionar novos nós não sobrecarrega infraestrutura central).

(Kotka et al., 2016) argumentam que esta arquitetura foi determinante para resiliência do sistema durante ataque cibernético de 2007 — enquanto *websites* governamentais foram derrubados por DDoS, o X-Road manteve-se operacional porque não possui ponto único de falha.

2. Auditabilidade Radical Mediante Logs Imutáveis Toda transação no X-Road gera registro de auditoria imutável (quem acessou quais dados, quando, para qual finalidade) armazenado com assinatura *digital time stamped*, impossibilitando alteração retroativa (Sullivan; Burger, 2017). Impacto: Criou cultura de transparência e accountability—cidadãos podem consultar quem acessou seus dados mediante portal *MyData*, gerando 50.000+ consultas mensais. Casos documentados de funcionários públicos que acessaram dados de celebridades por curiosidade foram detectados e punidos, reforçando confiança pública. (Margetts; Naumann, 2017) destacam que esta auditabilidade radical é “diferencial competitivo” do X-Road frente a sistemas que prometem privacidade, mas carecem de verificabilidade.

3. Padronização Técnica Rigorosa, mas Flexível X-Road impõe padrões obrigatórios de segurança (criptografia, autenticação) e interoperabilidade (formatos XML/JSON, protocolos SOAP/REST) mas permite flexibilidade nas implementações internas das instituições (Parsons et al., 2017). Benefício: Instituições não precisam refazer sistemas legados—apenas encapsulam em “wrappers” que aderem aos protocolos X-Road, reduzindo drasticamente custos de adesão. (Cordella; Tempini, 2015) calculam que custo médio de integração de novo serviço ao X-Road é 70% inferior a alternativas de integração bilateral tradicional.

4. Governança Multipartidária com Separação Clara de Responsabilidades O modelo NIIS (Nordic Institute for Interoperability Solutions) estabelece governança compartilhada onde nenhum país ou ator controla unilateralmente a plataforma, com decisões técnicas tomadas por comitê técnico e estratégicas por conselho com representação balanceada (Kalvet; Toots, 2016). Resultado: Gera confiança de países menores em adotar tecnologia desenvolvida por outro país, sem temer dependência ou vigilância. (Drechsler; Madise, 2020) contrastam com fracassos de tentativas europeias centralizadas onde desconfianças nacionais inviabilizaram cooperação.

5. Maturidade Acumulada e Resiliência Testada 24 anos de operação contínua (desde 2001) geraram aprendizado institucional, correção de bugs, e resistência comprovada a crises—sistema sobreviveu a ataques cibernéticos, mudanças de governo, crises econômicas e até migração para cloud (Kalvet, 2012; Tammpuu; Masso, 2018). Diferencial: Organizações internacionais consideram X-Road “battle-tested”, reduzindo riscos de adoção comparado a sistemas mais novos. Estudos de caso do Banco Mundial identificam esta maturidade como “fator crítico de sucesso” em recomendações de DPI para países em desenvolvimento.

6. Ecossistema de Serviços de Alto Impacto Cidadão Disponibilidade de serviços que cidadãos utilizam frequentemente (declaração impostos, prescrições médicas, registros empresariais) criou massa crítica de uso que justifica investimento em identidade digital e *literacy* digital (Kalvet; Katell, 2006). Ciclo virtuoso: Mais serviços → mais usuários → mais pressão política para digitalizar serviços restantes → ainda mais serviços.

(Dunleavy et al., 2006) descrevem este fenômeno como “efeito de rede institucional” onde valor da plataforma cresce exponencialmente com número de participantes. Literatura crítica (Henman, 2019; Dencik et al., 2018) também alerta que estes pontos fortes podem tornar-se fraquezas em contextos diferentes — descentralização exige capacidades técnicas distribuídas que países menos desenvolvidos podem não possuir, e auditabilidade radical pode gerar sensação de vigilância se mal comunicada. Contudo, consenso acadêmico é que X-Road representa “estado da arte” em DPI de interoperabilidade governamental (Mazzucato et al., 2024).

7. Desafios Intrínsecos e Condições de Transferibilidade

A primeira limitação significativa relaciona-se à complexidade técnica do sistema, que cria barreira de entrada substancial para novos desenvolvedores e operadores. Documentação do NIIS reconhece explicitamente que "características relacionadas à segurança combinadas com arquitetura distribuída tornam X-Road muito complexo" e que "leva tempo para novos desenvolvedores embarcarem e aprenderem o sistema", resultando em "não ser tão fácil conseguir novos desenvolvedores a bordo e contribuir" para projeto open-source (Interoperable Europe Portal, 2021). Esta complexidade manifesta-se tanto em curva de aprendizado técnica quanto em esforço de implementação: estabelecer instância funcional do X-Road requer competências especializadas em criptografia, PKI, segurança de redes, administração de sistemas, e arquitetura de software – conjunto de habilidades não universalmente disponível em todas as administrações públicas.

A segunda limitação refere-se à dependência de infraestrutura de confiança (PKI) pré-existente ou construída paralelamente. X-Road não funciona isoladamente, mas pressupõe disponibilidade de autoridades certificadoras confiáveis, processos estabelecidos de emissão e revogação de certificados digitais, e cultura organizacional de gestão adequada de credenciais criptográficas. Na Estônia, esta infraestrutura existia previamente através do sistema nacional de ID cards, mas muitos países adotantes não possuem PKI governamental madura, necessitando construí-la simultaneamente à implementação do X-Road – duplicando complexidade e cronograma de projeto. Estudo de caso brasileiro documenta este desafio: "segurança permanece característica definidora da proposição de valor do X-Via no Brasil" mas implementação adequada de camadas de segurança levantou "preocupações sobre potenciais impactos de performance", tensão que organizações devem navegar cuidadosamente (X-Road Global, 2024).

A terceira limitação relaciona-se ao que pode ser caracterizado como "tragédia dos comuns da governança bilateral". Embora arquitetura do X-Road seja tecnicamente descentralizada, implementação de cada caso de uso específico requer negociação e formalização de acordo bilateral entre produtor e consumidor de dados – processo que, conforme reconhece documentação de federação Estônia-Finlândia, é "atualmente a fase mais trabalhosa do processo de integração", com negociações frequentemente demandando meses para casos de uso que envolvem dados sensíveis ou regulados (OECD-OPSI, 2022). Em contextos com culturas organizacionais caracterizadas por desconfiança interinstitucional ou competição por protagonismo – dinâmicas não incomuns em administrações públicas de muitos países – sobrecarga de coordenação bilateral pode tornar-se impedimento prático à realização de potencial de interoperabilidade do sistema.

A quarta limitação refere-se a desafios específicos de escalabilidade em contextos radicalmente maiores que Estônia. Embora X-Road seja tecnicamente escalável – arquitetura descentralizada previne gargalos – escalabilidade organizacional e política é dimensão diferente. Coordenar ecossistema de 1.000 organizações em país de 1,3 milhão de habitantes é desafio qualitativamente distinto de coordenar potencialmente dezenas de milhares de organizações em país de 200+ milhões. Caso brasileiro já evidencia este desafio: documento de Mato Grosso menciona que "buscar interoperabilidade no nível municipal" provou ser "camada mais complexa de governança, onde restrições políticas e de recursos apresentam novos desafios", sugerindo que modelo estoniano requer adaptações substanciais para contextos federativos com milhares de entes autônomos (X-Road Global, 2024).

A quinta limitação relaciona-se ao que poderia ser denominado "problema do ovo e da galinha" de adoção. Valor do X-Road para qualquer participante individual é função do número de outros participantes e serviços já disponíveis – rede com dois participantes gera valor próximo de zero; rede com mil participantes gera valor substancial. Esta característica de efeitos de rede cria desafio de partida: primeiros adotantes enfrentam custos de implementação sem receber benefícios proporcionais inicialmente, exigindo visão estratégica e comprometimento de longo prazo que podem ser difíceis de sustentar face a pressões por resultados de curto prazo comuns em governos. Estônia superou este desafio através de liderança estatal forte e mandatos de conexão para agências governamentais centrais, mas replicação desta abordagem pode ser politicamente inviável em contextos democráticos mais pluralistas ou federações onde governo central possui autoridade limitada sobre entes subnacionais.

8. Síntese: Modelo Robusto, transferível sob Condições

A análise equilibrada de forças e limitações sugere que X-Road representa modelo genuinamente robusto e comprovado de infraestrutura pública digital, mas transferibilidade para contextos substancialmente diferentes do estoniano não é automática ou trivial. Sucesso requer não apenas implementação técnica competente, mas também: construção ou adaptação de infraestruturas de confiança adequadas; desenvolvimento de capacidades institucionais de governança que equilibrem coordenação e autonomia; investimentos sustentados ao longo de múltiplos anos para superar "vale da morte" inicial de adoção; e, crucialmente, adaptações criativas que respeitem especificidades culturais, institucionais e políticas de cada contexto sem comprometer princípios fundamentais que tornam modelo eficaz. Para o Brasil, isto implica que X-Road oferece não blueprint a ser copiado mecanicamente, mas conjunto de princípios testados que devem ser criativamente adaptados à complexidade do contexto federativo, escala continental, e heterogeneidade institucional que caracterizam o país.

9. Limitações e Críticas ao Modelo X-Road

Apesar do reconhecimento internacional, literatura acadêmica e avaliações técnicas identificam seis limitações estruturais do X-Road que devem ser consideradas em análises de replicabilidade:

O gap de interoperabilidade técnica é diferente: não é problema de quem decide, mas de quem consegue conectar. Sistemas legados não se recusam a compartilhar dados por

questão política — eles simplesmente não conseguem fazê-lo porque foram construídos em épocas, linguagens e padrões incompatíveis. Isso muda o argumento sobre por que o X-Road é a referência certa.

3.10 Por que o X-Road é Referência Paradigmática de DPI?

A pergunta que orienta esta seção não é qual sistema de infraestrutura pública digital apresenta os melhores indicadores em alguma dimensão específica, mas qual deles oferece o modelo mais completo e mais transferível para administrações públicas que precisam resolver um problema técnico concreto: fazer sistemas que não foram projetados para se comunicar efetivamente se comunicarem, sem obrigar cada instituição a refazer sua infraestrutura interna. A resposta, sustentada pela análise comparativa disponível na literatura, aponta para o X-Road — não porque ele seja superior a todos os outros em algum atributo isolado, mas porque é o único que enfrenta esse problema em toda a sua extensão técnica e operacional, com resultados verificáveis ao longo de mais de duas décadas.

Essa distinção é necessária porque os sistemas frequentemente citados como referências de DPI foram construídos para resolver problemas diferentes. O Aadhaar indiano resolve o problema de identificação em escala massiva — sua arquitetura é otimizada para autenticar 1,3 bilhão de pessoas, não para habilitar intercâmbio de dados entre sistemas heterogêneos. O UPI demonstra excelência em pagamentos instantâneos dentro de um domínio técnico bem delimitado. O *SingPass* oferece autenticação robusta em um contexto onde a infraestrutura de base já é homogênea. Cada um desses sistemas é, em sua dimensão específica, superior ao X-Road. O problema é que essa superioridade foi alcançada justamente porque o escopo foi reduzido — soluções ótimas para problemas parciais, desenvolvidas em ambientes que não replicam a dificuldade central que a maioria das administrações públicas enfrenta: um parque tecnológico acumulado por décadas, construído em linguagens, protocolos e padrões que nunca foram planejados para conversar entre si.

É nesse ponto que a relevância do X-Road para o contexto brasileiro se torna mais precisa. A heterogeneidade tecnológica da administração pública federal não é resultado de má gestão pontual — é consequência estrutural de ciclos sucessivos de modernização parcial, onde cada geração de sistemas foi desenvolvida com as ferramentas e os padrões disponíveis à época, sem mecanismo de integração retroativa. Estimativas recorrentes na literatura especializada indicam que parcela significativa dos sistemas críticos da administração federal opera com mais de quinze anos, com documentação técnica incompleta e dependência de

fornecedores específicos que tornam qualquer tentativa de integração custosa e arriscada (Franco, 2024). O Decreto nº 12.198/2024 institui a IND e estabelece diretrizes de interoperabilidade, mas diretrizes não resolvem, por si mesmas, a questão técnica de como fazer um sistema desenvolvido em *COBOL* nos anos 1980 expor dados para uma aplicação moderna baseada em microsserviços.

O X-Road foi construído exatamente para esse tipo de problema. Sua arquitetura de security servers funciona como camada de tradução: cada instituição mantém integralmente sua infraestrutura interna — seja qual for a tecnologia, a linguagem ou o banco de dados que utiliza — e expõe os dados que decide compartilhar através de uma interface padronizada que adere aos protocolos do sistema. Do ponto de vista técnico, isso significa que o custo de adesão não é a refatoração de sistemas legados, mas a implementação de um gateway de integração — investimento substancialmente menor e politicamente mais viável. Os 24 anos de operação contínua na Estônia, atravessando múltiplas gerações tecnológicas sem que as instituições participantes precisassem sincronizar seus ciclos de atualização interna, constituem evidência empírica de que esse design funciona na prática, não apenas na especificação técnica.

A análise comparativa de 97 estudos conduzida por posiciona a Estônia com escore de maturidade DPI de 90/100, resultado que o relatório da UCL (Fetter; Rao; Eaves, 2025) decompõe em distribuição equilibrada entre os seis atributos essenciais avaliados — interoperabilidade, transparência, privacidade, inclusão, escala de adoção e capacidade de coordenação. Essa distribuição equilibrada é precisamente o que diferencia o X-Road de sistemas com escores altos concentrados em uma ou duas dimensões: não é um sistema excepcional buscando contextos excepcionais, mas um sistema robusto construído para funcionar onde as condições são imperfeitas — o que, por definição, descreve qualquer administração pública com legado tecnológico acumulado.

Isso não significa que o X-Road seja transferível sem adaptações. As limitações estruturais do modelo — dependência de infraestrutura de confiança (PKI) prévia, complexidade técnica que pode excluir organizações sem capacidade especializada, e desafios de escalabilidade para volumes muito superiores ao contexto estoniano — são reais e relevantes para o caso brasileiro. Mas essas limitações delimitam o escopo das adaptações necessárias; não invalidam a referência. Um sistema que demonstrou capacidade de integrar tecnologias heterogêneas em operação contínua, preservando autonomia técnica de cada participante e sem exigir uniformização de infraestrutura interna, oferece algo que nenhum dos seus concorrentes oferece na mesma extensão: um modelo testado para o problema que, do ponto de vista técnico, é o mais difícil de resolver na implementação da IND brasileira.

Tabela 5 – Comparação de Atributos entre DPIs Globais

Atributo	X-Road (EST)	UPI (Índia)	Aadhaar (Índia)	Pix (Brasil)
Interoperabilidade	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓
Resiliência testada	✓✓✓	✓✓	✓	✓
Escalabilidade	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Governança	✓✓✓	✓	✓	✓✓
Segurança/Privacidade	✓✓✓	✓✓	X	✓✓
Replicabilidade	✓✓✓	✓	✓	✓
Legenda: ✓✓✓ Excelente; ✓✓ Bom; ✓ Adequado; X Deficiente.				

Fonte: Elaboração própria baseada em (Fetter; Rao; Eaves, 2025); RAO; EAVES, (2025) e análise de documentação oficial.

3.11 Elementos Potencialmente Replicáveis para o Brasil

Princípios, Não Prescrições

A análise das seções precedentes estabelece que X-Road constitui modelo robusto e comprovado de infraestrutura pública digital, mas também evidencia que diferenças contextuais substanciais entre Estônia e Brasil – particularmente em escala, complexidade federativa, e heterogeneidade institucional – tornam replicação literal impossível e indesejável. A questão relevante não é "como copiar o X-Road no Brasil?" mas "quais princípios subjacentes ao sucesso estoniano são transferíveis para contexto brasileiro, e como devem ser criativamente adaptados?"

Tabela 6 – Análise de Transferibilidade de Elementos do X-Road para o Contexto Brasileiro

Elemento	Transferibilidade	Complexidade	Prioridade BR
Security Servers	Alta	Baixa	Imediata
APIs Padronizadas	Alta	Baixa	Imediata
Logs de Auditoria	Alta	Média	Curto Prazo
Princípio Once-only ⁷	Alta	Média	Curto Prazo
Infraestrutura Neutra	Alta	Baixa	Imediata
Governança NIIS	Média	Alta	Médio Prazo

7 Princípio "once-only" (uma única vez) estabelece que cidadãos e empresas devem fornecer cada informação ao governo apenas uma vez, sendo compartilhada entre órgãos conforme necessário mediante consentimento apropriado.

Elemento	Transferibilidade	Complexidade	Prioridade BR
Marco Legal	Média	Alta	Curto Prazo
Investimento	Média	Alta	Longo Prazo
Escala	Baixa	Muito Alta	Validação Gradual
Fresh Start ⁸	Baixa	N/A	Impossível
Consenso Político	Baixa	Muito Alta	Longo Prazo

Fonte: Elaboração própria baseada em X-ROAD GLOBAL (2024) e análise do Decreto nº 12.198/2024 (IND).

Princípio 1: Descentralização Arquitetural como Fundamento de Federalismo Digital

O princípio mais diretamente transferível é arquitetura federada onde dados permanecem em fontes originais e transações fluem ponto-a-ponto, não através de repositório central. Para Brasil, este princípio ressoa profundamente com imperativo constitucional de autonomia federativa: estados e municípios não poderiam (e não deveriam) ser forçados a transferir controle sobre seus dados para infraestrutura federal centralizada, mas podem voluntariamente participar de ecossistema que preserva sua soberania informacional enquanto habilita interoperabilidade.

Adaptação brasileira requereria reconhecimento explícito desta dimensão federativa no design da Infraestrutura Nacional de Dados (IND): ao invés de modelo com operador federal único, estrutura poderia contemplar operadores estaduais que gerenciam instâncias X-Road estaduais, federadas com instância nacional através de Trust Federation – análogo a como Estônia e Finlândia federaram sistemas nacionais. Este arranjo respeitaria autonomia constitucional de entes subnacionais enquanto construiria capacidade de interoperabilidade interfederativa essencial para políticas como saúde e educação que requerem coordenação entre níveis.

Princípio 2: Coordenação Mínima Viável, Autonomia Máxima Sustentável

X-Road demonstra empiricamente que coordenação eficaz não requer nem uniformidade forçada nem controle centralizado, mas identificação cuidadosa de aspectos onde padronização é tecnicamente necessária (protocolos de comunicação, perfis de certificados, metadados mínimos) versus aspectos onde diversidade é aceitável ou mesmo desejável

⁸ "Fresh start" (recomeço do zero) refere-se à oportunidade única que a Estônia teve de construir sistemas administrativos completamente novos após independência em 1991, sem compromissos com legados tecnológicos ou burocráticos soviéticos.

(tecnologias backend, interfaces de usuário, políticas específicas de domínio). Princípio de "coordenação mínima viável" maximiza probabilidade de adesão voluntária ao reduzir percepção de perda de autonomia.

Para Brasil, este princípio sugere que IND deveria especificar padrões rigorosos para camada de interoperabilidade – assegurando que sistemas possam efetivamente comunicar-se – mas evitar prescrições sobre como organizações gerenciam internamente seus dados ou implementam seus processos. Decreto 12.198/2024 já reflete parcialmente esta filosofia ao estabelecer que "a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) constitui conjunto de normas, políticas, arquiteturas, padrões, ferramentas tecnológicas" ao invés de sistema único mandatório, mas operacionalização prática requerá vigilância contínua para evitar "scope creep" onde coordenação expande além do mínimo necessário.

Princípio 3: Segurança como Habilitador de Confiança, Não Barreira de Adoção

Investimento significativo que X-Road faz em segurança – criptografia, autenticação forte, logging abrangente – não é luxo técnico, mas pré-requisito para confiança institucional e cidadã que viabiliza adoção em larga escala. Organizações não compartilhariam dados sensíveis através de plataforma percebida como insegura; cidadãos não confiariam em serviços digitais construídos sobre infraestrutura vulnerável. Paradoxalmente, requisitos robustos de segurança habilitam compartilhamento ao invés de inibi-lo.

Para Brasil, este princípio implica que investimentos em PKI governamental robusto, capacitação de equipes em criptografia e segurança de redes, e estabelecimento de procedimentos rigorosos de gestão de incidentes não podem ser tratados como "fase posterior" mas devem ser desenvolvidos desde início. Dados do caso brasileiro já validam isto: estudo de Mato Grosso identifica que "segurança permanece característica definidora da proposição de valor do X-Via no Brasil", sugerindo que estados percebem segurança como diferencial competitivo da plataforma ao invés de custo desnecessário (X-Road Global, 2024).

Princípio 4: Acordos Bilaterais como Mecanismo de Governança de Dados Descentralizada

Abordagem do X-Road onde cada relação de compartilhamento de dados é governada por acordo bilateral explícito entre produtor e consumidor oferece alternativa pragmática a dois extremos disfuncionais: anarquia onde nenhuma regra governa compartilhamento, versus centralização onde autoridade única determina todas as regras. Acordos bilaterais permitem que organizações adaptem termos de compartilhamento a

especificidades de cada caso de uso – dados de saúde requerendo proteções mais rigorosas que informações cadastrais básicas, por exemplo – enquanto mantêm *accountability* clara.

Adaptação brasileira deste princípio deveria reconhecer que negociação de acordos bilaterais pode ser onerosa quando replicada milhares de vezes para relações similares. Solução intermediária poderia envolver desenvolvimento de templates de acordos padronizados para categorias comuns de compartilhamento (ex: "dados cadastrais básicos para verificação de elegibilidade em programas sociais"), reduzindo sobrecarga de negociação caso-a-caso, mas mantendo flexibilidade para customização quando necessário. Experiência mexicana, onde X-Road "toma seus primeiros passos em dois estados" expandindo "de um domínio para governo inteiro", sugere que aprendizado incremental de como estruturar acordos é componente importante de curva de maturidade (X-Road Global, 2024).

Princípio 5: Open Source como Requisito de Soberania Digital

Decisão estoniana de disponibilizar X-Road como software open-source não foi altruísmo, mas reconhecimento estratégico de que DPI constitui infraestrutura crítica cuja soberania não pode depender de fornecedor proprietário. Para Brasil, princípio de utilizar e contribuir para soluções open-source alinha-se com diretrizes já estabelecidas em políticas de governo digital, mas implementação da IND oferece oportunidade de demonstrar compromisso mais profundo: ao invés de meramente adotar software open-source, Brasil poderia tornar-se contribuidor ativo para comunidade global do X-Road através do NIIS, compartilhando adaptações desenvolvidas para contexto federativo que poderiam beneficiar outras federações como México e Argentina que enfrentam desafios similares.

Princípio 6: Começar Pequeno, Crescer Organicamente

Trajetória de 24 anos do X-Road – começando com caso de uso único (consultas fiscais ao registro populacional), expandindo progressivamente para novos domínios, alcançando cobertura nacional eventualmente, e finalmente federando internacionalmente – oferece modelo de evolução incremental que contrasta com abordagens "big bang" que tentam implementar sistemas abrangentes imediatamente. Para Brasil, este princípio sugere estratégia de implementação faseada da IND: começar com subconjunto de bases de dados federais prioritárias e casos de uso de alto valor claramente definidos; demonstrar valor através de resultados mensuráveis que motivam expansão; construir capacidades institucionais e técnicas progressivamente através de aprendizado prático; e só então expandir para desafios mais complexos como integração interfederativa e participação do setor privado.

Caso de Mato Grosso valida sabedoria desta abordagem incremental: estado começou com implementação limitada em 2019, consolidou através de decreto em anos

subsequentes, e só então começou expandir para nível municipal – mesmo assim reconhecendo que "interoperabilidade no nível municipal" permanece "camada mais complexa de governança" que requer abordagem cuidadosa (X-Road Global, 2024). Esta modéstia estratégica – reconhecer complexidade e avançar progressivamente ao invés de prometer transformação imediata – é lição crucial para escalabilidade sustentável de iniciativas de DPI.

Síntese: Inspiração Informada, Não Imitação Acrítica

A análise dos elementos potencialmente replicáveis do X-Road não produz uma lista de prescrições técnicas, mas delimita o que pode ser aprendido de uma experiência que enfrentou, em escala e complexidade menores, problemas estruturalmente semelhantes aos que a implementação da IND brasileira terá de resolver. Cinco elementos — arquitetura de security servers, padronização de APIs, logs de auditoria, princípio once-only e neutralidade tecnológica — demonstraram alta transferibilidade justamente porque são agnósticos em relação ao contexto institucional interno de cada participante: funcionam independentemente do legado tecnológico que cada órgão carrega. Os demais elementos, de transferibilidade média ou baixa, não são descartáveis — são condicionados. Governança multipartidária, marco normativo específico e modelo de financiamento sustentável dependem de condições que precisam ser construídas, não importadas. Reconhecer essa distinção é o que diferencia adaptação informada de imitação acrítica. É também o ponto de partida para o modelo de convergência estratégica proposto no Capítulo IV, que toma esses princípios como insumo e os articula às especificidades institucionais, normativas e técnicas do contexto federal brasileiro.

A transformação digital no setor público tem se apoiado, em diferentes contextos nacionais, na constituição de infraestruturas digitais capazes de garantir interoperabilidade, segurança e inclusão. Este capítulo analisou a noção de *Digital Public Infrastructure* (DPI), destacando experiências internacionais, e discute sua relação com a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) no Brasil, recentemente institucionalizada. Ao longo da análise, buscou-se evidenciar benefícios, limitações e potenciais de convergência entre os dois modelos, culminando em uma síntese crítica que prepara o terreno para a proposição teórica do capítulo seguinte.

4. INFRAESTRUTURA DIGITAL PÚBLICA (DPI)

4.1 Conceituação: da infraestrutura tradicional à digital

A compreensão do conceito de Infraestrutura Digital Pública (DPI) requer, inicialmente, uma reflexão sobre a própria noção de infraestrutura e sua evolução histórica. A etimologia do termo remonta ao latim, significando literalmente "aquilo que está abaixo da estrutura". Engenheiros franceses do século XIX utilizaram o termo para descrever estruturas físicas como escavações, aterros, túneis e pontes que sustentavam ou literalmente ficavam abaixo de "superestruturas" como ferrovias e reservatórios de água (Carse, 2016). Durante a Guerra Fria, o termo foi popularizado e expandido semanticamente quando o presidente norte-americano *Eisenhower* o empregou para justificar a construção de instalações militares (infraestrutura) que pudessem "suportar" as capacidades compartilhadas da OTAN. Essa expansão conceitual foi sutil, mas fundamental: infraestrutura deixou de significar apenas "o que está literalmente abaixo" para incorporar uma ideia mais ampla de uso coletivo e essencialidade para o funcionamento sistêmico.

Na contemporaneidade, o conceito de infraestrutura expandiu-se significativamente para além do domínio físico, abrangendo dimensões sociais, institucionais e digitais, embora as definições dicionarizadas ainda se inspirem predominantemente na noção de infraestrutura física. O *Oxford Dictionary* define infraestrutura como "as estruturas físicas e organizacionais básicas e instalações (por exemplo, edifícios, estradas, fornecimento de energia) necessárias para o funcionamento de uma sociedade ou empresa", enquanto o *Cambridge Dictionary* a conceitua como "os sistemas e serviços básicos, como transporte e fornecimento de energia, que um país ou organização usa para funcionar efetivamente".

(Frischmann, 2012) oferece uma definição funcional de infraestrutura que transcende o domínio físico e possui particular relevância analítica: infraestruturas são "meios compartilhados para muitos fins" (*shared means to many ends*). Esta conceituação é valiosa por dois motivos fundamentais. Primeiro, por sua natureza holística, agrupando não apenas infraestruturas físicas, mas também sociais, institucionais e digitais. Segundo, por enfatizar elementos considerados essenciais na análise de qualquer infraestrutura: o uso comunal ("meios compartilhados") e as múltiplas possibilidades de utilização ("para muitos fins"). Segundo o autor, para que um recurso seja considerado infraestrutura, deve satisfazer três critérios: (i) o

recurso deve ser consumido de forma não-rival⁹ dentro de uma faixa apreciável de demanda; (ii) a demanda social pelo recurso é impulsionada primariamente por atividades produtivas posteriores que requerem o recurso como insumo; e (iii) o recurso pode ser usado como insumo em uma ampla gama de bens e serviços, podendo incluir bens privados, bens públicos e bens sociais.

O primeiro critério reflete a natureza "compartilhável" dos recursos infraestruturais, isto é, não são sempre bens públicos puros, pois se a demanda for excessivamente alta, o recurso pode não acomodar a capacidade requerida. No domínio digital, se o uso de uma infraestrutura digital depende de capacidade limitada de armazenamento ou processamento, então ela constitui um bem público impuro. O segundo critério associa-se à noção de infraestrutura como "meios", ou seja, em termos econômicos, bens de capital ou recursos de capital intermediário. Por fim, o terceiro critério enfatiza a genericidade de propósito, isto é, que infraestruturas são utilizadas "para muitos fins", podendo ser serviços e outros bens.

No domínio digital, infraestruturas são recursos digitais, tais como sistemas e especificações, construídos como meios compartilhados para múltiplos fins. Em outras palavras, recursos digitais são considerados infraestrutura quando diferentes atores sociais podem aproveitá-los para diversas possibilidades de uso. Quando o termo infraestrutura digital é empregado, muitos ainda o associam às infraestruturas de telecomunicações físicas que viabilizam a era digital: cabos de internet, centros de dados e redes de transmissão. Outros o associam à própria internet, que constitui o exemplo mais proeminente de como software (instruções, protocolos), combinado com hardware (computadores, cabos), pode constituir infraestrutura digital. Desde que tenham acesso a um dispositivo e boa conexão, qualquer pessoa, empresa ou entidade pode utilizar a internet para conduzir pesquisas, conectar-se com outras pessoas, engajar-se em comércio, jogar e realizar inúmeras outras atividades.

Esta pesquisa não se concentra nos protocolos da internet e nas infraestruturas físicas que os suportam. Em vez disso, foca em uma camada emergente de infraestrutura digital que atualmente se situa acima das camadas de hardware e protocolos da internet, emergindo como uma nova forma de infraestrutura essencial para o funcionamento dos mercados e

9 Não-rivalidade (non-rivalry) é característica de bem cujo consumo por uma pessoa não reduz quantidade ou qualidade disponível para outras. Dados são exemplo clássico de bem não-rival: múltiplos usuários podem acessar mesma informação simultaneamente sem depleção do recurso. Contrasta com bens rivais (alimentos, combustível, espaço físico) onde consumo por um indivíduo impede ou reduz disponibilidade para outros. Conceito fundamental em economia da informação e análise de infraestruturas digitais, onde custos marginais de replicação tendem a zero.

sociedades modernas, tais como identidades digitais, sistemas de pagamento e camadas de troca de dados. A literatura sobre infraestrutura digital remonta ao início dos anos 2000, quando os termos infraestrutura de informação (Hanseh; Lyytinen, 2010) ou e-infraestrutura (Edwards et al., 2009) eram utilizados para descrever infraestruturas como a internet: em rede, interoperáveis, heterogêneas.

Particularmente útil para compreender a infraestrutura digital é conceituá-la como uma pilha digital (*digital stack*). Em termos gerais, a lógica da pilha é que cada camada está conectada às camadas acima e abaixo, e as camadas superiores aproveitam os recursos criados nas camadas inferiores. A camada de infraestrutura fornece os recursos compartilhados que conectam as camadas de dados e hardware às múltiplas camadas de serviços e casos de uso que podem emergir. A infraestrutura compartilhada pode ser fornecida tanto por organizações públicas quanto privadas, ou mesmo codesenvolvida por diferentes instituições.

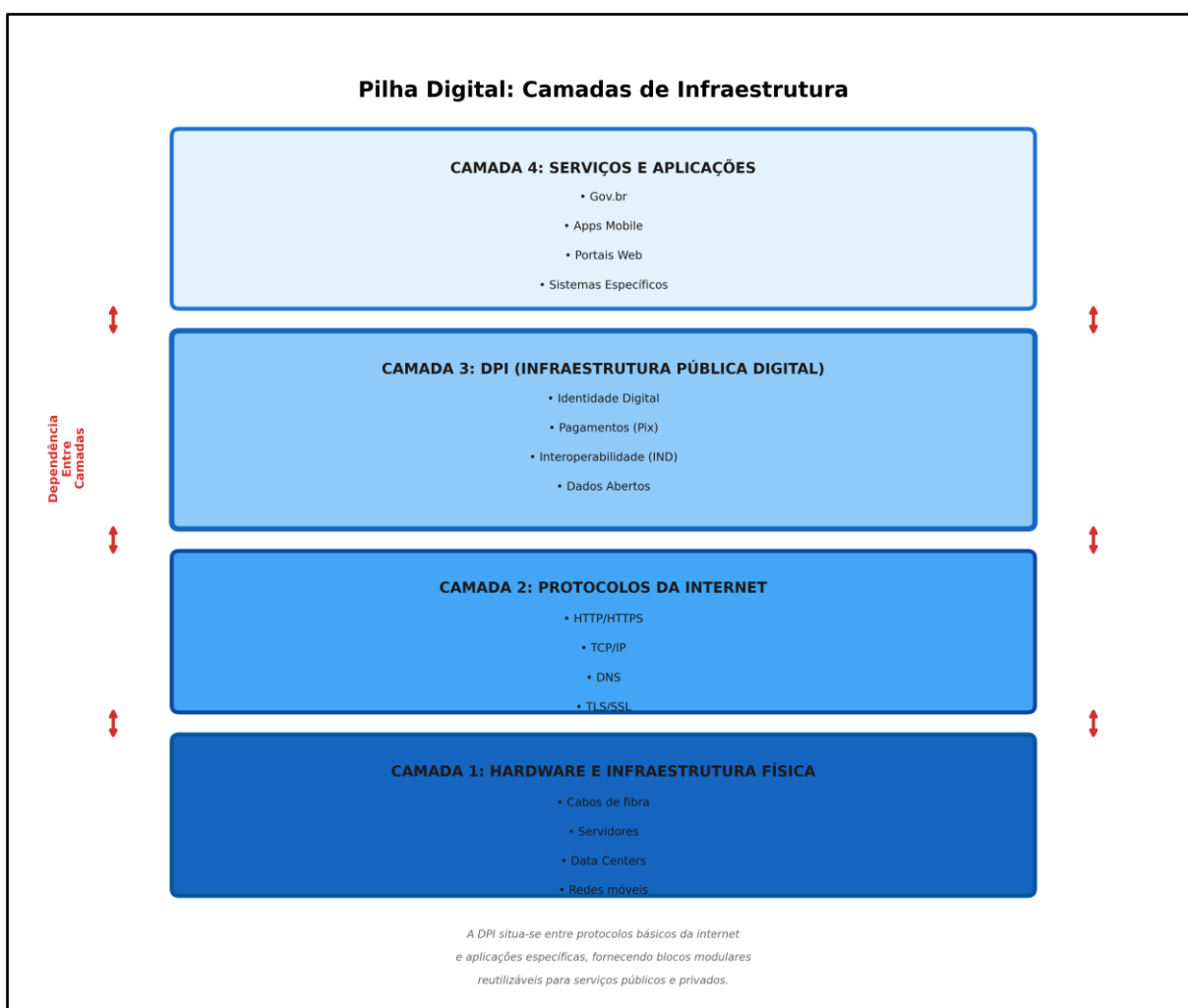


Figura 4 – Pilha Digital: Camadas de Infraestrutura.

Fonte: Elaboração própria baseada em (Yoo et al., 2010) e conceito de *digital stack*.

4.2 Atributos técnicos de DPI

(Mazzucato; Eaves; Vasconcellos, 2024), (Eaves; Vasconcellos, 2024) argumentam que a compreensão da "publicidade" (*publicness*) da DPI não pode ser assumida como neutra, mas está incorporada com valores, pressupostos e direções de impacto criados pela infraestrutura. Os autores identificam diferentes formas pelas quais os benefícios públicos gerados por infraestruturas tradicionais podem ser enquadrados e aplicados à DPI: por atributos e por funções da infraestrutura. No enquadramento por atributos, grupos focam nos benefícios habilitados pelos atributos técnicos da infraestrutura digital, tais como ser construída com padrões abertos ou blocos de construção reutilizáveis. Os atributos técnicos estão incorporados em um paradigma normativo que valoriza eficiência dinâmica e escalabilidade.

Tabela 7 – Seis Atributos de Infraestrutura Pública Digital

Atributo DPI	Descrição e Importância
Interoperabilidade	Capacidade de diferentes sistemas e organizações trabalharem juntos mediante protocolos e padrões comuns. Essencial para quebrar silos institucionais e permitir compartilhamento de dados entre órgãos públicos de diferentes níveis de governo.
Modularidade	Arquitetura em componentes independentes e substituíveis. Permite implementação gradual, reduz dependência de fornecedores únicos, facilita manutenção e evolução do sistema conforme novas necessidades surgem.
Portabilidade	Capacidade de cidadãos e organizações moverem seus dados entre diferentes serviços sem perda de funcionalidade. Promove competição entre prestadores de serviços e evita aprisionamento tecnológico (<i>vendor lock-in</i>).
Abertura	Código-fonte aberto, padrões públicos, documentação acessível. Aumenta transparência, permite auditoria independente, facilita adoção e adaptação por diferentes contextos nacionais e institucionais.
Escalabilidade	Capacidade de expandir para atender crescimento de usuários, transações e dados sem degradação significativa de desempenho. Crítico para países de grande população como Brasil e Índia.
Minimização de dados	Princípio de compartilhar apenas dados estritamente necessários para finalidade específica, mantendo-os sob custódia da instituição originária. Alinha-se com LGPD e aumenta segurança ao reduzir superfície de ataque.

Fonte: Adaptado de (Mazzucato et al., 2024) e (Fetter et al., 2025).

4.3 Interoperabilidade através de padrões abertos

Uma das formas pelas quais a infraestrutura tradicional gera eficiência dinâmica é fomentando a concorrência através da interoperabilidade. A interoperabilidade assegura interação e colaboração contínuas entre várias entidades dentro de sistemas compartilhados, facilitando a competição em diversos setores. A padronização de protocolos da rede elétrica constitui exemplo paradigmático: normas técnicas comuns entre os diversos elementos da rede – transformadores, medidores, sistemas de controle e até portas de tomadas – habilitaram alto nível de interoperabilidade. Esta uniformidade nos protocolos de comunicação permite que diferentes equipamentos e tecnologias de vários fabricantes se integrem à rede de forma contínua, criando ambiente competitivo onde várias entidades podem contribuir com soluções e serviços inovadores.

No espaço digital, uma das interpretações da publicidade da DPI argumenta que esta pode também aumentar a competição se for construída seguindo os atributos de padrões interoperáveis. A interoperabilidade ajuda a prevenir problemas de aprisionamento (*lock-in*) e legado comumente associados a sistemas de TI (Bispal et al., 1999). Adicionalmente, os investimentos iniciais em DPI não são da mesma magnitude que investimentos em infraestrutura física de grande escala. Quando uma infraestrutura digital segue padrões abertos e interoperabilidade, "meios compartilhados para fins" torna-se mais poderoso: "meios universalmente compartilhados para muitos fins". O Center for Digital Public Infrastructure tem sido importante defensor da interoperabilidade como atributo fundamental que define a publicidade da DPI, considerando-a a primeira e talvez mais importante característica que distingue esforços regulares de digitalização da abordagem DPI, pois cria escolha individual e impulsiona a competição de mercado (Center for Digital Public Infrastructure, 2023).

Sob a perspectiva de atributos de publicidade, Amazon Web Services (AWS), por exemplo, não é considerada DPI porque sua arquitetura não segue padrões abertos interoperáveis. Como outros grandes provedores de nuvem, a AWS introduz estrategicamente serviços proprietários para criar diferenciação e fomentar aprisionamento de fornecedor (*vendor lock-in*), dificultando que clientes façam transição para plataformas alternativas. Embora esta abordagem promova inovação rápida e otimização dentro de seu sistema, levanta preocupações sobre as implicações de longo prazo da interoperabilidade limitada e desafios potenciais para clientes que buscam flexibilidade e liberdade de um único provedor. Em outras palavras, a AWS não oferece "meios universalmente compartilhados para muitos fins".

Um exemplo de como padrões interoperáveis de DPIs moldam a competição é o Pix¹⁰, infraestrutura digital de pagamentos instantâneos do Brasil, operada pelo Banco Central. Antes do Pix, cada instituição financeira utilizava seus próprios sistemas de transação e estabelecia suas próprias taxas. Os bancos competiam por taxas de transação e o mercado era altamente concentrado. Após o Pix, que permite pagamentos instantâneos a custo zero para cidadãos e opera em arquitetura interoperável do Banco Central, a competição deslocou-se das taxas para focar na qualidade e quantidade de serviços que as instituições financeiras oferecem.

4.4 Construída usando blocos de construção reutilizáveis

Uma das interpretações da arquitetura digital modular em camadas delineada por YOO et al. (2010) é que infraestruturas digitais não são apenas módulos, mas podem ser divisíveis e criar subcomponentes modulares ainda mais poderosos. Infraestruturas analógicas não possuem esta característica, pois são tecnicamente indivisíveis. Uma analogia útil seria pensar em blocos de construção reutilizáveis como peças de Lego. "Tijolos de Lego" digitais estão associados a poderosa capacidade de inovação e escalabilidade, uma vez que os blocos de construção, como peças de Lego, podem ser usados para construir muitos outros bens, serviços e infraestruturas. (McAfee; Brynjolfsson, 2017) descrevem o potencial da inovação combinatória de blocos de construção reutilizáveis como "criar algo novo e valioso não começando do zero, mas reunindo de novas formas coisas que já estavam presentes (talvez com alguns ingredientes geralmente novos)".

A (*Digital Public Goods Alliance, 2022*) *Community of Practice da Digital Public Goods Alliance (2022)* conceituou blocos de construção reutilizáveis como parte de "ecossistemas DPI". Segundo eles, bens públicos digitais (DPGs) e blocos de construção constituem a DPI de um país. Nesta definição, compartilhada pelo Center for Global Development (2021), blocos de construção reutilizáveis são "código de software, plataformas e aplicações que são interoperáveis, fornecem serviço digital básico em escala e podem ser reutilizados para múltiplos casos de uso e contextos". Nesta definição, blocos de construção reutilizáveis possuem quatro características que constituem arquitetura de microsserviços: (i) autônomos: fornecem serviço ou conjunto de serviços standalone e reutilizáveis; podem ser

10 Pix é o Sistema de Pagamentos Instantâneos do Banco Central do Brasil, lançado em novembro de 2020. Permite transferências financeiras em menos de 10 segundos, 24 horas por dia, 7 dias por semana, com custo zero para pessoas físicas. Ultrapassou 160 milhões de usuários cadastrados e processa mais de 40 bilhões de transações anuais (2024), tornando-se um dos maiores sistemas de pagamentos instantâneos do mundo. Considerado caso de sucesso de DPI brasileira, democratizou acesso a serviços financeiros digitais, incluindo 70% da população anteriormente não-bancarizada.

compostos de muitos módulos/microserviços; (ii) genéricos: são flexíveis entre casos de uso e setores; (iii) interoperáveis: devem ser capazes de combinar, conectar e interagir com outros blocos de construção; (iv) evolvibilidade iterativa: podem ser melhorados mesmo enquanto estão sendo usados como parte de soluções.

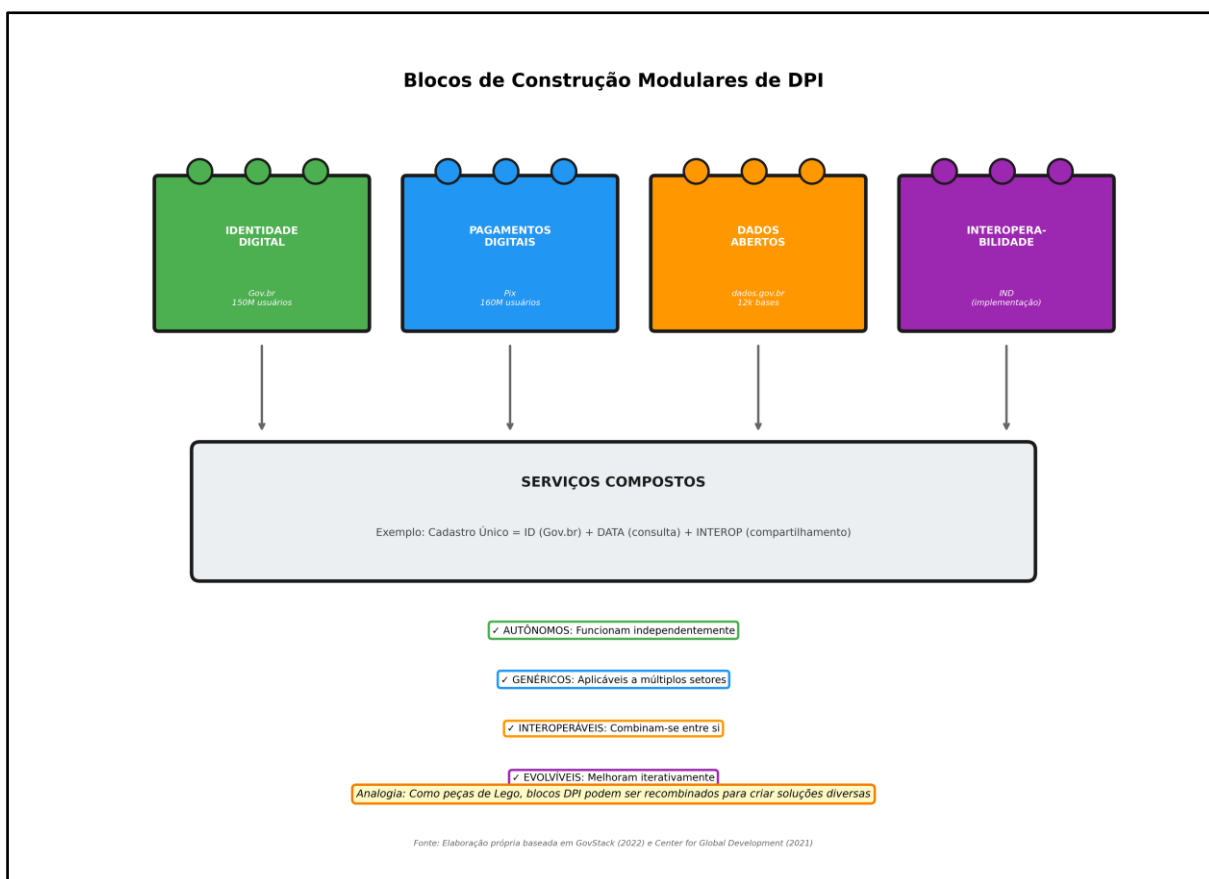


Figura 5 – Blocos de Construção Modulares de DPI

Fonte: Elaboração própria baseada em (Digital Public Goods Alliance, 2022) e *Center for Global Development* (2021).

Um exemplo de blocos de construção reutilizáveis pode ser encontrado no projeto *Sunbird* da Índia. Em 2017, financiado pela *EkStep Foundation*, o *Sunbird* começou a construir infraestrutura digital modular, livre e de código aberto (FOSS) baseada nas funções essenciais desempenhadas na escola. *Anuvaad*, módulo que fornece capacidades de tradução para línguas índicas, é uma das iniciativas do *Sunbird*. Como bloco de construção, *Anuvaad* pode ser usado e integrado em qualquer solução em educação e outros setores da administração geral. Por exemplo, *Anuvaad* é usado na Plataforma Nacional de Educação da Índia (*Diksha*) e *SUVAS*, software lançado em 2019 pela Suprema Corte da Índia para traduzir documentos oficiais, demonstrando que a arquitetura de blocos de construção (ou microserviços) pode ajudar a criar soluções para diferentes usos através de suas características de "plug and play".

4.5 Construída usando licenças de código aberto

Em economia, infraestruturas são caracterizadas por seu potencial de criar externalidades positivas (Otto; Voss, 1995), tipicamente associadas a serem bens públicos "impuros". Um bem público "puro" possui dois atributos fundamentais: (i) não-excludabilidade e (ii) não-rivalidade. Um bem é considerado não-excludável quando é custoso ou impossível para um usuário excluir outros de seu uso. Um exemplo é o CDC COVID Data Tracker, livremente disponível para qualquer pessoa no mundo que queira visualizar, comparar ou analisar dados padronizados de COVID (CDC, 2023). Um bem é não-rival quando seu consumo por uma pessoa não reduz a quantidade disponível para outros. Dados, por exemplo, são não-rivais porque não há restrições de escassez em seu consumo. A diferenciação entre bens privados baseados em mercado e bens públicos não-lucrativos baseada nos atributos de excludabilidade e rivalidade origina-se da teoria microeconômica neoclássica e economia do bem-estar, fundamentada no pressuposto de que indivíduos perseguindo seu auto-interesse em mercados competitivos levam aos resultados mais eficientes (Mas-Colell et al., 1995; Samuelson, 1947). Contudo, na prática, muito poucos são bens públicos "puros", pois muitos são parcialmente rivais ou parcialmente excludáveis (estradas pedagiadas, por exemplo). Assim, os exemplos típicos de infraestrutura enquadram-se na categoria de bem público "impuro".

No domínio digital, um bem é bem público (impuro) se for universal ou quase universalmente acessível e se houver restrições nulas ou mínimas ao poder de computação e processamento à medida que o número de usuários aumenta. Em termos técnicos, isto ocorre quando a infraestrutura digital é construída com padrões interoperáveis, é reutilizável e usa software de código aberto (ou não é licenciada e está em domínio público). Contudo, esta definição baseada em tecnologia diz pouco sobre os tipos de governança e colaboração necessários para assegurar DPI inclusiva e sustentável do ponto de vista econômico. De fato, de perspectiva tecnológica global, DPI construída em código aberto pode permitir adotabilidade e adaptabilidade da DPI de um país para outras geografias. Dentro de um país, implementar camadas de DPI como código aberto pode permitir mais escrutínio e *accountability*, colaboração com outros implementadores e potencialmente mais confiança na tecnologia. Contudo, tornar DPI código aberto não é panaceia, pois há também muitos outros aspectos necessários se o objetivo é adoção por outros países, sendo relevância o primeiro e mais importante, mas qualidade do código, documentação, governança e suporte também importam.

Um exemplo de DPI de licença aberta é o X-Road¹¹ da Estônia, solução de troca de dados livre e de código aberto. Em novembro de 2023, pelo menos 22 países haviam implementado alguma versão do X-Road e beneficiaram-se das externalidades positivas da troca de dados e de não ter que projetar seu próprio sistema (X-Road Global, 2023). Também gerou vários clones proprietários – frequentemente da mesma base de código aberto – que oferecem serviço similar, mas com software proprietário e licenças comerciais, como *Cybernetica e Roksnet*.

4.6 Perspectivas funcionais de valor público

O segundo enquadramento para compreender a publicidade da DPI deriva de uma visão funcional de infraestrutura, que compreende os benefícios sociais através dos diferentes propósitos sociais que ela alcança. Por exemplo, (Eaves; Sandman, 2023) definem DPI como "capacidades digitais à escala social essenciais para participação na sociedade e mercados como cidadão, empreendedor e consumidor em era digital". Outro exemplo funcional vem de (Zuckerman, 2020), que enfatiza o papel da DPI em habilitar vida cívica em espaços digitais. Embora possa haver várias perspectivas funcionais, aqui focamos nas mais pronunciadas, que estão mais diretamente associadas a valores normativos, tais como valor social, valor econômico, capacidades, direitos humanos e necessidades essenciais.

4.7 Fomentar comunidade e relações sociais

A noção de que infraestrutura cria valor social baseia-se em seu potencial de ajudar a moldar vida comunal, não individual. Nesta narrativa, geralmente pronunciada por antropólogos e cientistas sociais, os aspectos de interconexão e relacionais da infraestrutura a tornam pública. Recursos infraestruturais que geram valor social incluem parques, espaços públicos e até a internet. Alguns discursos que destacam o valor social da infraestrutura a definem como: as fundações materiais e organizacionais da existência coletiva; as redes, sistemas e instituições que ligam pessoas, lugares e coisas; aqueles espaços físicos nos quais interações regulares são facilitadas entre e dentro de diversas seções de comunidade, e onde relações significativas, novas formas de confiança e sentimentos de reciprocidade são

11 X-Road é o sistema estoniano de interoperabilidade governamental, operacional desde 2001. Conecta 2.000+ instituições públicas e privadas, processando 2+ bilhões de transações anuais na Estônia. Disponível como código aberto (licença MIT) desde 2017, foi adotado por 60+ países em diferentes estágios de implementação, incluindo Finlândia, Islândia, Namíbia e Brasil (estados de Mato Grosso e Piauí). Governado internacionalmente pelo NIIS (*Nordic Institute for Interoperability Solutions*), organização sem fins lucrativos fundada por Estônia e Finlândia.

inculcados entre pessoas locais; e cuja função principal é fomentar relações inter e intracomunais (The Bennett Institute, 2021).

No espaço DPI, a voz mais proeminente neste discurso é (Zuckerman, 2020), que define DPI como "as infraestruturas que nos permitem engajar em vida pública e cívica em espaços digitais". Focando principalmente em mídia pública e social, argumenta que apenas algumas infraestruturas digitais são projetadas primariamente para objetivos cívicos, sugerindo que DPIs poderiam ser construídas com mais propósito e intenção em direção ao bem comum.

4.8 Fomentar atividade econômica

Nesta perspectiva, tipicamente pronunciada por economistas, infraestrutura pública é justificada pelo valor econômico que cria. No domínio DPI, esta narrativa é particularmente forte em economias em desenvolvimento. Países tendem a destacar dois potenciais: primeiro, a noção de que DPI suporta economia digital com potencial de crescimento econômico; segundo o potencial da DPI para acelerar desenvolvimento econômico (Mukherjee; Maruwada, 2021), geralmente focando nos mais vulneráveis. Por exemplo, o programa *Identity for Development* (ID4D) do Banco Mundial estrutura-se em torno do pressuposto de que produzir prova de identidade está associado a várias dimensões de desenvolvimento (World Bank, 2022).

A Índia, uma das líderes no espaço DPI e anfitriã das reuniões do G20 em 2023, utilizou este discurso para justificar a construção de sua identidade digital (Aadhaar), sistema de pagamentos aberto (UPI) e camada de dados baseada em consentimento. Os três juntos constituem o *India Stack*, exemplificando como DPI pode mobilizar potencialidades de agentes econômicos e melhorar inclusão financeira.

4.9 Garantir capacidades essenciais

A visão de capacidades essenciais do valor gerado por infraestrutura destaca seu potencial de fornecer capacidades para agentes sociais prosperarem em papéis sociais, econômicos, políticos, cívicos, comunais ou familiares. Esta visão é influenciada pela abordagem de capacidades de (Sen, 1985), que afirma que bem-estar deve ser compreendido em termos de capacidades e funcionamentos das pessoas. Para Sen, capacidades são "os fazeres e seres que pessoas podem alcançar se assim escolherem" e funcionamentos são capacidades que foram realizadas. Este discurso enquadra-se na categoria funcional porque uma capacidade

é alcançada se um conjunto de meios (ou recursos infraestruturais) pode ser convertido em funcionamento, por exemplo, a capacidade de participar na economia digital.

No espaço digital, este discurso tem sido um dos mais populares para justificar a publicidade de infraestruturas digitais. O argumento segue o entendimento de (Sen, 1985) sobre direitos humanos: se uma pessoa não tem as capacidades para participar em sociedade digital, a pessoa é excluída de oportunidades e perde sua liberdade. Este é o pressuposto subjacente à definição de (Eaves; Sandman, 2023) de DPI como "capacidades digitais à escala social que são essenciais para participação na sociedade e mercados como cidadão, empreendedor e consumidor em era digital". Através das lentes de capacidades, há consenso em torno de três tipos de DPI – compartilhamento de dados, identidade digital e camadas de pagamento digital – embora estas categorias estejam evoluindo.

4.10 Garantir melhor qualidade de vida

Nesta perspectiva, a publicidade da infraestrutura é justificada pela garantia de necessidades humanas essenciais (Buhr, 2003). Por exemplo, a necessidade de cuidado médico é atendida pelo fornecimento de hospitais, que são bens de capital e tipo específico de infraestrutura material (Torrise, 2009). No domínio físico, (Buhr, 2003) forneceu categorização de infraestruturas materiais necessárias para necessidades físicas essenciais (calor, saúde, água, luz e proteção contra natureza) e necessidades sociais (segurança, informação, educação, mobilidade e proteção ambiental). Este enquadramento intersecta-se com perspectiva de direitos humanos: o acesso a estas infraestruturas não é meramente questão de interesse ou conveniência, mas questão de defender dignidade humana e assegurar igualdade de oportunidades.

No domínio digital, o direito a identidade, promovido pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 16.9 das Nações Unidas de "fornecer identidade legal para todos, incluindo registro de nascimento" até 2030, tem sido um dos argumentos mais evocados para fornecer IDs digitais como DPI. Esta perspectiva também está começando a desenvolver-se para DPI setorial em áreas como saúde, educação, mobilidade e segurança, necessitando discurso em torno de DPI que se estenda além de seus aspectos técnicos, advogando por DPI como elemento pivotal de sociedades justas, onde a divisão digital é abordada não apenas como desafio tecnológico, mas também como questão de direitos humanos.

4.11 Governança para o bem comum (*Common Good Framework*)

(Mazzucato; Eaves; Vasconcellos, 2024), (Eaves; Vasconcellos, 2024) argumentam que, embora a construção de DPI com perspectiva de atributos para criação de valor público instantaneamente crie benefícios sociais – como projetar DPI para ter padrões abertos, ser construída com componentes reutilizáveis e software de código aberto, contribuindo para muitos ganhos de eficiência dinâmica (tais como aumento e melhoria da concorrência, efeitos de rede e circulação e disseminação de conhecimento na economia) –, a perspectiva de atributos é amplamente agnóstica quanto à direção dos resultados. Pressupõe que inovação emergindo das infraestruturas criará spillovers positivos em diferentes mercados e formatos, e estes não devem ser restringidos ou pré-definidos. Embora esta seja indubitavelmente consequência positiva dos atributos, sua desvantagem é possivelmente desperdiçar investimento e esforços de implementação de DPI em áreas que não são relevantes para políticas ou prioridade.

Em contraste, perspectivas funcionais, por definição, explicitam direção para impacto social. Por exemplo, discurso baseado em necessidades justificaria construir DPI para bens essenciais habilitando existência humana, o que é escopo restrito para impacto da DPI. Contudo, perspectiva puramente funcional também é limitante. Se DPI é construída com função específica em mente, mas não está em conformidade com atributos, pode desperdiçar oportunidade de impacto social e ser menos resiliente a mudanças políticas. Por exemplo, construir identidades digitais que não são reutilizáveis, interoperáveis e abertas não maximiza o impacto que ocorre quando a ID digital é projetada para múltiplos casos de uso e em escala. Características também são complicadas de mudar ao longo do tempo, enquanto líder mal-intencionado pode reorganizar governança mais facilmente. Portanto, são críticas para sustentabilidade e durabilidade de valores públicos.

Se há preocupação genuína com maximização de valor público, compreender o "P" de DPI através de perspectiva funcional e de atributos combinada é desejável, porque expande o potencial de criar benefícios públicos. Contudo, apenas responder quais valores públicos estão incorporados na DPI não é suficiente. Pelo menos dois argumentos podem ser feitos: primeiro, sobre governança – embora tanto perspectivas de atributos quanto funcionais sozinhas criem alguma forma de valor, nenhuma responde pelos processos que cercam criação e maximização de valor e as implicações de economia política. Por exemplo, nada intrínseco aos atributos ou funções da DPI cria inclusão, transparência e confiança; estes são alcançados não apenas através de características, mas também através de processos, isto é, governança. Segundo ambos os discursos são amplamente silenciosos sobre o papel do Estado.

Alcançar objetivos ambiciosos alinhados com valores públicos requer governos proativos que estabeleçam a direção para ação coletiva necessária (Mazzucato; Ryan-Collins, 2022). Assim, como maximizar valor público? A chave é entender criação de valor público como processo cocriado pelos setores público e privado, não apenas criado por um e corrigido pelo outro. Na prática, esta concepção de criação de valor público significa que objetivos sociais amplamente aceitos podem ser alcançados em processos de inovação colaborativa entre diferentes atores sociais que co-criam mercados (Mazzucato, 2016). Para gerar efetivamente tais resultados, disponibilidade de expertise e competências é essencial no planejamento, implementação, gestão e coordenação entre vários grupos de interesse (Mazzucato; Kattel, 2019).

(Mazzucato, 2023) propõe framework do "bem comum" (*common good*), que constitui princípio filosófico que se estende além da mera obtenção de objetivos comuns, destacando os processos comuns e relacionamentos necessários para alcançá-los. Aplicado à economia, move-se além de maximizar preferências individuais e criar resultados Pareto-eficientes como objetivo último da atividade econômica. Mostra que o "como" de uma jornada em direção a objetivo é tão crucial quanto o destino em si. Framework do "bem comum" pode fortalecer maximização de valor público através de modelo de governança impactante para DPI. Em contraste com visões convencionais sobre bem público e até o interesse público amplamente definido, o bem comum não é correção, mas objetivo ousado alcançado coletivamente.

O bem comum constrói a partir das discussões em torno de publicidade, porque o primeiro passo para o bem comum é saber o que considerar para criar valor público. Apenas então pode mover-se para o estágio de articular objetivos coletivos e governar a economia para o bem comum. No framework do bem comum, o processo é quase tão importante quanto o resultado e, portanto, questões de governança são críticas. Afinal, mercados são resultados de governança. Assim, em vez de focar em falha de mercado ou neutralidade da DPI, formas mais proativas de governança que podem gerar resultados de mercado desejáveis são necessárias (Mazzucato, 2016).

Compreensão renovada do papel do Estado como moldador de mercado e empreendedor é central à noção de bem comum. O papel proativo do Estado foi conceituado no Estado empreendedor (Mazzucato, 2013), construindo sobre visões de (Polanyi, 1944) de mercados como cocriados pelo Estado. Isto requer compreender o papel do setor público não apenas como reguladores de mercado, mas também como moldador e potencialmente até como investidor ou coinvestidor de primeira instância, não última, capaz de influenciar a qualidade dos resultados de mercado. Tal papel requer não apenas habilidades burocráticas, mas visão e

expertise específica de tecnologia e setores reais. Contudo, porque a contribuição do Estado foi subestimada, o potencial completo do Estado como inovador e criador de valor não foi realizado.

(Mazzucato, 2023) propõe cinco pilares para governança orientada ao bem comum, cuja aplicação ao contexto de DPI pode ser sistematizada conforme demonstrado na Tabela 8. [OBJ]

Tabela 8 – Framework do Bem Comum Aplicado à DPI

Pilar	Descrição Conceitual	Aplicação à Infraestrutura Digital Pública
1. Propósito e Direção	Estabelecer direção ambiciosa em direção à qual políticas podem ser projetadas, parcerias formadas e cidadãos engajados	DPI orientada a objetivos explícitos de inclusão financeira, acesso universal a serviços e redução de desigualdades, não apenas eficiência administrativa
2. Co-criação e Participação	Definir regras e mecanismos para co-investimento, colaboração e coordenação envolvendo grupo diverso de atores sociais	Governança compartilhada entre governo, setor privado e sociedade civil no design e implementação da DPI, com stakeholders como co-criadores ativos
3. Aprendizado Coletivo e Compartilhamento de Conhecimento	Repensar práticas institucionais que suportam aprendizado coletivo e constroem capacidades de longo prazo	Código aberto, documentação técnica acessível e formação de comunidades de prática que permitem jurisdições aprenderem umas com as outras
4. Acesso para Todos e Compartilhamento de Recompensas	Assegurar que valor público seja distribuído equitativamente, promovendo crescimento inclusivo	DPI projetada desde início para ser universalmente acessível, incluindo alternativas analógicas onde necessário, com benefícios econômicos distribuídos equitativamente
5. Transparência e Accountability	Ganhar e reter confiança dos cidadãos através de práticas que demonstram compromisso com transparência e prestação de contas	Cidadãos podem auditar uso de seus dados, decisões técnicas documentadas publicamente, mecanismos claros de prestação de contas

Fonte: Adaptado de (Mazzucato, 2023) e aplicado ao contexto de DPI por (Mazzucato; Eaves; Vasconcellos, 2024).

A aplicação deste *framework* ao contexto da DPI significa garantir que a construção e governança da infraestrutura digital incorporem explicitamente estes cinco pilares, transcendendo abordagens puramente técnicas ou exclusivamente focadas em eficiência administrativa.

No contexto da DPI, aplicar o *framework* do bem comum significa garantir que a construção e governança da infraestrutura digital incorporem explicitamente estes cinco pilares. Por exemplo, o propósito e direção no caso da DPI implicam que sua construção não seja meramente reativa ou agnóstica em relação a resultados, mas orientada por objetivos de política pública claramente articulados, como inclusão financeira, acesso a serviços públicos ou redução de desigualdades. A cocriação e participação exigem mecanismos institucionais que permitam que diferentes *stakeholders* – governo, setor privado, sociedade civil e cidadãos – participem ativamente do design e implementação da DPI, não apenas como consultados, mas como cocriadores.

O aprendizado coletivo e compartilhamento de conhecimento são habilitados quando DPI é construída em código aberto e com documentação adequada, permitindo que diferentes jurisdições aprendam umas com as outras e adaptem soluções às suas realidades específicas. O acesso para todos e compartilhamento de recompensas requer que DPI seja projetada desde o início para ser universalmente acessível, incluindo através de meios analógicos onde necessário, e que os benefícios econômicos gerados pela infraestrutura sejam equitativamente distribuídos, não capturados por poucos atores privados. Finalmente, transparência e *accountability* na DPI significam que cidadãos possam auditar como seus dados são usados, que decisões técnicas e de governança sejam documentadas publicamente, e que existam mecanismos claros de prestação de contas.

4.12 DPI e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Infraestrutura Pública Digital (DPI) refere-se a conjunto de sistemas digitais compartilhados que funcionam como utilidades públicas essenciais para economia e sociedade digitais, análogo a estradas, energia elétrica ou saneamento básico na era analógica (Mazzucato et al., 2024; Fetter et al., 2025). Diferentemente de plataformas privadas proprietárias (Facebook, Google) que extraem valor mediante captura de dados e efeitos de rede excludentes, DPIs são abertas, interoperáveis e orientadas ao bem público—permitem que múltiplos atores (governos, empresas, ONGs, cidadãos) construam serviços sobre infraestrutura comum sem necessidade de cada um criar camadas básicas redundantes.

Segundo (Mazzucato; Eaves, 2024), DPI distingue-se por três características fundamentais:

- (1) bem público: acesso não-excludente e não-rivalizado, onde uso por um cidadão não impede uso por outros;
- (2) geração de externalidades positivas: benefícios transbordam para toda sociedade (maior eficiência administrativa, inclusão digital, redução de fraudes);
- (3) falha de mercado: provisão privada seria subótima porque empresas não capturam todo valor social gerado, justificando liderança estatal. Exemplos consolidados internacionalmente incluem sistema X-Road estoniano (interoperabilidade de dados governamentais), UPI indiano (pagamentos

instantâneos), *Aadhaar* indiano¹² (identidade biométrica), e iniciativas europeias como EIDAS (Identidade Digital Transnacional). No Brasil, a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) e o sistema Pix (pagamentos instantâneos do Banco Central) representam implementações emergentes desse paradigma.

Evidências preliminares de que DPI pode fornecer impulso muito necessário para cumprir compromissos dos ODS e fomentar inclusão financeira têm particularmente despertado interesse de governos e organizações internacionais e da sociedade civil. Um exemplo é a *Unified Payments Interface* (UPI)¹³, protocolo de pagamento digital criado pelo governo indiano. Através de interoperabilidade e fornecendo plataforma neutra para qualquer pessoa no ecossistema de pagamentos, a UPI reduziu os custos de transações digitais e tornou a provisão de serviços financeiros mais acessível para centenas de milhões de pessoas. Hoje, vendedores de rua podem até vender xícaras de chai de 10 centavos usando sistemas de pagamento habilitados por UPI conectados a alto-falantes que confirmam oralmente a transação para analfabetos (Parkin, 2023)¹⁴.

Transformações similares são esperadas em outras áreas de política. O UNDP (2023) estima que até 2030, abordagem DPI poderia levar a crescimento potencial de 20-33% através de DPI financeira, redução de aproximadamente 4% nas emissões de carbono através de DPI de comércio de carbono, e aumento de 28-42% no acesso à justiça à medida que DPI facilita gestão de casos mais rápida e resolução aberta e confiável de disputas (ODR). Estas projeções ilustram o potencial transformador da DPI quando adequadamente governada e orientada para objetivos de desenvolvimento específicos.

A entrada oficial da DPI no léxico de política global em 2023 foi encapsulada pela declaração conjunta consensual do G20 *Digital Economy Working Group* em agosto daquele ano, delineando a relevância da DPI em fomentar economias inclusivas e atingir os

12 Aadhaar é o sistema de identificação biométrica da Índia, maior do mundo com 1,3 bilhão de cadastrados (99% da população adulta). Utiliza impressões digitais, escaneamento de íris e fotografia facial para autenticação única. Criado em 2009, tornou-se fundamental para inclusão financeira ao permitir que 180 milhões de indianos não-bancarizados acessassem serviços financeiros. Apesar de benefícios documentados, enfrentou controvérsias sobre privacidade e casos de exclusão por falhas biométricas (Totapally et al., 2019; Weitzberg, 2020).

13 *Unified Payments Interface* (UPI) é o sistema indiano de pagamentos instantâneos operado pelo National Payments Corporation of India desde 2016. Processa mais de 9 bilhões de transações mensais (dados de 2024) com custo zero para usuários, democratizando acesso a serviços financeiros digitais. Permite transferências via QR Code, número de telefone ou ID virtual, facilitando adoção por população de baixa literacia digital. Considerada referência global em DPI de pagamentos, inspirou sistemas similares em 60+ países.

14 PARKIN, B. India to expand digital payments with AI-powered voice transactions. Financial Times, London, 19 ago. 2023. Disponível em: <https://www.ft.com/content/a9a11275-a0f5-4f40-99e2-4c532afd77d4>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ODS. Embora ainda não haja definição única para DPI, há consenso em torno de ela ser componentes digitais reutilizáveis que habilitam benefícios públicos em escala social. Três tipos de DPI são amplamente reconhecidos – ID digital, pagamentos e sistemas de troca de dados –, e DPI setorial também estão emergindo em áreas como saúde, educação e mobilidade.

Contudo, é fundamental reconhecer que, se a direção para mudança não for estabelecida com propósito ou, pior, estabelecida com direção errada, DPI – e outras transformações digitais em escala populacional – podem facilitar exclusão estrutural e outros tipos de problemas em escala em toda sociedade. Vários exemplos ilustram os danos potenciais. O *Aadhaar* da Índia teve vários exemplos documentados de exclusão, destacando o risco de parear IDs com acesso a serviços de bem-estar (Totapally et al., 2019). Da mesma forma, no Quênia, IDs mal reconhecidos barraram migrantes e refugiados de programas essenciais de seguridade social (Weitzberg, 2020). Portanto, governança e salvaguardas destes sistemas devem ser estabelecidas para prevenir que infraestruturas sejam mal utilizadas enquanto maximizam criação de valor público.

À medida que mais países embarcam em estratégias para construir DPI, é fundamental compreender o que "público" significa em DPI e como teoria do "bem comum" pode ajudar a fortalecer criação de valor público. A discussão sobre a publicidade da DPI mimetiza debates sobre infraestrutura tradicional, onde dois enquadramentos dominantes emergem: por atributos e funções da infraestrutura. No contexto da DPI, alguns grupos focam nos benefícios habilitados pelos atributos técnicos da infraestrutura digital (interoperabilidade¹⁵, modularidade, código aberto), enquanto outros enfatizam perspectivas funcionais que compreendem benefícios sociais através dos diferentes propósitos sociais que ela alcança (valor social, econômico, capacidades, direitos).

15 Interoperabilidade refere-se à capacidade de diferentes sistemas de informação e organizações trabalharem conjuntamente mediante o uso de padrões técnicos e semânticos comuns, permitindo troca automatizada de dados e coordenação de processos sem necessidade de intervenções manuais ou adaptações *ad-hoc* (ISO/IEC 19941:2017). Sua importância é estratégica para a Administração Pública: sem interoperabilidade, cada órgão opera como silo informacional isolado, obrigando cidadãos a fornecerem repetidamente as mesmas informações e impossibilitando políticas públicas que dependam de visão integrada do Estado. Exemplos práticos ilustram o problema: um cidadão que solicita benefício assistencial precisa levar documentos ao INSS, depois à assistência social municipal, depois à secretaria de educação para matrícula escolar subsidiada — fornecendo CPF, RG, comprovante de renda e residência múltiplas vezes a órgãos que, em tese, poderiam compartilhar esses dados eletronicamente. Outro exemplo: durante a pandemia COVID-19, estados e municípios não conseguiam integrar dados de vacinação, testagem e internações hospitalares em tempo real, prejudicando coordenação de respostas emergenciais porque sistemas de saúde federal (Ministério da Saúde), estaduais e municipais operavam com protocolos incompatíveis. A interoperabilidade resolve esses problemas ao estabelecer "linguagem comum" entre sistemas — quando cidadão atualiza endereço na Receita Federal, essa informação pode ser automaticamente disponibilizada (mediante consentimento e controles de privacidade) para INSS, Ministério da Saúde, e governo estadual, eliminando redundância e erros de transcrição manual.

A maximização do valor público da DPI, contudo, requer ir além tanto de perspectivas puramente técnicas quanto puramente funcionais. Requer governança explícita orientada pelos cinco pilares do bem comum propostos por Mazzucato (2023), com papel proativo do Estado não apenas como regulador ou provedor, mas como orquestrador e co-criador de mercados orientados para objetivos coletivos claramente articulados. Apenas através desta abordagem integrada – que combina atributos técnicos adequados, propósitos funcionais explícitos e governança orientada ao bem comum – a DPI pode efetivamente contribuir para transformações sociais em escala necessárias para atingir os ODS e construir sociedades digitais mais justas, inclusivas e sustentáveis.

A DPI consolidou-se como categoria analítica e política que ultrapassa a dimensão tecnológica. Diferentes autores defendem que sua essência está na capacidade de criar valor público, redistribuir poder e promover inclusão social (MAZZUCATO; Eaves, 2024; ZUCKERMAN, 2020). No plano técnico, a literatura enfatiza a importância de blocos modulares como identidade digital, sistemas de pagamento, interoperabilidade e dados abertos (Baheer; Lamas; Sousa, 2020).

Blocos modulares são componentes funcionais independentes mas interconectáveis que, quando combinados, possibilitam construção de serviços digitais complexos—princípio arquitetural onde cada bloco resolve função específica e pode ser reutilizado por diferentes aplicações sem necessidade de reimplementação (Fetter et al., 2025). Os quatro blocos fundamentais de DPI, segundo literatura consolidada, são:

(1) Identidade Digital: Sistema que permite cidadãos e organizações provarem quem são eletronicamente mediante credenciais verificáveis, substituindo documentos físicos e autenticações presenciais. Exemplo brasileiro: Gov.br¹⁶ (Plataforma de Autenticação do Governo Federal) permite cidadão acessar mais de 4.200 serviços públicos digitais mediante login único, usando CPF e senha ou biometria facial—desde marcação de consulta no SUS até consulta de restituição do Imposto de Renda. Mais de 150 milhões de brasileiros já possuem conta gov.br, consolidando-a como identidade digital oficial do país. Internacionalmente, paralelo é o *e-Identity* estoniano (usado em 99% das transações com governo) ou Aadhaar indiano (1,3 bilhões cadastrados).

16 Gov.br é a plataforma de autenticação única do governo federal brasileiro, operada pela Secretaria de Governo Digital (SGD/MGI). Permite acesso a 4.200+ serviços públicos digitais mediante login com CPF e senha ou biometria facial, eliminando necessidade de cadastros múltiplos. Conta com mais de 150 milhões de contas ativas (2024), consolidando-se como identidade digital oficial do país. Níveis de confiabilidade Bronze, Prata e Ouro determinam quais serviços cada cidadão pode acessar conforme validações realizadas.

(2) Sistemas de Pagamento Digital: Infraestruturas que viabilizam transferências financeiras instantâneas, seguras e de baixo custo, reduzindo dependência de dinheiro físico e democratizando acesso a serviços financeiros. Exemplo brasileiro: Pix (Sistema de Pagamentos Instantâneos do Banco Central) permite transferências em menos de 10 segundos, 24 horas por dia, com custo zero para pessoas físicas—desde seu lançamento em 2020, ultrapassou 160 milhões de usuários ativos e processa mais de 40 bilhões de transações anuais, incluindo 70% da população anteriormente não-bancarizada. Paralelo internacional é o UPI indiano (300+ bancos conectados, 9,3 bilhões transações mensais).

(3) Interoperabilidade de Dados: Capacidade de diferentes sistemas governamentais e privados compartilharem informações automaticamente mediante protocolos padronizados, eliminando silos institucionais e redundância de coleta. Exemplo brasileiro: Integração Receita Federal-INSS permite que, ao se aposentar, cidadão não precise levar novamente comprovantes de renda já declarados ao Fisco—dados fluem automaticamente entre sistemas mediante consentimento, reduzindo tempo de processo de meses para dias. A Rede Nacional para Simplificação do Registro e da Legalização de Empresas (REDESIM) permite abrir empresa mediante integração de 8 órgãos (Receita, Junta Comercial, Prefeitura, etc.) que antes exigiam tramitação presencial separada. Internacionalmente, modelo máximo é o X-Road estoniano (2.000+ serviços interoperáveis, 99% dos dados governamentais compartilháveis).

(4) Dados Abertos: bases de dados governamentais disponibilizadas publicamente em formatos legíveis por máquina, permitindo que sociedade civil, setor privado e comunidade acadêmica desenvolvam aplicações, análises e serviços a partir de informação produzida pelo Estado — sem necessidade de acordos formais individuais com os órgãos produtores. A lógica subjacente é a de que dados públicos, uma vez abertos sob padrões interoperáveis, geram externalidades positivas que o próprio governo não conseguiria produzir de forma centralizada (Baheer; Lamas; Sousa, 2020). No Brasil, o Portal Brasileiro de Dados Abertos (dados.gov.br), gerido pela CGU em articulação com a Infraestrutura Nacional de Dados Abertos (INDA), constitui o principal repositório federal, reunindo

conjuntos de dados de múltiplos órgãos nas áreas de saúde, educação, segurança pública e finanças governamentais. A disponibilização desses dados em formatos abertos e padronizados é condição técnica para que a IND cumpra sua função de ampliar o uso público da informação estatal, conforme previsto no Decreto nº 12.198/2024.

Esses quatro blocos, quando implementados de forma integrada e interoperável, criam efeito multiplicador: identidade digital (gov.br) permite autenticação segura em sistemas de pagamento (Pix), que por sua vez podem acessar dados compartilhados mediante interoperabilidade (Receita-INSS), cujos metadados ficam disponíveis como dados abertos (dados.gov.br) para auditoria e inovação cidadã. A Infraestrutura Nacional de Dados (IND) busca justamente orquestrar esses blocos de forma coordenada, superando implementações historicamente fragmentadas.

A Tabela 9 consolida os quatro blocos modulares fundamentais de DPI, apresentando suas funções principais e exemplos concretos de implementação no Brasil e internacionalmente.

Tabela 9 – Blocos Modulares de Infraestrutura Digital Pública

Bloco Modular	Função Principal	Exemplo Brasileiro	Exemplo Internacional
Identidade Digital	Autenticação única de cidadãos e organizações	Gov.br (150 milhões de usuários cadastrados)	e-Identity Estoniano (99% da população)
Pagamentos Digitais	Transferências financeiras instantâneas	Pix (160 milhões de usuários, 40 bilhões transações/ano)	UPI Indiano (9+ bilhões transações/mês)
Interoperabilidade de Dados	Compartilhamento automatizado entre sistemas	IND - Infraestrutura Nacional de Dados (em implementação)	X-Road Estoniano (628 organizações membros; mais de 3.000 serviços — e-Estonia, 2024)
Dados Abertos	Transparência e inovação cidadã	Portal Brasileiro de Dados Abertos — dados.gov.br	data.gov (EUA)

Fonte: Elaboração própria baseada em dados oficiais. Gov.br: Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos (MGI, 2026). Pix: Banco Central do Brasil e FEBRABAN (2025). UPI: National Payments Corporation of India (NPCI, ago. 2025). X-Road: e-Estonia (2024). IND: Decreto nº 12.198/2024.

Portal Brasileiro de Dados Abertos: dados.gov.br. Acesso em: mar. 2026.

Esses quatro blocos, quando implementados de forma integrada e interoperável, criam efeito multiplicador: identidade digital (Gov.br) permite autenticação segura em sistemas de pagamento (Pix), que por sua vez podem acessar dados compartilhados mediante

interoperabilidade (IND), cujos metadados ficam disponíveis como dados abertos (dados.gov.br) para auditoria e inovação cidadã.

Exemplos internacionais como o *Aadhaar* e o *UPI* na Índia, o *X-Road* na Estônia, o *Government Digital Service* no Reino Unido e o *SingPass* em Singapura evidenciam o potencial transformador da DPI. Esses casos demonstram que uma infraestrutura pública digital pode gerar ganhos de eficiência, fomentar inovação e ampliar a inclusão social. Ao mesmo tempo, revelam riscos estruturais — como exclusão digital, vigilância estatal e vulnerabilidades cibernéticas — que demandam estratégias de mitigação (Desai; Manoharam, 2024; Vardanyan; Kocharyan, 2022).

A análise desses exemplos permite identificar padrões comuns, como modularidade, escalabilidade e governança robusta, mas também limites críticos relacionados à privacidade e à equidade. É justamente nessa dialética entre benefícios e limitações que se torna possível compreender o lugar da Infraestrutura Nacional de Dados (IND): uma tentativa de adaptar fundamentos internacionais a um contexto institucional e normativo específico.

Essa dialética manifesta-se concretamente quando observamos que, por um lado, DPIs bem-sucedidas como *X-Road* estoniano e *UPI* indiano geraram benefícios mensuráveis— redução de custos administrativos (Estônia economiza cerca de 2% do PIB anualmente em burocracia evitada), aceleração dramática de serviços públicos (99% dos serviços estonianos disponíveis digitalmente 24/7), e inclusão de populações anteriormente marginalizadas (180 milhões de indianos não-bancarizados passaram a realizar transações digitais via *UPI*). Por outro lado, essas mesmas infraestruturas revelam limitações e tensões críticas: o *X-Road* estoniano enfrentou em 2017 crise de confiança quando cidadãos descobriram acessos indevidos a seus dados de saúde por funcionários públicos curiosos, evidenciando fragilidades em controles de privacidade; o sistema *Aadhaar* indiano, embora tecnicamente robusto, gerou exclusões quando falhas biométricas impediram cidadãos pobres de acessarem subsídios alimentares essenciais, resultando em mortes por inanição documentadas. A Infraestrutura Nacional de Dados (IND) posiciona-se nesse campo de tensão: busca replicar benefícios de eficiência e integração demonstrados internacionalmente, mas deve fazê-lo navegando contexto institucional mais complexo (federalismo de três níveis vs. estados unitários), ambiente normativo mais restritivo (LGPD¹⁷ com princípios mais rigorosos que regulações estonianas),

17 Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Lei nº 13.709/2018), legislação brasileira que regula tratamento de dados pessoais por entidades públicas e privadas, garantindo direitos fundamentais de liberdade e privacidade. Inspirada no GDPR (General Data Protection Regulation) europeu, estabelece princípios de finalidade, adequação, necessidade, livre acesso, qualidade, transparência, segurança, prevenção, não discriminação e

e realidade socioeconômica mais desigual (heterogeneidade de acesso digital e capacidades técnicas entre regiões). A "adaptação de fundamentos internacionais" significa, portanto, não transplante mecânico de soluções, mas processo seletivo de aprendizado onde o Brasil identifica quais elementos técnicos são transferíveis (protocolos, arquiteturas), quais princípios de governança requerem modificação (NIIS multipartidário → modelo federativo brasileiro), e quais salvaguardas adicionais são necessárias (mecanismos mais fortes de auditabilidade e controle social dada vulnerabilidade de populações pobres e menor confiança institucional média comparada a países nórdicos).

4.13 Infraestrutura Nacional de Dados (IND) no Brasil

Esta seção constitui o núcleo analítico central da presente dissertação. A trajetória percorrida até aqui — da caracterização do X-Road (Cap. 3) à conceptualização de DPI robusta (Cap. 4, seções 4.1-4.12) — serviu para construir o referencial analítico capaz de iluminar o caso brasileiro. É nesta seção que os princípios extraídos da experiência estoniana encontram seu destino de aplicação: a Infraestrutura Nacional de Dados (IND), instituída pelo Decreto nº 12.198/2024, analisada não como norma em si, mas como projeto estratégico em construção. A questão que orienta a análise é objetiva: o que o modelo estoniano nos ensina sobre o que o Brasil pode e não pode replicar — e por quê?

A transição da análise internacional para o caso brasileiro revela como o país tem buscado alinhar-se a tendências globais. A Infraestrutura Nacional de Dados (IND), instituída pelo Decreto nº 12.198/2024, configura-se como infraestrutura destinada a promover a integração de dados públicos, reforçar a interoperabilidade entre órgãos e assegurar a governança digital (Brasil, 2024).

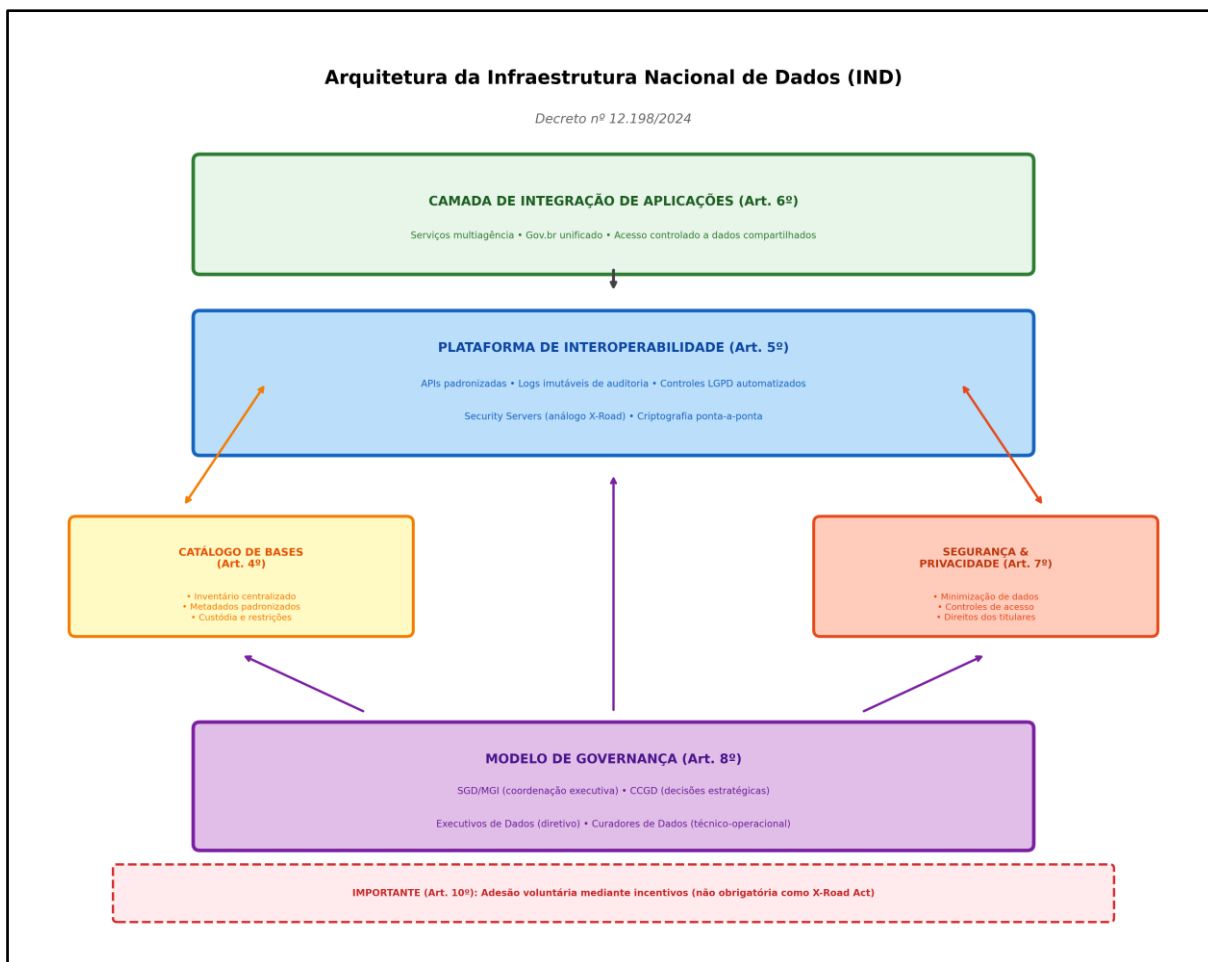


Figura 6 – Arquitetura da Infraestrutura Nacional de Dados (IND)
Fonte: Elaboração própria baseada no Decreto nº 12.198/2024.

O Decreto nº 12.198/2024 estrutura a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) em torno de cinco componentes fundamentais, explicitados em seus artigos 4º a 8º, conforme sistematizado na Tabela 4.

Tabela 10 – Componentes da Infraestrutura Nacional de Dados (Decreto nº 12.198/2024)

Componente	Base Legal	Função Principal	Status de Implementação (2024)
Catálogo de Bases de Dados	Art. 4º	Inventário centralizado das bases de dados dos órgãos federais mediante metadados padronizados que especifiquem conteúdo, custódia, restrições e finalidades	Em desenvolvimento: piloto com bases prioritárias
Plataforma de Interoperabilidade	Art. 5º	Infraestrutura técnica que viabiliza compartilhamento de dados entre órgãos mediante protocolos seguros, logs imutáveis de auditoria e controles automatizados de conformidade LGPD	Piloto operacional: APIs em testes com órgãos selecionados
Camada de Integração de Aplicações	Art. 6º	Permite desenvolvimento de serviços digitais multiagência mediante acesso controlado a	Parcialmente implementado: Gov.br

Componente	Base Legal	Função Principal	Status de Implementação (2024)
		dados compartilhados, viabilizando iniciativas como Gov.br unificado	funcional, integrações em expansão
Políticas de Segurança e Privacidade	<i>Art. 7º</i>	Operacionalização dos princípios da LGPD, incluindo minimização de dados, controles de acesso baseados em papéis e direitos dos titulares	Arcabouço normativo pronto: implementação técnica em andamento
Modelo de Governança	<i>Art. 8º</i>	Atribui à SGD/MGI ¹⁸ coordenação executiva, ao CCGD ¹⁹ decisões estratégicas, e cria papéis de Executivo de Dados e Curador de Dados em cada órgão	Estrutura institucional estabelecida: adesão voluntária em curso

Fonte: (Brasil, 2024) - Decreto nº 12.198/2024 e análise de implementação baseada em documentos da SGD/MGI.

Observação: Art. 10º estabelece que adesão dos órgãos federais à IND é voluntária mediante incentivos (prioridade em investimentos de TI), não obrigatória como no X-Road Act estoniano.

Cabe registrar que a presente dissertação optou por não detalhar os componentes técnicos da Arquitetura de Infraestrutura Nacional de Dados (AIND) por questão de recorte metodológico: o foco da pesquisa é o modelo de convergência estratégica e a análise comparativa com o X-Road, não a especificação técnica da arquitetura interna da IND. Para aprofundamento, consultar o portal do MGI (gov.br/gestao) e o Decreto nº 12.198/2024, que detalha os cinco componentes da IND e as competências do CCGD.

Nota sobre delimitação do escopo normativo: O Decreto nº 12.198/2024 alcança exclusivamente os órgãos e entidades da administração pública federal direta, autárquica e fundacional. O decreto não abrange empresas estatais federais, tampouco os estados e municípios. Conseqüentemente, a criação da IND como estrutura genuinamente nacional exigirá provavelmente aprovação de legislação pelo Congresso Nacional, além de decisões de política pública que, até o momento, não foram tomadas.

18 Secretaria de Governo Digital (SGD), vinculada ao Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos (MGI). Órgão central responsável por formular, coordenar e supervisionar políticas de transformação digital da Administração Pública Federal brasileira. Criada em 2019 (Decreto nº 9.745) e reformulada com Lei nº 14.204/2021, possui a competência para estabelecer padrões técnicos de interoperabilidade, coordenar programas de Governo Digital (PGD), e supervisionar implementação da Estratégia Federal de Governo Digital.

19 Comitê Central de Governança de Dados (CCGD), instituído pelo Decreto nº 10.046/2019. Instância colegiada consultiva e deliberativa que arbitra questões estratégicas de compartilhamento de dados entre órgãos federais. Composto por representantes de ministérios setoriais, Controladoria-Geral da União (CGU), Advocacia-Geral da União (AGU) e outros órgãos. Atribuições incluem: aprovar políticas de governança de dados, arbitrar conflitos sobre compartilhamento, monitorar maturidade de práticas.

A análise conjunta dos cinco componentes da IND estabelecidos pelo Decreto nº 12.198/2024 revela uma arquitetura institucionalmente coerente com os objetivos da Estratégia Nacional de Governo Digital (ENGD) para o período 2024–2027 — em particular com os Objetivos 5 (Inteligência de Dados) e 6 (Infraestrutura Digital), que orientam o uso estratégico de dados e a construção de infraestruturas digitais compartilhadas (BRASIL, Decreto nº 12.069, 2024). O Catálogo Nacional de Dados, a Plataforma de Interoperabilidade e a Camada de Integração de Aplicações formam, juntos, a espinha dorsal técnica pela qual o princípio de "reuso seguro de dados" — expressão central da ENGD — pode ser operacionalizado na prática. O problema não está no desenho normativo, que é robusto, mas na sequência lógica que o próprio desenho pressupõe: a Plataforma de Interoperabilidade só entrega valor se houver bases catalogadas no Catálogo; a Camada de Integração só viabiliza serviços multiagência se houver dados efetivamente compartilhados na plataforma. Cada componente depende de o anterior estar funcionando, o que torna a IND especialmente vulnerável a gargalos nos estágios iniciais de adesão — onde os incentivos para catalogar e compartilhar ainda são fracos, porque a rede ainda não tem massa crítica suficiente para gerar retorno perceptível.

Essa vulnerabilidade tem dimensão institucional precisa. O Modelo de Governança definido no Decreto atribui à SGD/MGI a coordenação executiva e ao CCGD as decisões estratégicas de compartilhamento interministerial — arranjo alinhado ao Objetivo 1 da ENGD, que trata de gestão e governança digital. Os papéis de Executivo de Dados e Curador de Dados distribuem responsabilidades operacionais aos órgãos federais, criando capilaridade que a estrutura central isolada não conseguiria ter. O que o arranjo ainda não resolve, contudo, é a dimensão federativa: estados e municípios, que detêm bases de dados críticas para políticas de saúde, assistência social e educação, permanecem fora do modelo formal de governança. A ENGD foi elaborada justamente a partir de "amplo processo participativo com atores municipais, estaduais, distritais e do governo federal" (Brasil, 2024), o que torna ainda mais saliente a assimetria entre a ambição participativa da estratégia e a centralização federal do modelo de governança da IND. Essa tensão não invalida o arcabouço — indica, antes, que sua efetividade dependerá da construção de mecanismos de adesão subnacional que o Decreto, por ora, não detalha.

O Decreto também estabelece (art. 10º) que adesão dos órgãos federais à IND é voluntária mediante incentivos (não obrigatória como no *X-Road Act* estoniano) — órgãos que aderem recebem prioridade em investimentos de modernização de TI e suporte técnico da

SGD/MGI, mas não há sanções por não-adesão, refletindo limitações de capacidade de *enforcement* em contexto federativo brasileiro.

Se, de um lado, a DPI internacional apresenta modelos consolidados, como o *X-Road* estoniano, de outro, a IND ainda se encontra em fase de implementação, ancorada em um arcabouço normativo robusto. A Lei do Governo Digital (Lei nº 14.129/2021) forneceu princípios gerais; o Decreto nº 11.052/2022 definiu papéis como os Executivos de Dados; e o Decreto nº 12.198/2024 consolidou a estratégia para 2024–2027. Em paralelo, a LGPD assegura limites de privacidade e proteção de direitos fundamentais (Brasil, 2018; Brasil, 2021; Brasil, 2022).

No plano técnico, a IND organiza-se em camadas de catalogação, interoperabilidade e segurança, inspiradas em experiências internacionais, mas adaptadas ao contexto brasileiro.

No plano organizacional, prevê instâncias de governança como o Comitê Central do Governança de Dados – CCGD vinculado à SGD/MGI, além de papéis estratégicos de executivos e curadores de dados.

A Secretaria de Governo Digital (SGD), vinculada ao Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos (MGI), constitui o órgão central responsável por formular, coordenar e supervisionar políticas de transformação digital da administração pública federal brasileira. Criada em 2019 e reformulada com a Lei nº 14.204/2021, a SGD possui mandato para estabelecer padrões técnicos de interoperabilidade, coordenar programas de governo digital, e supervisionar implementação da Infraestrutura Nacional de Dados. Já o Comitê Central de Governança de Dados (CCGD), instituído pelo Decreto nº 10.046/2019 e operacionalizado mediante Portarias subsequentes, funciona como instância colegiada consultiva e deliberativa de segundo nível para arbitrar questões estratégicas de compartilhamento de dados entre órgãos federais.

Tais arranjos buscam reduzir a fragmentação informacional do Estado, marcada historicamente pela cultura de silos (Franco, 2024; SARLET; MOLINARO, 2014).

Assim, a IND pode ser vista como a tradução nacional dos princípios de DPI, mas enfrenta desafios que serão aprofundados na próxima seção, especialmente no que diz respeito à aderência prática às referências internacionais.

4.14 Convergência Estratégica entre DPI e IND

Ao comparar os fundamentos da DPI global e da IND brasileira, nota-se clara convergência conceitual: ambas se estruturam em modularidade, interoperabilidade e governança orientada ao interesse público. No entanto, há uma diferença significativa entre desenho normativo e implementação operacional.

A IND possui um dos arcabouços jurídicos mais avançados da América Latina, mas sua efetividade ainda é limitada pela fragmentação federativa, pela heterogeneidade tecnológica dos sistemas legados e pela sobreposição regulatória (Franco, 2024); (Camboim, 2023); (Schimidt et al., 2022). Esse descompasso explica por que, embora o Brasil esteja conceitualmente alinhado a modelos como o X-Road estoniano ou o *UPI* indiano, enfrenta maiores dificuldades na implementação prática.

Ainda assim, a convergência entre DPI e IND possui potencial transformador. Ela pode consolidar dados como ativo estratégico do Estado, fomentar inovação econômica por meio de dados abertos, promover inclusão social e reforçar a transparência governamental (Cordella; Bonina, 2012; SANTOS; MADEIRA; ANDRADE, 2024). No horizonte da Estratégia Federal de Governo Digital 2024–2027, projeta-se a integração de bases prioritárias até 2027, com metas de interoperabilidade e indicadores de desempenho (Brasil, 2024).

Portanto, a IND deve ser entendida como processo em construção: já dispõe das condições normativas, mas sua materialização exige superar barreiras institucionais, tecnológicas e regulatórias.

Estas barreiras manifestam-se concretamente em três dimensões. Institucionalmente, a coordenação federativa enfrenta ausência de estruturas multipartidárias legitimadas para arbitrar conflitos entre União, estados e municípios sobre compartilhamento de dados, gerando impasses sobre quem financia, quem governa e quem se responsabiliza pela infraestrutura.

O Comitê Central de Governança de Dados (CCGD), criado pelo Decreto nº 10.046/2019, possui atribuições consultivas, mas carece de poder deliberativo e representação subnacional efetiva, limitando sua capacidade de coordenação vinculante. Tecnicamente, sistemas legados heterogêneos acumulados ao longo de décadas operam com protocolos incompatíveis, linguagens de programação obsoletas (COBOL em sistemas previdenciários, por exemplo) e infraestruturas on-premises resistentes à migração para arquiteturas modernas baseadas em APIs e microsserviços. Estimativas apontam que 70% dos sistemas críticos da administração federal possuem mais de 15 anos, com documentação técnica incompleta e dependência de fornecedores específicos que dificultam interoperabilidade. Reguladoramente, sobreposições entre Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/2011), LGPD (Lei nº

13.709/2018), Lei de Governo Digital (Lei nº 14.129/2021) e Decreto da IND (nº 12.198/2024) criam zonas de ambiguidade sobre precedências normativas: quando a transparência prevista na LAI conflita com proteção de dados da LGPD em contextos de compartilhamento interinstitucional, qual norma prevalece? A ausência de harmonização legislativa clara gera insegurança jurídica que desestimula adesão voluntária à IND por órgãos receosos de responsabilização.

4.15 - Síntese e Considerações Parciais

O percurso deste capítulo evidencia uma tensão estrutural que atravessa toda a trajetória da IND: o avanço normativo não se traduz automaticamente em capacidade operacional. O Brasil construiu, em tempo relativamente curto, um arcabouço jurídico-institucional alinhado às melhores referências internacionais de DPI — a Lei nº 14.129/2021, o Decreto nº 12.198/2024 e a Estratégia Nacional de Governo Digital formam um conjunto coerente de instrumentos que poucos países em desenvolvimento conseguiram consolidar. Mas a coerência normativa convive com execução desigual: órgãos com alta maturidade em governança de dados coexistem com outros em estágios iniciais, a heterogeneidade tecnológica dos sistemas legados resiste à interoperabilidade que a lei prescreve, e a coordenação federativa permanece como lacuna não endereçada pelo modelo institucional vigente. Essa divergência entre o que está escrito e o que está implementado não é falha do arcabouço — é o problema central que qualquer estratégia de maturação da IND precisará enfrentar.

A superação desse hiato depende de condições que não derivam automaticamente da qualidade normativa: investimentos sustentados ao longo de múltiplos ciclos orçamentários, mecanismos de incentivo que tornem a adesão voluntária racionalmente atraente para órgãos com recursos limitados, e clareza sobre como harmonizar as sobreposições regulatórias entre LGPD, LAI e legislação sobre Governo Digital. É nesse conjunto de desafios que a experiência do X-Road oferece lições mais úteis do que qualquer comparação de indicadores de maturidade — não como modelo a ser replicado, mas como evidência de que infraestruturas de dados eficazes se constroem por acumulação incremental de confiança institucional, não por decreto. O Capítulo IV desenvolve essa proposição ao articular os elementos analisados aqui em um modelo de convergência estratégica aplicável ao contexto brasileiro.

Essa síntese indica que o Brasil está no caminho certo ao estruturar a IND como política de Estado, mas precisa fortalecer mecanismos de governança, monitoramento e

participação social para assegurar que a infraestrutura de dados cumpra sua promessa de gerar valor público.

O Capítulo 4 dará continuidade a esse debate ao propor um modelo de convergência estratégica, capaz de integrar teoria e prática, oferecendo um *framework* conceitual para orientar a implementação de redes de conhecimento aplicadas à governança de dados no setor público brasileiro.

5. MODELO DE CONVERGÊNCIA ESTRATÉGICA ENTRE DPI e IND

A análise do Capítulo III demonstrou que, embora haja clara convergência conceitual entre a DPI e a IND, a realidade de implementação brasileira é permeada por desafios técnicos, institucionais e regulatórios. Essa constatação abre espaço para uma reflexão mais aprofundada: como traduzir fundamentos teóricos e experiências internacionais em um modelo estratégico aplicável à realidade brasileira?

Este capítulo propõe um *framework* de convergência estratégica que busca preencher essa lacuna, articulando teoria e prática. O modelo se estrutura em três eixos: fundamentos teóricos da governança do conhecimento, elementos estruturantes (técnicos, institucionais e sociais) e indicadores de desempenho e maturidade.

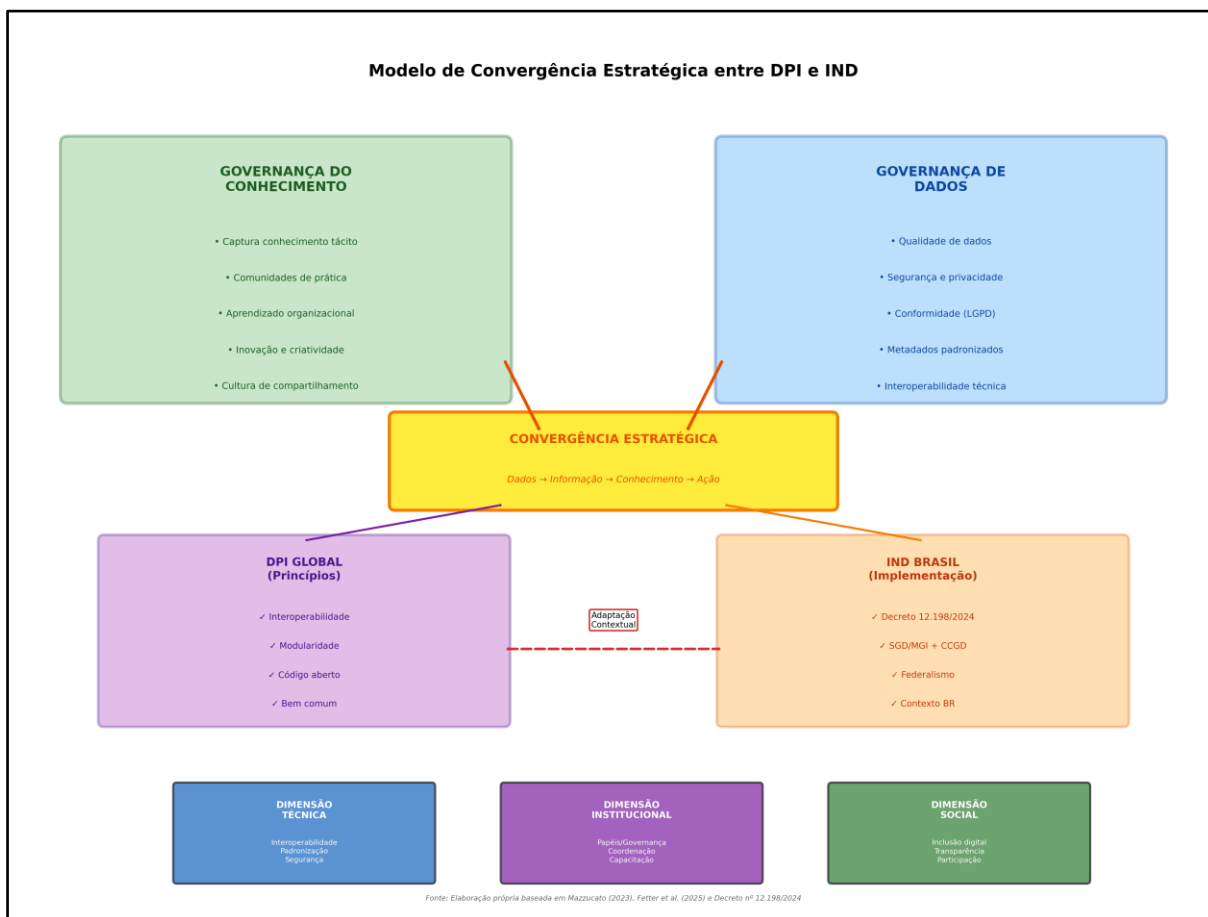


Figura 7 – Modelo de Convergência Estratégica entre DPI e IND.

Fonte: Elaboração própria baseada em (Mazzucato, 2023), (Fetter et al., 2025) e Decreto nº 12.198/2024.

5.1 Fundamentos Teóricos da Convergência Estratégica

A governança do conhecimento oferece a base conceitual para compreender como dados podem ser convertidos em valor público. (Bedford; Sanchez, 2021) e (Sanchez,

2021) destacam que redes de conhecimento permitem articular múltiplos atores, assegurando que informação seja compartilhada e utilizada de forma colaborativa. Aplicada ao contexto digital, essa abordagem legitima a IND como rede infraestrutural de dados, em que papéis como executivos e curadores de dados funcionam como nós centrais.

Além disso, a literatura sobre redes de conhecimento reforça que a interoperabilidade não é apenas técnica, mas também social: requer confiança, normas de colaboração e clareza de papéis (Sun, 2024). Isso conecta diretamente o conceito global de DPI, que enfatiza bens públicos digitais, com o caso brasileiro da IND, que busca traduzir essa concepção em arranjos institucionais e normativos específicos.

5.2 Convergência entre a Governança do Conhecimento e a Governança de Dados

5.2.1 Fundamentos da Convergência

A proposição central desta pesquisa sustenta que a Governança do Conhecimento e a Governança de Dados, embora tradicionalmente tratadas como domínios distintos na literatura e na prática organizacional, apresentam convergências fundamentais que podem e devem ser exploradas estrategicamente, particularmente através da implementação de Infraestrutura Digital Pública adequadamente governada. Esta convergência não é meramente conceitual ou desejável, mas constitui imperativo operacional para administrações públicas que aspiram superar a fragmentação informacional e alcançar transformação digital efetiva em escala nacional.

A necessidade de convergência emerge de múltiplas limitações observadas quando Governança do Conhecimento e Governança de Dados são abordadas de forma isolada. Do lado da Governança do Conhecimento, abordagens tradicionais frequentemente carecem de mecanismos técnicos robustos para captura, estruturação e compartilhamento sistemático do conhecimento organizacional em ambientes digitais distribuídos. Sistemas de gestão do conhecimento convencionais, frequentemente baseados em repositórios centralizados e portais intranet, enfrentam desafios significativos de escalabilidade, interoperabilidade e adoção pelos usuários finais. Como (Nonaka; Takeuchi, 1995) observaram, o conhecimento organizacional reside não apenas em documentos e bases de dados, mas fundamentalmente nas práticas, rotinas e interações entre indivíduos – dimensão que sistemas tradicionais de Governança do Conhecimento (GC) frequentemente falham em capturar e habilitar.

Esta constatação aponta para um elemento que a presente pesquisa identifica como central para o funcionamento da convergência estratégica proposta: o sujeito humano.

Dados, por mais bem estruturados e interoperáveis que sejam, não se convertem automaticamente em conhecimento. A conversão exige interpretação — e interpretar é uma atividade humana. É o servidor que lê o relatório e reconhece um padrão relevante; é o gestor que confronta a projeção com o contexto institucional que conhece; é o analista que formula a hipótese que os dados sozinhos não formulam; é o cidadão que reconhece na informação pública um serviço que lhe diz respeito. O X-Road estoniano, ao disponibilizar dados de forma segura e rastreável entre organizações, criou as condições técnicas para essa conversão — mas a conversão em si depende das práticas, capacidades e motivações dos indivíduos que operam em cada nó da rede. Infraestrutura viabiliza; sujeitos humanos realizam. Esta distinção não é periférica ao argumento da dissertação — é sua chave interpretativa mais profunda, e é o que diferencia uma infraestrutura pública digital de um mero sistema de movimentação de dados.

Do lado da Governança de Dados, abordagens puramente técnicas ou orientadas à conformidade regulatória frequentemente negligenciam a dimensão semântica e contextual que transforma dados em informação e informação em conhecimento acionável. Como (Abraham et al., 2019) argumentam, *frameworks* de Governança de Dados focados exclusivamente em qualidade, segurança e privacidade de dados, embora necessários, são insuficientes para garantir que dados efetivamente suportem tomada de decisão informada e aprendizado organizacional. A proliferação de lagos de dados (*data lakes*) e repositórios que acumulam vastas quantidades de dados sem contexto adequado ou mecanismos de interpretação ilustra esta limitação – fenômeno descrito por alguns autores como "pântanos de dados" (*data swamps*) (Ravat; Zhao, 2019).

A convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados busca superar estas limitações através de abordagem integrada que reconhece que **dados são insumos para conhecimento** e que **conhecimento contextualiza e confere significado aos dados**. Esta relação simbiótica não é nova – a hierarquia DIKW²⁰ (Data-Information-Knowledge-Wisdom) proposta por (Ackoff, 1989) já articulava esta progressão. Contudo, o que é novo é o reconhecimento de que, em ambientes digitais complexos e distribuídos característicos de administrações públicas contemporâneas, esta progressão requer não apenas

20 DIKW (Data-Information-Knowledge-Wisdom) é hierarquia conceitual proposta por Russell (Ackoff, 1989) que descreve progressão de dados (fatos brutos sem contexto) para informação (dados contextualizados com significado), conhecimento (informação compreendida e aplicável mediante experiência) e sabedoria (conhecimento com discernimento ético e julgamento de valor). Fundamental para teorias de gestão do conhecimento e sistemas de informação, a hierarquia DIKW ilustra como valor é agregado progressivamente através de processos de interpretação, integração e aplicação.

boas práticas organizacionais, mas **infraestrutura digital pública adequadamente governada** que habilite tecnicamente o fluxo entre dados e conhecimento.

(Mazzucato; Eaves; Vasconcellos, 2024), argumentam que DPI, quando governada segundo princípios do bem comum, possui atributos técnicos – particularmente interoperabilidade, modularidade e abertura – que a tornam particularmente adequada para habilitar esta convergência. Interoperabilidade permite que diferentes sistemas e organizações compartilhem dados mantendo sua autonomia operacional; modularidade permite que componentes especializados em gestão de dados coexistam com componentes voltados à gestão do conhecimento; e abertura (através de padrões abertos e, idealmente, código aberto) permite que práticas e aprendizados sejam compartilhados entre diferentes contextos organizacionais.

No contexto brasileiro, a convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados não é apenas desejável, mas necessária para superar o paradoxo identificado por (Fetter; Rao; Eaves, 2025): o Brasil ocupa a 2ª posição global em maturidade de governo digital segundo o *GovTech Maturity Index 2022* (World Bank; OECD, 2022), mas enfrenta fragmentação operacional significativa em suas aproximadamente 37.000 entidades públicas federais, estaduais e municipais. Esta fragmentação manifesta-se tanto na proliferação de sistemas de informação isolados (silos de dados) quanto na ausência de mecanismos sistemáticos de compartilhamento de conhecimento e boas práticas entre diferentes níveis e esferas de governo (silos de conhecimento). A Infraestrutura Nacional de Dados (IND), instituída pelo Decreto 12.198/2024, representa reconhecimento institucional desta necessidade de convergência, embora sua implementação efetiva ainda demande clareza sobre como diferentes dimensões de governança serão orquestradas.

5.2.2 Dimensões da Convergência

A convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados pode ser compreendida através de múltiplas dimensões analíticas. A Tabela 11 sintetiza as principais características, objetivos e mecanismos de cada domínio quando tratados isoladamente, e como DPI pode habilitar sua convergência.

Tabela 11 – Dimensões Comparativas: Governança do Conhecimento, Governança de Dados e Convergência via DPI

Dimensão	Governança do Conhecimento	Governança de Dados	Convergência via DPI
Objetivo primário	Capturar, compartilhar e aplicar conhecimento	Assegurar qualidade, segurança, privacidade e	Habilitar fluxo contínuo de dados para conhecimento e

Dimensão	Governança do Conhecimento	Governança de Dados	Convergência via DPI
	organizacional para inovação e aprendizado	conformidade no uso de dados	conhecimento para melhores decisões sobre dados
Foco dominante	Pessoas, práticas, cultura organizacional e processos de aprendizado	Ativos de dados, metadados, qualidade técnica e conformidade regulatória	Ecossistema sociotécnico que integra pessoas, processos, tecnologia e dados
Atores principais	Chief Knowledge Officers (CKO), comunidades de prática, equipes de inovação	Chief Data Officers (CDO), arquitetos de dados, engenheiros de dados, compliance	Orquestração governamental envolvendo ambos os perfis + sociedade civil
Infraestrutura típica	Portais de conhecimento, wikis, fóruns, sistemas de lições aprendidas	Data warehouses, data lakes, catálogos de dados, APIs	DPI interoperável (ex: X-Road) que conecta sistemas de dados E facilita compartilhamento de conhecimento
Natureza dos ativos	Tácito e explícito; contextual; frequentemente não-estruturado	Predominantemente explícito; estruturado ou semiestruturado	Integração de dados estruturados com contexto semântico e conhecimento tácito
Principais desafios	Captura de conhecimento tácito; engajamento dos usuários; barreiras culturais	Silos de dados; qualidade; interoperabilidade; privacidade	Fragmentação institucional; ausência de padrões comuns; resistência organizacional
Métricas de sucesso	Inovação; redução de retrabalho; aprendizado organizacional; cultura de compartilhamento	Qualidade de dados; conformidade regulatória; disponibilidade; segurança	Uso efetivo de dados para decisões; aprendizado sistêmico; redução de silos
Base regulatória (Brasil)	Lei nº 12.527/2011 (LAI); Decreto-Lei nº 200/1967	Lei 13.709/2018 (LGPD); Lei 14.129/2021 (Lei do Governo Digital)	Decreto 12.198/2024 (IND); Decreto 11.052/2022 (Política Nacional de Dados)
Governança	Frequentemente descentralizada; baseada em comunidades	Frequentemente centralizada; hierárquica; baseada em papéis e responsabilidades	Orquestração governamental com princípios de co-criação e participação
Exemplo prático (internacional)	Sistema de gestão de conhecimento do Banco Mundial	<i>European Data Portal</i> (EU)	X-Road (Estônia) – integra ambas as dimensões
Exemplo prático (Brasil)	Comunidades de prática no SISP ²¹	INDE ²² (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais)	IND em implementação

21 SISP (Sistema de Administração dos Recursos de Informação e Informática) trata-se de um Sistema Estruturante no âmbito da Administração Pública Federal, instituído originalmente pelo Decreto nº 1.048/1994 e atualizado pelo Decreto nº 7.579/2011. Responsável por planejar, coordenar, organizar, operar, controlar e supervisionar recursos de tecnologia da informação dos órgãos e entidades da Administração Pública Federal. O SISP é composto por comitês técnicos e comunidades de prática que articulam diferentes órgãos para compartilhamento de conhecimento e boas práticas em TI governamental.

22 INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais) é conjunto integrado de tecnologias, políticas, mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento destinados a facilitar e ordenar geração,

Fonte: Elaboração própria com base em (Nonaka; Takeuchi, 1995) e (Takeuchi, 1995), (Abraham et al., 2019), (Mazzucato et al., 2024) e legislação brasileira.

Como evidenciado na Tabela 11, as diferenças entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados não são meramente semânticas, mas refletem tradições disciplinares, práticas organizacionais e pressupostos epistemológicos distintos. A Governança do Conhecimento emerge historicamente de campos como gestão estratégica, aprendizado organizacional e gestão da inovação, enfatizando dimensões humanas e culturais. A Governança de Dados, por sua vez, emerge de campos como ciência da computação, arquitetura de informação e gestão de riscos, enfatizando dimensões técnicas e de conformidade.

Contudo, a Tabela 11 também revela múltiplas oportunidades de convergência. Ambos os domínios se preocupam com qualidade – seja qualidade de conhecimento ou qualidade de dados. Ambos reconhecem desafios de silos organizacionais – sejam silos de conhecimento ou silos de dados. Ambos enfrentam tensões entre necessidade de compartilhamento e requisitos legítimos de privacidade e segurança. E, fundamentalmente, ambos são habilitados e constrangidos pelas mesmas infraestruturas digitais subjacentes.

O que distingue a convergência via DPI de uma simples sobreposição entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados não é a coexistência das duas abordagens, mas a qualidade diferente que emerge quando infraestrutura adequadamente governada é empregada intencionalmente para habilitá-las ao mesmo tempo. O X-Road ilustra esse ponto com precisão: ele não é repositório de dados nem repositório de conhecimento, mas camada de interoperabilidade que faz dados fluírem entre sistemas preservando rastreabilidade, segurança e auditabilidade. São exatamente esses atributos — não os dados em si — que geram conhecimento sobre padrões de uso, lacunas de qualidade e demandas informacionais que nenhum sistema isolado conseguiria revelar. O objeto da convergência, portanto, não são os ativos em si, mas os fluxos e relações entre diferentes tipos de ativos informacionais que a DPI torna possíveis.

Essa convergência não emerge espontaneamente. Governança do Conhecimento pode desenvolver-se organicamente em comunidades de prática; Governança de Dados pode ser imposta por regulação. A convergência entre ambas, contudo, exige orquestração deliberada — papel proativo do Estado na definição de objetivos coletivos e na coordenação de múltiplos

armazenamento, acesso, compartilhamento, divulgação e uso de dados geoespaciais de origem federal, estadual, distrital e municipal no Brasil. Instituída pelo Decreto nº 6.666/2008 e coordenada pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR), representa esforço pioneiro de interoperabilidade de dados governamentais em domínio especializado (geoespacial), antecipando princípios que seriam posteriormente ampliados pela IND.

atores em sua direção. No contexto brasileiro, isso tem implicação direta: a implementação da IND não pode ser tratada como projeto técnico de interconexão de sistemas. É, antes, projeto de transformação da governança informacional do Estado — o que explica por que avanços normativos isolados, sem coordenação estratégica explícita, têm produzido resultados aquém do potencial que o arcabouço jurídico permitiria. Quando essa orquestração funciona, como o caso estoniano documenta, o resultado vai além do compartilhamento de dados: diferentes jurisdições passam a aprender umas com as outras de forma sistemática, porque a infraestrutura carrega não apenas dados, mas os metadados e mecanismos de interpretação que transformam dados em aprendizado institucional (Fetter; Rao; Eaves, 2025).

5.2.3 X-Road como Habilitador de Convergência

O X-Road da Estônia constitui caso paradigmático de como DPI adequadamente governada pode habilitar convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados. Desenvolvido inicialmente em 2001 e continuamente evoluído desde então, X-Road é camada de troca de dados que permite que diferentes sistemas de informação de diferentes organizações troquem dados de forma segura, auditável e padronizada, mantendo autonomia operacional de cada participante (Fetter; Rao; Eaves, 2025).

Do ponto de vista estritamente técnico, X-Road opera primariamente como infraestrutura de Governança de Dados, assegurando que dados sejam trocados com qualidade, segurança e conformidade adequadas. Suas sete variáveis técnicas identificadas por (Fetter; Rao; Eaves, 2025) – (i) segurança; (ii) interoperabilidade; (iii) descentralização; (iv) transparência; (v) reutilização; (vi) escalabilidade; e (vii) governança em múltiplas camadas – são todas características associadas a boas práticas de Governança de Dados. A arquitetura de segurança do X-Road, baseada em assinaturas digitais e criptografia ponta-a-ponta, assegura integridade e não-repúdio nas transações de dados. A padronização de interfaces através de schemas XML e REST APIs assegura interoperabilidade técnica. Os logs distribuídos e imutáveis garantem auditabilidade e *accountability*.

Contudo, X-Road não é apenas infraestrutura de dados – é também **infraestrutura de conhecimento**. Múltiplas dimensões evidenciam esta característica:

Transparência como geração de conhecimento: O princípio de transparência do X-Road, que permite aos cidadãos estonianos verificar quem acessou seus dados e quando, não apenas protege privacidade, mas gera conhecimento sobre padrões de uso de informação pela administração pública. Este conhecimento, agregado e anonimizado, pode informar políticas de melhoria de processos e identificação de redundâncias.

Metadados como contexto semântico: X-Road não transfere apenas dados brutos, mas dados acompanhados de metadados padronizados que descrevem sua proveniência, qualidade, restrições de uso e relações com outros conjuntos de dados. Estes metadados constituem camada de conhecimento que permite interpretação adequada dos dados – dimensão frequentemente negligenciada em infraestruturas puramente técnicas de dados.

Catálogo de serviços como repositório de conhecimento organizacional: O catálogo de serviços do X-Road, que documenta quais dados estão disponíveis, de quais organizações, sob quais condições e para quais propósitos, constitui forma de conhecimento organizacional explícito sobre capacidades informacionais do Estado. Este conhecimento é continuamente atualizado e acessível, contrastando com situações em muitas administrações onde desconhecimento sobre "quem tem quais dados" constitui barreira fundamental à colaboração.

Comunidade de prática como governança de conhecimento: A governança do X-Road, orquestrada pelo *Nordic Institute for Interoperability Solutions (NIIS)*²³, inclui comunidade internacional de prática que compartilha experiências de implementação, desafios enfrentados e soluções desenvolvidas. Esta comunidade, que inclui representantes de 22 países que adotaram X-Road, constitui mecanismo de Governança do Conhecimento em escala internacional, permitindo aprendizado coletivo sobre governança de DPI.

Interoperabilidade como pré-requisito para compartilhamento de conhecimento: Finalmente, ao resolver problema técnico de interoperabilidade, X-Road remove barreira fundamental que historicamente impediu compartilhamento efetivo de conhecimento entre organizações públicas. Quando diferentes órgãos podem efetivamente acessar e utilizar dados uns dos outros de forma padronizada e segura, criam-se condições técnicas para formas mais sofisticadas de colaboração e aprendizado interorganizacional.

No contexto estoniano, evidências sugerem que X-Road efetivamente habilitou convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados. O sistema de e-governance da Estônia, consistentemente ranqueado entre os mais avançados globalmente (Fetter; Rao; Eaves, 2025), não é meramente coleção de serviços digitais, mas ecossistema integrado onde dados fluem entre sistemas, decisões são informadas por informação atualizada,

23 NIIS (Nordic Institute for Interoperability Solutions) é organização sem fins lucrativos fundada conjuntamente pela Estônia e Finlândia em 2017 para governança internacional do X-Road. O NIIS coordena desenvolvimento, manutenção e disseminação da tecnologia X-Road entre países adotantes, gerencia comunidade de prática internacional, estabelece padrões técnicos e facilita compartilhamento de experiências de implementação. Modelo de governança do NIIS representa exemplo de como infraestrutura digital pública pode ser governada de forma multipartidária e colaborativa entre diferentes nações, transcendendo lógica puramente nacional ou proprietária.

e aprendizados sobre "o que funciona" podem ser sistematicamente capturados e difundidos. A capacidade de cidadãos estonianos de, por exemplo, acessar seus registros médicos completos independentemente de qual prestador de saúde visitaram, ou de verificar que suas declarações de impostos foram pré-preenchidas com dados corretos de múltiplas fontes, reflete não apenas boa Governança de Dados, mas também conhecimento organizacional sobre como diferentes processos administrativos se relacionam e como criar experiências integradas para cidadãos.

5.2.4 Desafios e requisitos para convergência no contexto brasileiro

A convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados no contexto brasileiro, embora desejável e tecnicamente viável através de DPI como previsto na IND, enfrenta desafios significativos que transcendem dimensões puramente técnicas. Estes desafios refletem características estruturais da administração pública federal brasileira e requerem abordagens que integrem dimensões técnicas, institucionais, regulatórias e culturais.

Fragmentação institucional em escala sem precedentes: Com aproximadamente 37.000 entidades públicas federais, estaduais e municipais, o Brasil enfrenta desafio de coordenação ordens de magnitude superior ao de países como Estônia (população ~1,3 milhões) ou mesmo nações desenvolvidas de médio porte. Esta fragmentação não é meramente quantitativa – reflete também diversidade de capacidades técnicas, recursos disponíveis e maturidade de governança digital entre diferentes entes federativos. Levantamento do TCU (2023) ²⁴ identificou que em 2022 havia mais de 5.000 sistemas de informação ativos apenas no âmbito federal, com graus variados de documentação, manutenção e aderência a padrões. Implementar convergência entre Governança do Conhecimento (GC) e Governança de Dados (GD) neste contexto requer não apenas infraestrutura técnica, mas estratégias de capacitação, suporte e incentivo adequadamente diferenciadas para diferentes perfis de maturidade.

Silos tecnológicos versus silos organizacionais: A literatura sobre Governança do Conhecimento enfatiza frequentemente silos organizacionais – barreiras culturais e estruturais ao compartilhamento de conhecimento entre diferentes unidades. A literatura sobre Governança de Dados enfatiza silos tecnológicos – sistemas incompatíveis que impedem integração de dados. No contexto brasileiro, ambos tipos de silos coexistem e reforçam-se

24 TCU (Tribunal de Contas da União) é órgão de controle externo do governo federal brasileiro, auxiliando o Congresso Nacional na fiscalização contábil, financeira, orçamentária, operacional e patrimonial da União e das entidades da administração direta e indireta. Instituído pela Constituição de 1891 e com competências atuais definidas pela Constituição de 1988 (artigos 70 a 75) e Lei nº 8.443/1992. O TCU realiza auditorias e levantamentos sobre governança digital e tecnologia da informação na Administração Pública Federal, produzindo diagnósticos relevantes sobre maturidade de sistemas de informação governamentais.

mutuamente. Organizações que desenvolveram isoladamente seus próprios sistemas de informação ao longo de décadas não apenas enfrentam desafios técnicos de integração, mas também desenvolveram culturas organizacionais, processos e até linguagens específicas que dificultam colaboração. A implementação de DPI como X-Road pode resolver problemas técnicos de interoperabilidade, mas não dissolve automaticamente barreiras organizacionais – exigindo abordagens complementares de gestão de mudança organizacional.

Tensão entre autonomia federativa e coordenação nacional: A estrutura federativa brasileira, garantida constitucionalmente, confere autonomia significativa a estados e municípios. Esta autonomia é valor democrático fundamental, mas cria desafios para implementação de infraestruturas nacionais que dependem de adesão voluntária. A IND, tal como instituída pelo Decreto 12.198/2024, aplica-se diretamente apenas à administração pública federal. Sua extensão para estados e municípios dependerá de mecanismos de coordenação federativa, incentivos adequados e, fundamentalmente, demonstração de valor que justifique os custos de adesão. Experiência internacional, incluindo desafios enfrentados pela União Europeia na implementação de infraestruturas digitais transnacionais, sugere que esta dimensão político-institucional frequentemente constitui gargalo mais significativo que dimensões puramente técnicas.

Deficit de capacidades institucionais para orquestração: A convergência entre Governança do Conhecimento (GC) e Governança de Dados (GD) através de DPI requer, como argumentado por Mazzucato (2023), orquestração governamental proativa. Isto implica capacidades institucionais significativas: definição de padrões técnicos adequados; estabelecimento de modelos de governança que equilibrem centralização e autonomia; mecanismos de resolução de conflitos e tomada de decisões; capacitação contínua de servidores; e engajamento com múltiplos *stakeholders*. O histórico brasileiro em coordenação de infraestruturas digitais é misto. Sucessos como o SPB²⁵ (Sistema de Pagamentos Brasileiro) e, mais recentemente, o Pix demonstram que capacidades existem, particularmente quando há liderança técnica forte e mandato claro. Contudo, também há histórico de iniciativas de integração que não prosperaram por falta de continuidade política, recursos adequados ou

25 SPB (Sistema de Pagamentos Brasileiro) é conjunto de procedimentos, regras, instrumentos e sistemas operacionais integrados utilizados para transferência de recursos, processamento e liquidação de pagamentos entre pessoas, empresas, governos e Banco Central. Reestruturado e tornado operacional em abril de 2002 pelo Banco Central do Brasil, o SPB é considerado referência internacional em segurança, eficiência e confiabilidade, tendo servido de base técnica e institucional para desenvolvimento posterior do Pix (Sistema de Pagamentos Instantâneos) lançado em 2020.

clareza de governança. Assegurar que a IND não siga este último caminho requer desenho institucional robusto e comprometimento sustentado.

Desafios de legitimidade e confiança: Infraestruturas de compartilhamento de dados em larga escala, particularmente quando operadas por governos, enfrentam crescentemente questões de legitimidade social e confiança. Preocupações legítimas sobre vigilância, uso indevido de dados e potencial discriminatório de sistemas automatizados requerem que implementação de DPI seja acompanhada de salvaguardas robustas de privacidade, transparência efetiva e mecanismos de *accountability*. O X-Road estoniano incorpora muitas destas salvaguardas desde seu design original, refletindo contexto de sociedade com alto nível de confiança em instituições públicas. No Brasil, onde confiança institucional é historicamente mais frágil, pode ser necessário investir ainda mais em mecanismos de transparência e participação cidadã para construir legitimidade social para infraestruturas de dados governamentais.

Estes desafios não devem ser interpretados como impedimentos insuperáveis, mas como requisitos que devem ser explicitamente endereçados no design e implementação da convergência entre Governança do Conhecimento (GC) e Governança de Dados (GD) no Brasil. A experiência internacional com DPI, sintetizada por (Fetter; Rao; Eaves, 2025), sugere que sucesso não decorre primariamente de superioridade técnica, mas de alinhamento entre solução técnica, contexto institucional, modelo de governança e estratégia de implementação. Para o Brasil, isto implica que implementação da IND deve ser concebida não apenas como projeto de infraestrutura técnica, mas como projeto de transformação institucional que integra dimensões de dados e conhecimento sob governança orientada ao bem comum, nos termos propostos por Mazzucato (2023), com atenção explícita aos cinco pilares: propósito e direção; co-criação e participação; aprendizado coletivo e compartilhamento de conhecimento; acesso para todos e compartilhamento de recompensas; e transparência e *accountability*.

Tendo identificado os fundamentos teóricos e os desafios da convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados no contexto brasileiro, a próxima seção apresenta os elementos estruturantes do modelo proposto, organizados em três dimensões.

5.3 Elementos Estruturantes do Modelo

O modelo de convergência estratégica entre DPI e IND pode ser organizado em três dimensões.

- **Dimensão técnica:** envolve protocolos de interoperabilidade, padronização de metadados e mecanismos de segurança cibernética. A experiência do *X-Road* estoniano e do *UPI* indiano demonstra que a robustez técnica é condição necessária para a confiança social e a adesão dos usuários (Desai; Manoharan, 2024; Zuckerman, 2020).
- **Dimensão institucional:** abrange a definição de papéis (Executivos de Dados, Curadores), (CCGD, SGD/MGI) instâncias de governança e mecanismos de coordenação federativa. Aqui, o aprendizado internacional reforça que liderança centralizada deve coexistir com arranjos participativos para evitar concentração excessiva de poder (Mazzucato; Eaves, 2024).
- **Dimensão social:** refere-se à inclusão digital, transparência e participação cidadã. Como ressaltam (Gozzi; Comini; Perra, 2024), desigualdades de acesso podem comprometer a efetividade de qualquer infraestrutura digital. Portanto, o modelo deve incorporar políticas de capacitação digital e mecanismos de *accountability*.

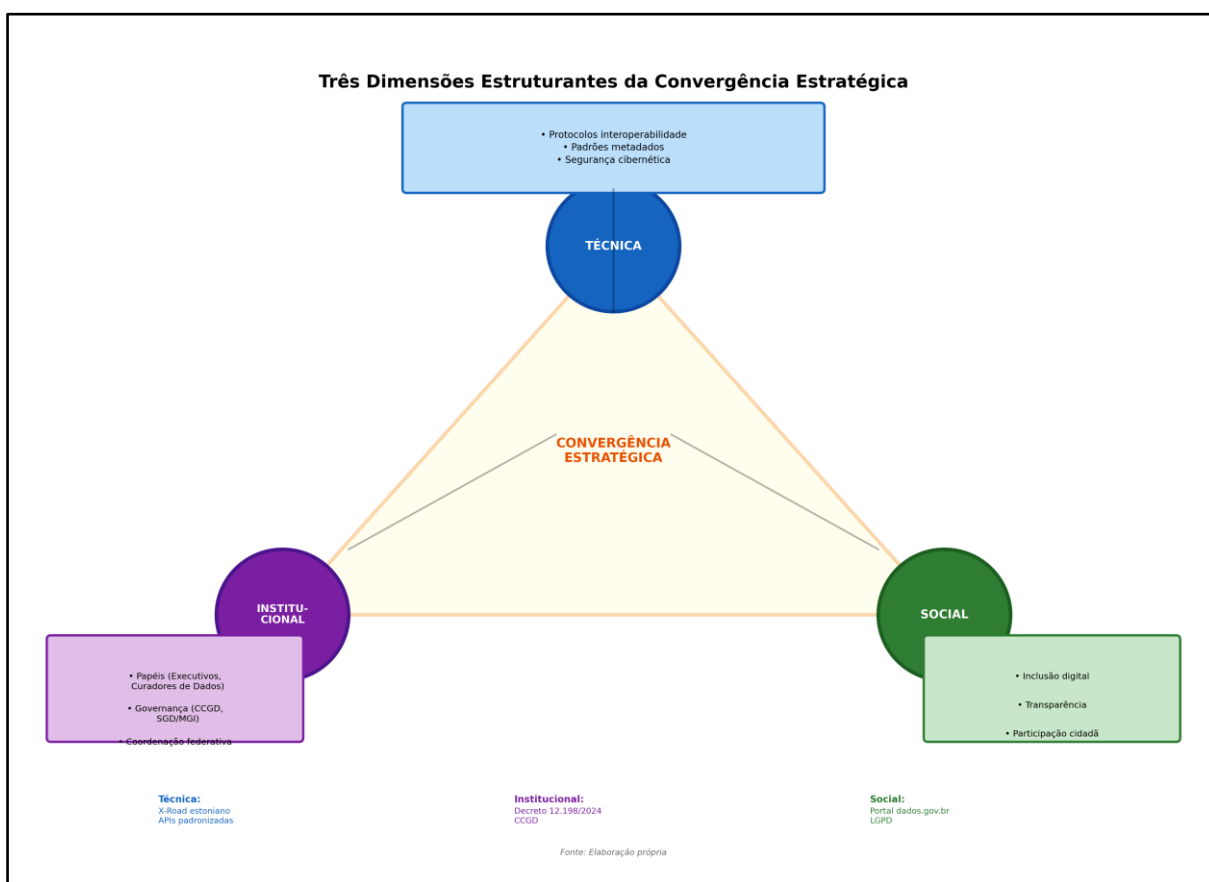


Figura 8 – Três Dimensões Estruturantes da Convergência Estratégica
Fonte: Elaboração própria.

Definidas as três dimensões estruturantes do modelo de convergência, faz-se necessário estabelecer indicadores que permitam monitorar sua implementação e avaliar maturidade ao longo do tempo.

5.4 Indicadores de Desempenho e Maturidade

Para que o modelo seja efetivamente implementado, são necessários indicadores de monitoramento que permitam avaliar progresso e maturidade.

A Tabela 12 sistematiza os principais indicadores de desempenho e maturidade da IND, organizados nas três dimensões estruturantes do modelo de convergência estratégica. Estes indicadores permitem não apenas medir resultados imediatos, mas também avaliar o grau de maturidade da IND no longo prazo.

Tabela 12 – Indicadores de Desempenho e Maturidade da Infraestrutura Nacional de Dados

Dimensão	Indicador	Métrica	Meta 2027	Fonte de Dados
TÉCNICA	Bases de dados integradas	Número absoluto de bases catalogadas e interoperáveis	500 bases prioritárias	Catálogo IND
	Tempo de resposta	Tempo médio de consulta via APIs (segundos)	< 2 segundos	Logs da Plataforma
	Conformidade com padrões	% de APIs aderentes aos padrões IND	95%	Auditoria técnica SGD/MGI
	Disponibilidade do sistema	Uptime da plataforma (%)	99,5%	Monitoramento infraestrutura
	Segurança cibernética	Incidentes críticos de segurança (número/ano)	0	Relatórios CISO
INSTITUCIONAL	Planos de governança aprovados	Número de órgãos com PGD	100 órgãos federais	SGD/MGI
	Adesão de órgãos federais	% de ministérios/agências aderentes à IND	80%	Registro SGD/MGI
	Executivos de Dados nomeados	Número de órgãos com Executivo nomeado	100 órgãos	Portaria MGI
	Curadores de Dados capacitados	Número de servidores certificados	1.000 curadores	ENAP/SGD

Dimensão	Indicador	Métrica	Meta 2027	Fonte de Dados
	Metas da Estratégia cumpridas	% de metas da Estratégia 2024-2027 atingidas	75%	Relatório anual SGD
SOCIAL	Acessos ao Catálogo Nacional	Número de acessos mensais ao catálogo	500.000/mês	Analytics portal
	Conjuntos de dados baixados	Downloads de bases abertas (mil/ano)	5.000 downloads	Portal dados.gov.br
	Aplicações desenvolvidas	Apps/serviços criados sobre IND	100 aplicações	Censo ecossistema
	Impacto em políticas públicas	Número de políticas informadas por dados IND	20 políticas	Avaliação qualitativa
	Confiança na proteção de dados	% cidadãos que confiam na proteção (survey)	60%	Pesquisa CGI.br
	Inclusão digital	% municípios com acesso à IND	50%	Mapeamento geográfico

Fonte: Elaboração própria baseada em Estratégia Federal de Governo Digital 2024-2027 (Brasil, 2024), (LOPES et al., 2022) e boas práticas internacionais.

Os indicadores da dimensão técnica focam em aspectos de interoperabilidade, desempenho e segurança da infraestrutura. Os indicadores institucionais avaliam a efetividade da governança e a capacitação de recursos humanos. Finalmente, os indicadores sociais mensuram o uso efetivo da infraestrutura pela sociedade e seu impacto em políticas públicas.

5.5 Síntese Crítica e Proposta de Implementação

A consolidação da convergência estratégica entre DPI e IND exige reconhecer limites e riscos. Entre eles, destacam-se a fragmentação federativa, a sobreposição normativa e a vulnerabilidade cibernética. Contudo, há também oportunidades significativas: alinhamento com recomendações da OCDE e do BID, promoção de inovação econômica a partir de dados abertos e fortalecimento da democracia digital (SANTOS; MADEIRA; ANDRADE, 2024).

Propõe-se, portanto, um modelo de implementação progressiva até 2030, ancorado em três frentes:

- I. fortalecimento da governança federativa,
- II. investimentos consistentes em interoperabilidade e segurança, e
- III. políticas de inclusão digital e capacitação em governança de dados.

Esse modelo visa transformar a IND em política de Estado, assegurando sua sustentabilidade e resiliência. A convergência estratégica entre DPI e IND não deve ser vista

apenas como alinhamento técnico, mas como processo institucional e social capaz de redefinir a forma como o Brasil estrutura e utiliza seus dados públicos.

6. APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE CONVERGÊNCIA ESTRATÉGICA

A análise comparativa entre o X-Road estoniano e a Infraestrutura Nacional de Dados brasileira permite identificar convergências, divergências e oportunidades de aprendizado institucional. Este capítulo estrutura-se em quatro dimensões analíticas: arquitetura técnica, governança institucional, marco normativo e maturidade DPI, fundamentando-se nos frameworks apresentados nos capítulos anteriores.

6.1 Comparação de Arquiteturas Técnicas

O X-Road estoniano adota arquitetura descentralizada ponto-a-ponto, onde cada órgão mantém autonomia sobre seus dados enquanto compartilha-os mediante protocolos padronizados. Os servidores de segurança (*security servers*) funcionam como gateways institucionais, garantindo autenticação, criptografia e auditoria em cada transação. Esta descentralização contrasta com modelos centralizados tradicionais, eliminando pontos únicos de falha e distribuindo responsabilidades de manutenção e segurança.

A IND brasileira, conforme estabelecido pelo Decreto nº 12.198/2024, propõe arquitetura similar fundamentada em padrões de interoperabilidade e compartilhamento federado. Contudo, enfrenta desafios estruturais significativos: fragmentação entre 37.000 órgãos públicos, heterogeneidade tecnológica acumulada ao longo de décadas, e complexidade federativa que adiciona camadas de coordenação ausentes no modelo unitário estoniano.

Ambas as infraestruturas priorizam interoperabilidade técnica e semântica, mas diferem na escala de implementação. Enquanto o X-Road conecta aproximadamente 500 instituições em território de 45 mil km², a IND precisa operar em escala 74 vezes maior em número de órgãos e 189 vezes maior em extensão territorial, impactando diretamente requisitos de escalabilidade e resiliência.

6.2 Modelos de Governança: NIIS versus SGD/MGI

A governança do X-Road evolui gradualmente de modelo nacional para internacional através do *Nordic Institute for Interoperability Solutions* (NIIS). Fundado em 2017, o NIIS coordena desenvolvimento técnico, padronização e expansão internacional sem exercer controle centralizado sobre implementações nacionais. Esta estrutura multipartidária equilibra autonomia local com coordenação global, permitindo que países adaptem o X-Road às suas realidades enquanto mantêm compatibilidade técnica.

No Brasil, a Secretaria de Governo Digital (SGD) do Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos (MGI) concentra responsabilidades de Coordenação da IND. Este modelo centralizado facilita tomadas de decisão estratégicas, mas enfrenta desafios de legitimidade e efetividade em contexto federativo onde estados e municípios possuem autonomia constitucional. A ausência de estrutura federada formal, similar ao NIIS, pode limitar engajamento de entes subnacionais e adesão voluntária ao modelo proposto.

A experiência estoniana demonstra que governança efetiva de DPI requer balanceamento entre coordenação central e autonomia distribuída. O modelo NIIS evidencia vantagens de estruturas que institucionalizam participação de múltiplos *stakeholders* na definição de padrões e prioridades, reduzindo resistências e aumentando apropriação coletiva do sistema.

6.3 Marcos Normativos Comparados

O marco legal estoniano fundamenta-se no X-Road Act, legislação específica que estabelece obrigatoriedade de uso, responsabilidades institucionais, e mecanismos de *enforcement*. Esta clareza normativa contrasta com fragmentação legal brasileira, onde múltiplas legislações (Lei nº 14.129/2021 sobre Governo Digital, Decreto nº 12.198/2024 sobre IND, LGPD) coexistem sem hierarquização explícita de prioridades.

A obrigatoriedade do X-Road para órgãos públicos estonianos elimina problemas de adesão voluntária, acelerando expansão e consolidação da rede. No Brasil, o Decreto nº 12.198/2024 estabelece diretrizes para IND sem mecanismos coercitivos claros, dependendo de adesão gradual baseada em benefícios percebidos. Esta diferença impacta velocidade de implementação e alcance de massa crítica necessária para viabilizar efeitos de rede.

Ambos os marcos enfatizam proteção de dados pessoais, mas operacionalizam princípios diferentemente. O X-Road incorpora logs imutáveis com *blockchain*, rastreando cada acesso a dados e permitindo auditoria *ex-post*. A IND brasileira ainda desenvolve mecanismos técnicos equivalentes, operando sob princípios gerais da LGPD sem especificações técnicas obrigatórias de auditabilidade.

6.4 Análise de Maturidade DPI

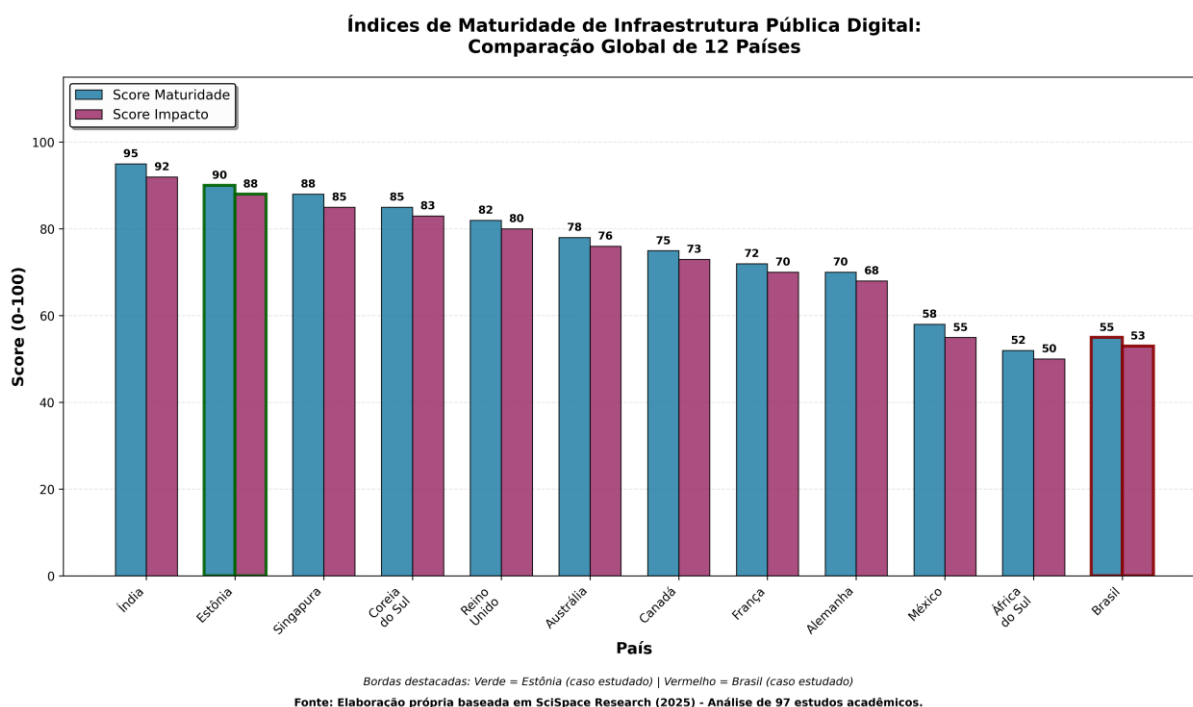
Aplicando o *framework* de Infraestrutura Pública Digital (Mazzucato et al., 2024; Fetter et al., 2025), observam-se diferenças substantivas de maturidade. Análise global

de implementações DPI posiciona a Estônia com score de maturidade de 90/100 (segunda posição mundial) e impacto socioeconômico de 85/100. Comparativamente, o Brasil apresenta maturidade de 55/100 e impacto de 50/100, evidenciando gap de 35 pontos em ambas as dimensões.

Esta disparidade reflete não apenas diferenças temporais — o X-Road opera há 24 anos contra implementação recente da IND — mas também distinções estruturais profundas. A Estônia construiu maturidade DPI através de décadas de investimento consistente, cultura organizacional favorável à digitalização, e contexto político que permitiu reformas profundas. O Brasil enfrenta legados de fragmentação institucional, descontinuidades administrativas, e resistências culturais à mudança que retardam transformações sistêmicas.

A correlação global entre maturidade DPI e impacto socioeconômico ($r \approx 0.8$) sugere que avanços na IND brasileira produzirão resultados proporcionais. Países com infraestruturas mais maduras — Índia (95/100), Estônia (90/100), Singapura (85/100) — demonstram impactos mensuráveis em inclusão digital, eficiência administrativa e desenvolvimento econômico. O desafio brasileiro consiste em acelerar evolução de maturidade mediante aprendizados de casos paradigmáticos, adaptados ao contexto nacional.

Figura 9 - Índices de Maturidade de DPI: Comparação Global de 12 Países



Fonte: Elaboração própria baseada em (Fetter; Rao; Eaves, 2025).

6.5 Possibilidades de Adaptação e Limitações

A análise comparativa evidencia que elementos técnicos do X-Road — protocolos de interoperabilidade, arquitetura descentralizada, mecanismos de segurança — são transferíveis ao contexto brasileiro. Experiências de implementação em Mato Grosso (2019) e Piauí (2024) demonstram viabilidade técnica de replicação do X-Road em contextos subnacionais brasileiros, validando compatibilidade tecnológica.

Contudo, a transferência de modelo governança institucional enfrenta limitações estruturais. O federalismo brasileiro, com três níveis de governo constitucionalmente autônomos, dificulta replicação de coordenação centralizada existente na Estônia unitária. Adaptações necessárias incluem:

(a) Criação de estruturas de governança multipartidárias, incorporando representação de estados, municípios e sociedade civil, análoga ao modelo NIIS mas adequada ao contexto federativo brasileiro;

(b) Mecanismos de incentivos positivos que promovam adesão voluntária à IND mediante benefícios tangíveis (financiamento condicionado, acesso a serviços federais, simplificação de processos), compensando ausência de obrigatoriedade legal;

(c) Estratégia de implementação gradual focada em casos de uso de alto valor agregado, demonstrando benefícios concretos e construindo legitimidade bottom-up ao invés de imposição *top-down*.

A experiência estoniana oferece lições processuais valiosas: início com serviços de alto impacto (saúde, tributação), investimento em capacitação e mudança cultural, comunicação transparente sobre benefícios e riscos, e desenvolvimento iterativo baseado em feedback de usuários. Estes elementos são transferíveis independentemente de diferenças contextuais estruturais.

A análise realizada nos capítulos anteriores permitiu compreender a emergência das infraestruturas digitais públicas como eixos estruturantes da transformação digital no setor público. A *Digital Public Infrastructure* (DPI), consolidada no cenário internacional, e a Infraestrutura Nacional de Dados (IND), recentemente institucionalizada no Brasil, revelaram-se não apenas como conceitos normativos e arquiteturas técnicas, mas como expressões de políticas públicas orientadas à criação de valor coletivo. O Capítulo IV avançou ao propor um modelo de convergência estratégica entre *Digital Public Infrastructure* (DPI) e IND, fundamentado em dimensões técnicas, institucionais e sociais, com indicadores de desempenho e maturidade.

O presente capítulo tem como objetivo aplicar esse modelo à realidade brasileira, analisando como ele pode ser operacionalizado no contexto da administração pública federal. Para tanto, parte-se da contextualização da governança de dados no país, avança-se para a proposta de implementação prática, ilustra-se com estudo de caso aplicável e, por fim, apresentam-se projeções e recomendações futuras.

A comparabilidade entre Estônia e Brasil, contudo, deve ser contextualizada considerando diferenças estruturais profundas que transcendem dimensões puramente técnicas. A Estônia, com PIB per capita de aproximadamente USD 27.000 (2023) e IDH de 0.890, opera em contexto socioeconômico significativamente mais homogêneo que o Brasil (PIB per capita USD 9.500, IDH 0.760, com desigualdades regionais pronunciadas). Mais criticamente, a Estônia beneficia-se de acesso privilegiado a recursos e capacidades da União Europeia — incluindo fundos estruturais, programas de cooperação técnica, e *benchmarking* com outros estados-membros—que facilitaram investimentos consistentes em infraestrutura digital ao longo de duas décadas. O Brasil, embora possuindo economia substancialmente maior em termos absolutos (PIB total USD 2,1 trilhões vs. USD 37 bilhões da Estônia), enfrenta pressões distributivas mais intensas, fragmentação orçamentária entre três níveis de governo, e ausência de mecanismos supranacionais de coordenação e financiamento comparáveis aos europeus.

Estas assimetrias contextuais implicam que, enquanto soluções técnicas do X-Road são transferíveis mediante adaptação de código aberto, a trajetória de desenvolvimento da IND brasileira diferirá substancialmente da estoniana em velocidade, recursos disponíveis, e capacidade de manter investimento consistente. A comparação permanece válida e útil — o X-Road demonstra viabilidade técnica de *Digital Public Infrastructure* (DPI) descentralizada e oferece lições processuais aplicáveis — mas expectativas de replicação direta são irrealistas.

O Brasil necessitará desenvolver modelo próprio que incorpore princípios do X-Road adaptados à realidade de economia em desenvolvimento, federalismo complexo, e restrições fiscais ausentes no caso estoniano. A análise comparativa, portanto, orienta-se menos por "transplante" de modelo e mais por "aprendizado adaptativo" onde sucessos e fracassos estonianos informam desenho brasileiro considerando especificidades nacionais.

6.6 Contextualização da Governança de Dados no Setor Público Brasileiro.

O Brasil apresenta paradoxo digital significativo quando analisado sob perspectiva global de maturidade *Digital Public Infrastructure* (DPI). Embora ocupe posição relevante no UN *E-Government Development Index*, demonstrando sofisticação em serviços digitais federais, sua infraestrutura pública digital apresenta score de maturidade de 55/100 — equivalente à média latino-americana, mas inferior à média europeia (78,3) e asiática (77,5). Esta maturidade intermediária contrasta com fragmentação sistêmica resultante de 37.000 órgãos públicos distribuídos em estrutura federativa complexa, criando desafios únicos de interoperabilidade e coordenação comparativamente à Estônia que, com score de 90/100, gerencia aproximadamente 500 órgãos em modelo unitário.

O Brasil tem avançado significativamente na agenda de governança de dados, especialmente a partir da Lei nº 14.129/2021 (Lei de Governo Digital), que estabeleceu princípios de interoperabilidade, simplificação de serviços e centralidade no cidadão (Brasil, 2021). Em seguida, o Decreto nº 11.052/2022 consolidou a Política de Governança de Dados e Informações, introduzindo papéis como o Executivo de Dados e determinando a elaboração de planos de governança de dados por cada órgão (Brasil, 2022). O passo mais recente foi o Decreto nº 12.198/2024, que instituiu a Estratégia Federal de Governo Digital 2024–2027 e formalizou a criação da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) (Brasil, 2024).

Nesse arranjo, a Secretaria de Governo Digital (SGD/MGI) atua como órgão central de coordenação, enquanto o Comitê Central de Governança de Dados²⁶ (CCGD) exerce

26 CCGD (Comitê Central de Governança de Dados): Instância colegiada criada pelo Decreto nº 10.046/2019 para deliberação sobre políticas de compartilhamento de dados na administração pública federal.

papel deliberativo e normativo. Em paralelo, o Sistema de Administração dos Recursos de Tecnologia da Informação (SISP) funciona como rede técnica e operacional, reunindo as unidades de TI dos diferentes órgãos. Juntos, esses instrumentos compõem o tripé da governança de dados federal: coordenação estratégica, deliberação normativa e execução técnica.

Apesar desse arcabouço normativo robusto, a realidade de implementação revela desafios persistentes. A fragmentação federativa, a heterogeneidade de sistemas legados e a ausência de cultura organizacional voltada ao compartilhamento de dados dificultam a plena integração. Estudo de Franco (2024) indica que, embora a legislação avance, a maturidade prática da administração federal ainda é desigual, com órgãos altamente estruturados convivendo com outros em estágios iniciais. Da mesma forma, análises de usabilidade da INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais mostram que problemas de padronização e sobrecarga cognitiva limitam o uso efetivo por cidadãos e servidores (Camboim, 2023; Schmidt et al., 2022).

Nesse cenário, a aplicação do modelo de convergência estratégica proposto no Capítulo IV representa oportunidade para transformar avanços normativos em ações práticas de gestão, tecnologia e inclusão social, consolidando a IND como expressão brasileira da agenda global de *Digital Public Infrastructure* (DPI).

6.7 Implementação do Modelo de Convergência Estratégica

A implementação prática do modelo exige atuação simultânea em três dimensões complementares: técnica, institucional e social.

6.7.1 Dimensão técnica

No plano técnico, a prioridade é a interoperabilidade entre sistemas, utilizando padrões consolidados como DCAT-AP-BR²⁷ para metadados e APIs abertas para integração. O Catálogo Nacional de Dados (CND) deve ser ampliado como repositório central, garantindo não apenas a catalogação de bases, mas também mecanismos de busca, visualização e reuso de dados (Flausino *et al.*, 2024).

A segurança cibernética deve ser reforçada por meio de requisitos de anonimização, criptografia e rastreabilidade, alinhados à LGPD (Brasil, 2018). Tecnologias emergentes, como blockchain, podem ser exploradas para assegurar integridade e imutabilidade

27 DCAT-AP-BR: Perfil de aplicação brasileiro do padrão internacional DCAT (Data Catalog Vocabulary) para catalogação de metadados de conjuntos de dados. Desenvolvido para padronizar descrição de bases de dados governamentais no Brasil.

de registros (Melo; Dias, 2024). A inteligência artificial pode auxiliar na curadoria automática de metadados e na detecção de inconsistências.

6.7.2 Dimensão institucional

No âmbito institucional, é essencial consolidar papéis como Executivo de Dados e Curador de Dados, garantindo capacitação técnica e autoridade decisória. O CCGD deve funcionar como fórum de coordenação federativa, permitindo a articulação entre diferentes ministérios e autarquias. Além disso, mecanismos de auditoria e acompanhamento pelo Tribunal de Contas da União (TCU) devem assegurar conformidade e *accountability*.

A experiência internacional mostra que arranjos de governança bem-sucedidos combinam liderança centralizada com participação descentralizada (Mazzucato; Eaves, 2024). Assim, a SGD/MGI deve manter papel central, mas incentivar adesão voluntária de estados e municípios por meio de incentivos financeiros, capacitação e suporte técnico.

6.7.3 Dimensão social

No plano social, a IND deve ser percebida como infraestrutura inclusiva. Isso exige políticas públicas voltadas à redução da exclusão digital, como ampliação da conectividade em áreas periféricas e capacitação de cidadãos em competências digitais (Gozzi; Comini; Perra, 2024).

Além disso, é necessário promover transparência ativa: disponibilizar dados em formatos acessíveis, oferecer painéis de visualização amigáveis e estimular o reuso por startups, ONGs e universidades. Essa abertura reforça a confiança social e amplia o potencial de inovação.

6.8 Estudo de Caso Ilustrativo: Integração de Cadastros

Para ilustrar a aplicação prática do modelo, pode-se considerar a integração entre três bases críticas: Cadastro Único para Programas Sociais (CadÚnico), Receita Federal e Instituto Nacional do Seguro Social (INSS).

Atualmente, essas bases coexistem, mas nem sempre dialogam plenamente. O CadÚnico identifica famílias em situação de vulnerabilidade social; a Receita Federal mantém dados fiscais e de renda; e o INSS administra informações previdenciárias. A falta de interoperabilidade plena gera sobreposições, duplicidade de informações e limitações no desenho de políticas públicas.

A aplicação do modelo de convergência estratégica permitiria:

- **Na dimensão técnica**, integrar as três bases por meio de APIs padronizadas e metadados comuns, assegurando integridade e rastreabilidade dos dados.
- **Na dimensão institucional**, atribuir ao Executivo de Dados da SGD/MGI a responsabilidade de coordenar a integração, com curadores de dados em cada órgão garantindo a qualidade informacional.
- **Na dimensão social**, assegurar que os dados sejam utilizados para ampliar a personalização de políticas sociais, como o Bolsa Família, sem comprometer a privacidade dos cidadãos, em conformidade com a LGPD.

Os benefícios potenciais incluem maior precisão na focalização de benefícios sociais, redução de fraudes, agilidade em concessões previdenciárias e fortalecimento da capacidade estatal de formular políticas baseadas em evidências (SANTOS; MADEIRA; ANDRADE, 2024).

Entre os desafios, destacam-se a necessidade de harmonização normativa, a resistência organizacional ao compartilhamento e os riscos de exclusão digital de populações que não atualizam seus dados regularmente. Esses obstáculos podem ser mitigados por mecanismos de governança, campanhas de atualização cadastral e monitoramento constante da qualidade dos dados.

6.9 Síntese e Projeções Futuras

A aplicação prática do modelo de convergência estratégica aponta para um horizonte promissor até 2030. No curto prazo (2024–2027), a prioridade é estruturar a IND como infraestrutura funcional, com integração de bases prioritárias, consolidação do Catálogo Nacional de Dados e definição de indicadores de maturidade (Brasil, 2024).

No médio prazo (2027–2030), espera-se que a IND seja reconhecida como política de Estado, com governança federativa consolidada, interoperabilidade ampliada e participação ativa da sociedade civil. Nesse período, a convergência entre *Digital Public Infrastructure* (DPI) e IND deve traduzir-se em políticas públicas mais eficazes, transparentes e inclusivas, em consonância com a Agenda 2030 e as recomendações da OCDE e do BID.

No longo prazo, o desafio será garantir sustentabilidade e resiliência. Isso inclui assegurar financiamento contínuo, adaptar-se a novas tecnologias e fortalecer a proteção contra riscos cibernéticos. O sucesso da IND dependerá não apenas de soluções técnicas, mas da capacidade de manter a aliança estratégica entre governo, sociedade e setor privado, garantindo que os dados continuem sendo tratados como bem público essencial.

Tabela 13 – Maturidade de Infraestrutura Pública Digital: Comparação Global (12 Países)

País	Região	Score Maturidade ¹	Score Impacto ²	Tipo DPI Predominante
Índia	South Asia	95	95	Identity & Payments
Estônia	Europe	90	85	Identity & Payments
Singapura	East Asia	85	75	Governance & Services
União Europeia	Europe	75	55	Identity & Payments
China	East Asia	70	70	Sectoral Infrastructure
Reino Unido	Europe	70	50	Governance & Services
Bangladesh	South Asia	65	70	Identity & Payments
Brasil	Latin America	55	50	Governance & Services
Vietnã	Southeast Asia	50	45	Sectoral Infrastructure
Etiópia	Africa	40	35	Governance & Services
Nigéria	Africa	35	30	Governance & Services
Gana	Africa	35	30	Governance & Services

Fonte: Elaboração própria. Análise global de implementações *Digital Public Infrastructure* (DPI) baseada em revisão sistemática de 97 artigos acadêmicos.

Notas:

¹ Score de Maturidade: avalia grau de desenvolvimento técnico, alcance de implementação, e sofisticação da infraestrutura (escala 0-100).

² Score de Impacto: mensura efeitos socioeconômicos mensuráveis, incluindo inclusão digital, eficiência administrativa e desenvolvimento econômico (escala 0-100).

Observação: Correlação entre maturidade e impacto: $r \approx 0.8$ (forte correlação positiva), sugerindo que investimentos em maturidade DPI produzem resultados socioeconômicos proporcionais.

7. RESULTADOS ESPERADOS E IMPLICAÇÕES

A análise comparativa realizada nos capítulos anteriores permite antecipar resultados da implementação da IND brasileira à luz da experiência estoniana com X-Road. Este capítulo sistematiza contribuições teóricas e práticas da pesquisa, identificando implicações para política pública e desenvolvimento institucional.

7.1 Convergência Teórica: Governança do Conhecimento e Governança de Dados

A análise do caso X-Road confirma o pressuposto teórico que orienta esta pesquisa: infraestruturas públicas digitais efetivas não são projetos de tecnologia com implicações organizacionais — são projetos de transformação organizacional que utilizam tecnologia como meio. O que o X-Road revela, quando examinado além de seus componentes técnicos, é que os mecanismos de compartilhamento de dados só funcionaram porque evoluíram junto com processos institucionais de aprendizado, desenvolvimento de capacidades e gestão de mudança. Essa coevolução entre infraestrutura técnica e capacidade organizacional é precisamente o que a literatura sobre Governança do Conhecimento descreve como condição para que sistemas de informação gerem valor duradouro — e é o que distingue o caso estoniano de iniciativas de interoperabilidade que avançaram tecnicamente, mas não produziram mudança nos padrões de colaboração interinstitucional.

Essa convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados opera em camadas que não se resolvem independentemente. No plano técnico-organizacional, sistemas e processos de trabalho precisam coevoluir: não basta expor dados via API se as organizações que deveriam consumi-los não desenvolveram capacidade de interpretá-los e incorporá-los às suas rotinas decisórias. No plano institucional, regras formais de compartilhamento dependem de normas informais e culturas organizacionais que as tornem praticáveis — o X-Road levou anos para construir a confiança interinstitucional que hoje parece natural no contexto estoniano. No plano estratégico, escolhas sobre arquitetura técnica carregam implicações sobre distribuição de poder e autonomia organizacional que não podem ser tratadas como questões secundárias a serem resolvidas depois que o sistema estiver funcionando. Para a IND brasileira, ignorar qualquer dessas camadas não simplifica a implementação — apenas desloca o problema para uma fase em que será mais custoso enfrentá-lo.

7.2 Framework de Maturidade Adaptado ao Contexto Brasileiro

A aplicação do framework de seis atributos de DPI ao contexto brasileiro (Mazzucato et al., 2024) não produz um diagnóstico uniforme: os atributos têm pesos diferentes conforme a realidade institucional e técnica do país. Interoperabilidade, modularidade, abertura e escalabilidade emergem como prioridades imediatas, porque respondem diretamente ao problema estrutural que a IND enfrenta — um parque tecnológico fragmentado em cerca de 37.000 órgãos, com capacidades radicalmente desiguais e sistemas acumulados por décadas sem planejamento de integração. Nesses quatro atributos, a experiência do X-Road oferece referências técnicas diretamente aplicáveis: protocolos obrigatórios de interoperabilidade evitam a proliferação de soluções incompatíveis; arquitetura modular permite adesão progressiva sem exigir que municípios de menor porte adotem simultaneamente todos os componentes; código aberto promove transparência e apropriação técnica por comunidades especializadas; distribuição horizontal de processamento evita os gargalos que uma arquitetura centralizada produziria na escala brasileira. O atributo de minimização de dados, embora menos discutido na literatura de DPI, tem relevância particular neste contexto: manter dados sob custódia das instituições originárias e compartilhar apenas o estritamente necessário para cada finalidade não é apenas exigência da LGPD — é também condição política para viabilizar adesão voluntária em ambiente de desconfiança interinstitucional historicamente enraizada.

7.3 Trajetória de Implementação: Lições do Caso Estoniano

A trajetória do X-Road não é replicável em sua forma, mas é instrutiva em seus mecanismos. O contexto estoniano pós-1991 ofereceu condições excepcionais — estado recém-reconstituído, população pequena e homogênea, ausência de legados burocráticos consolidados — que permitiram escolhas radicais de design que seriam politicamente inviáveis em qualquer democracia federativa de grande porte. O Brasil não dispõe dessas condições e não as terá. O que pode extrair do caso estoniano não é o modelo, mas a lógica de construção de legitimidade: o X-Road não foi adotado porque era tecnicamente superior, mas porque demonstrou valor concreto e rapidamente perceptível para os atores que precisavam aderir. Prescrições médicas eletrônicas, declarações fiscais simplificadas, eliminação de deslocamentos presenciais — serviços com benefícios tangíveis para cidadãos e servidores — criaram a base de apoio político que sustentou investimentos de longo prazo através de múltiplos ciclos eleitorais. Para a IND, essa lição se traduz em uma escolha estratégica de implementação: priorizar casos de uso com impacto visível e imediato, em vez de construir infraestrutura de base sem casos de uso que

demonstrem seu valor. A descontinuidade administrativa que historicamente fragiliza iniciativas federais brasileiras só pode ser contornada por institucionalização que transcenda mandatos — e institucionalização se constrói sobre demonstrações de resultado, não sobre arquiteturas técnicas, por mais bem desenhadas que sejam.

7.4 Implicações para Administração Pública Brasileira

Os resultados desta pesquisa apontam para transformações que a implementação efetiva da IND pressupõe e que vão além do escopo técnico do Decreto nº 12.198/2024.

A primeira é cultural: a transição de uma administração organizada em silos institucionais para uma administração em rede exige alterações em incentivos, estruturas de carreira e métricas de desempenho que nenhuma legislação de interoperabilidade resolve por si mesma. Órgãos que historicamente acumularam poder pela posse exclusiva de bases de dados não compartilharão essas bases porque um decreto estabelece que devem — compartilharão quando perceberem que o custo de não participar supera o custo de participar, o que depende de desenho cuidadoso de incentivos e de casos de uso que demonstrem ganho mútuo.

A segunda transformação é de capacidade técnica: gestão efetiva de DPI exige competências em arquitetura de sistemas, segurança da informação e governança de dados que são escassas no setor público brasileiro e que não se constroem por contratação pontual de consultoria — exigem programas estruturados de capacitação e carreiras que retenham profissionais qualificados.

A terceira é normativa: é de ordem normativa: a sobreposição entre a Lei de Governo Digital, a LGPD e o Decreto da Infraestrutura Nacional de Dados (IND) fomenta ambiguidades sobre a hierarquia das normas. Na prática, essa indefinição atua como um desincentivo à integração, uma vez que gestores, temendo sanções por compartilhamentos de dados que possam ser judicialmente contestados, optam pela inação defensiva. Portanto, a edição de uma lei específica para a IND, que liquide essas antinomias e estabeleça competências claras, deixa de ser apenas desejável para se tornar o pressuposto de viabilidade do modelo de adesão voluntária em larga escala.

Tabela 14 – Comparação Estrutural entre X-Road (Estônia) e IND (Brasil)

Dimensão de Análise	X-Road (Estônia)	IND (Brasil)
Arquitetura Técnica	Descentralizada ponto-a-ponto; ~628 organizações membros (E-Estônia, 2024); servidores de segurança (<i>security servers</i>) em cada órgão; território de 45 mil km ²	Proposta federada com coordenação central; ~ 37.000 órgãos públicos a conectar (74x maior); território de 8,5 milhões km ² (189x maior)
Modelo de Governança	NIIS (Nordic Institute for Interoperability Solutions) – estrutura multipartidária internacional fundada em 2017; coordenação sem controle centralizado	SGD/MGI (Secretaria de Governo Digital / Ministério da Gestão e Inovação em Serviços Públicos) – modelo centralizado federal; desafios de legitimidade em contexto federativo
Marco Normativo	X-Road Act – legislação específica estabelecendo obrigatoriedade de uso para órgãos públicos; responsabilidades claras; mecanismos de <i>enforcement</i>	Decreto nº 12.198/2024 – estabelece diretrizes; adesão voluntária baseada em incentivos; ausência de mecanismos coercitivos; fragmentação legal (Lei 14.129/2021, LGPD)
Maturidade DPI¹	Score: 90/100 (2ª posição global); Impacto: 85/100 ; classificação: infraestrutura algorítmica governamental mais madura	Score: 55/100 (médio-baixo); Impacto: 50/100 ; Gap de 35 pontos em ambas dimensões; alinhado à média latino-americana
Tempo de Operação	24 anos de operação contínua (desde 2001); evolução incremental; múltiplas gerações tecnológicas; aprendizado acumulado	1 ano desde marco regulatório formal (2024); estágio embrionário de implementação; trajetória de desenvolvimento iniciando
Contexto Populacional	1,3 milhão de habitantes ; alta homogeneidade cultural; consenso social facilitado por escala reduzida	214 milhões de habitantes (164x maior) ; alta diversidade regional e socioeconômica; complexidade de coordenação ampliada
Sistema de Governo	República unitária ; coordenação centralizada viável; ausência de níveis subnacionais com autonomia constitucional	República federativa com três níveis autônomos (União, 26 estados + DF, 5.570 municípios); coordenação intergovernamental crítica

Fonte: Elaboração própria baseada em: (a) documentação técnica do X-Road (NIIS, 2024); (b) Decreto brasileiro nº 12.198/2024; (c) análise comparativa de frameworks Digital Public Infrastructure (DPI) (Mazzucato et al., 2024; Fetter et al., 2025); (d) dados populacionais e territoriais de fontes oficiais (Statistics Estonia, IBGE).

Notas:

¹ Scores de Maturidade e Impacto conforme metodologia descrita na Tabela 13, baseados em análise global de 97 estudos sobre implementações *Digital Public Infrastructure* (DPI).

Interpretação: Disparidades estruturais evidenciam que Brasil enfrenta desafios de escala (74x mais órgãos, 189x maior território, 164x maior população) e complexidade

institucional (federalismo vs. estado unitário) ausentes no contexto estoniano. Elementos técnicos do X-Road são transferíveis, mas modelo de governança requer adaptações profundas ao contexto brasileiro.

7.5 Contribuições da Pesquisa

Esta pesquisa contribui para um campo em que a literatura tende a tratar separadamente o que na prática é inseparável. Estudos sobre Governança do Conhecimento raramente examinam infraestruturas técnicas de dados; estudos sobre Governança de Dados frequentemente subestimam dimensões organizacionais e de aprendizado institucional. A contribuição teórica central desta dissertação está em demonstrar que essa separação disciplinar não é apenas analiticamente limitante — é praticamente consequente: iniciativas que tratam DPI como projeto de TI sem considerar dimensões de conhecimento e aprendizado organizacional tendem a produzir infraestruturas tecnicamente funcionais, mas institucionalmente inertes. O framework integrado proposto no Capítulo IV oferece instrumental conceitual para análises que superem essa limitação, aplicável a contextos além do caso brasileiro.

No plano metodológico, a abordagem comparativa desenvolvida — articulando análise documental, framework de maturidade DPI e análise institucional comparada — estabelece procedimento analítico replicável para avaliação de infraestruturas públicas digitais em contextos nacionais distintos. A sistematização das dimensões de análise e dos critérios de comparabilidade constitui contribuição para pesquisadores que investiguem trajetórias de DPI em outros países, particularmente em economias em desenvolvimento com estruturas federativas complexas.

Do ponto de vista prático, as recomendações estruturadas nos três horizontes temporais do Capítulo 7 não derivam de prescrições genéricas da literatura, mas de análise sistemática das condições que tornaram o X-Road bem-sucedido e das diferenças estruturais que tornam sua transposição direta inviável para o Brasil. Essa ancoragem empírica distingue as recomendações de formulações abstratas e aumenta sua utilidade para gestores e formuladores de política que precisam tomar decisões em contexto de recursos limitados e pressões de curto prazo.

8. CONCLUSÕES

Esta dissertação investigou como o modelo X-Road estoniano pode orientar a convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados na implementação da Infraestrutura Nacional de Dados brasileira. A análise comparativa realizada permite responder à questão central da pesquisa e formular contribuições teóricas e práticas relevantes para transformação digital da administração pública brasileira.

8.1 Síntese da Pesquisa

A pesquisa demonstrou que infraestruturas públicas digitais efetivas constituem fenômenos sociotécnicos complexos que transcendem suas dimensões tecnológicas. O caso X-Road exemplifica essa complexidade: seu sucesso resulta não apenas de escolhas arquiteturais tecnicamente superiores, mas do alinhamento entre infraestrutura técnica, modelo de governança institucional, marco normativo claro e cultura organizacional favorável à colaboração interinstitucional. Isolar qualquer um desses elementos e tratá-lo como variável independente das demais produz análises que explicam pouco sobre porque algumas iniciativas de interoperabilidade prosperam enquanto outras, tecnicamente equivalentes, não avançam.

O framework analítico integrado desenvolvido nesta dissertação — articulando conceitos de *Digital Public Infrastructure* (Mazzucato et al., 2024), Governança do Conhecimento e Governança de Dados — permitiu identificar seis dimensões críticas para a comparação X-Road/IND: arquitetura técnica, modelo de governança, marco normativo, maturidade DPI, contexto institucional e trajetória de implementação. Examinadas em conjunto, essas dimensões evidenciam que Brasil e Estônia compartilham objetivos similares — interoperabilidade governamental, eficiência administrativa, melhoria de serviços públicos — mas enfrentam condições estruturais radicalmente distintas. Escala territorial, complexidade federativa, fragmentação institucional e legados tecnológicos heterogêneos impõem ao Brasil desafios ausentes no contexto estoniano, o que torna a comparação instrutiva precisamente porque revela o que precisa ser adaptado, não apenas o que pode ser transferido.

Os dados de análise global de DPI quantificam parte dessa disparidade: a Estônia apresenta score de maturidade de 90/100, posicionando-se como segunda infraestrutura pública digital mais desenvolvida mundialmente; o Brasil apresenta 55/100, alinhado à média latino-americana, com gap de 35 pontos em relação ao paradigma estoniano. Essa diferença reflete não apenas déficit temporal — o X-Road opera há 24 anos — mas sobretudo distância em

capacidades institucionais, políticas e organizacionais que nenhum investimento tecnológico isolado é capaz de eliminar.

8.2 Resposta à Questão de Pesquisa

A questão central da pesquisa — como o modelo X-Road estoniano pode orientar a convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados na implementação da IND brasileira — admite resposta que opera em três planos distintos, cada um com implicações práticas diferentes.

No plano técnico, os elementos arquiteturais do X-Road — descentralização, interoperabilidade mediante protocolos padronizados, segurança distribuída, auditabilidade via *logs* imutáveis — são diretamente transferíveis ao contexto brasileiro. As experiências de implementação em estados brasileiros como Mato Grosso e Piauí validam essa viabilidade técnica e fornecem evidências de que a adaptação é possível sem redesign fundamental da arquitetura original.

No plano institucional, o modelo de governança do X-Road — particularmente sua evolução para estrutura multipartidária através do NIIS — oferece lições valiosas, mas requer adaptações profundas ao federalismo brasileiro. A coordenação efetiva da IND demandará estruturas que equilibrem liderança federal com participação significativa de estados, municípios e sociedade civil, superando tradições centralizadoras que historicamente limitaram o alcance de iniciativas federais de integração.

No plano processual, a trajetória estoniana revela que o fator mais difícil de transferir não é tecnológico nem normativo, mas político: manter prioridade estratégica consistente à transformação digital através de múltiplos ciclos eleitorais, investir em capacitação como política de Estado e não como projeto de governo, e construir confiança pública mediante transparência sobre riscos e benefícios. Esses fatores não constam em decretos nem em arquiteturas de sistemas — emergem de escolhas de liderança que precisam ser refeitas continuamente.

A convergência entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados, demonstrada no caso X-Road, não é resultado automático da implantação de infraestrutura técnica. Manifesta-se quando sistemas e processos organizacionais coevoluem, quando regras formais de compartilhamento são complementadas por normas informais e cultura colaborativa, e quando decisões sobre arquitetura técnica são tratadas como decisões sobre distribuição de

poder e modelos de coordenação — não como questões secundárias a serem resolvidas após a implantação.

O sujeito humano, neste sentido, não é variável residual do modelo — é o agente que dá sentido à convergência. Dados tornam-se conhecimento quando servidores os interpretam à luz de contexto que só eles possuem; políticas melhoram quando gestores aprendem com evidências e ajustam suas práticas; a confiança social se constrói quando cidadãos percebem que suas informações são tratadas com integridade e propósito público. DPIs robustas como o X-Road criam as condições de possibilidade para tudo isso — mas não substituem a agência humana que transforma possibilidade em realidade.

8.3 Contribuições da Pesquisa

A contribuição teórica central desta dissertação está na proposição de framework integrado que articula Digital Public Infrastructure, Governança do Conhecimento e Governança de Dados como dimensões interdependentes de um mesmo fenômeno sociotécnico. A literatura existente tende a tratar essas três áreas em separado, com consequências analíticas que limitam a compreensão de porque iniciativas de interoperabilidade falham mesmo quando tecnicamente bem executadas. O framework proposto oferece instrumental conceitual para análises que superem essa fragmentação disciplinar.

No plano metodológico, a abordagem comparativa desenvolvida — combinando análise documental sistemática, framework de maturidade DPI e análise institucional comparada — estabelece procedimento analítico replicável para avaliação de infraestruturas públicas digitais em contextos nacionais distintos. As dimensões de análise identificadas e os critérios de comparabilidade sistematizados constituem contribuição para pesquisadores que investiguem trajetórias de DPI em outros países, particularmente economias em desenvolvimento com estruturas federativas complexas.

Do ponto de vista empírico, a análise comparativa X-Road/IND — sustentada por dados de análise global de maturidade DPI e pelo *framework* da UCL (Fetter et al., 2025) — estabelece baseline documentado para avaliações futuras da evolução brasileira, contribuição que se tornará mais valiosa à medida que a IND avançar em sua implementação e dados longitudinais permitirem comparações mais robustas.

A contribuição prática consiste nas recomendações estruturadas no Capítulo VII, cuja especificidade e ancoragem empírica as distinguem de prescrições genéricas. A distinção entre o que é tecnicamente transferível, o que requer adaptação institucional e o que precisará

ser construído no contexto brasileiro — elaborada ao longo dos capítulos analíticos — traduz-se em recomendações que reconhecem restrições reais em vez de projetar condições ideais que o Brasil não possui e não possuirá no horizonte relevante de implementação.

8.4 Limitações e Estudos Futuros

A pesquisa apresenta limitações que devem ser reconhecidas:

1. Metodológicas: Análise documental, embora rigorosa, não substitui observação direta de processos de implementação. Estudos futuros beneficiar-se-iam de etnografia organizacional, entrevistas com atores-chave e análise de trajetórias de decisão.
2. Temporais: IND brasileira encontra-se em estágio inicial de implementação; avaliações definitivas de seu sucesso ou fracasso requerem perspectiva temporal mais longa. Pesquisas futuras devem acompanhar longitudinalmente evolução da IND, documentando aprendizados e ajustes.
3. Comparativas: Análise focou em dois casos (Estônia e Brasil); expansão para estudos multicascos — incorporando Índia (Aadhaar/UPI), Singapura, países nórdicos — enriqueceria compreensão de trajetórias alternativas de desenvolvimento de DPI.
4. Setoriais: Análise privilegiou dimensão macro institucional; estudos futuros devem aprofundar análise setorial (saúde, educação, segurança pública), identificando especificidades de implementação de DPI em diferentes domínios de políticas públicas.

8.5 Agenda de pesquisa futura

A agenda de pesquisa futura inclui:

- (a) Avaliação de impacto da IND mediante métricas de eficiência administrativa, inclusão digital e satisfação de cidadãos e servidores;
- (b) Análise de processos de mudança organizacional associados à implementação de DPI, identificando resistências, facilitadores e fatores críticos de apropriação institucional;
- (c) Investigação de dimensões políticas e distributivas de DPI, analisando como arquiteturas técnicas impactam distribuição de poder, autonomia organizacional e capacidades de coordenação entre níveis de governo;

(d) Estudos comparativos Sul-Sul, analisando trajetórias de desenvolvimento de DPI em países em desenvolvimento, identificando alternativas aos modelos europeus e asiáticos frequentemente tomados como referência.

8.6 Considerações Finais

A transformação digital da administração pública não é imperativa apenas de eficiência — é condição para que o Estado consiga coordenar respostas a problemas que nenhuma instituição isolada tem capacidade de enfrentar. A pandemia de COVID-19 evidenciou o custo concreto da fragmentação informacional: sistemas incapazes de compartilhar dados tempestivamente comprometem não apenas a qualidade dos serviços cotidianos, mas a capacidade do Estado de agir em situações em que a velocidade de resposta tem consequências diretas sobre vidas.

O caso X-Road demonstra que infraestruturas públicas digitais de qualidade são construíveis — não apenas em economias ricas ou tecnologicamente avançadas, mas em contextos que partiram de condições precárias e transformaram, ao longo de décadas de esforço consistente, a forma como o Estado se relaciona com cidadãos e com si mesmo. Esse resultado não foi produzido por tecnologia superior, mas por clareza estratégica, liderança comprometida e capacidade de sustentar prioridades através das discontinuidades inevitáveis de qualquer processo político de longo prazo.

O Brasil possui condições objetivas para percorrer trajetória análoga, ainda que por caminhos distintos e em escala incomparavelmente mais complexa. Possui base normativa consolidada, capacidades técnicas distribuídas em pontos específicos do sistema federal, experiências bem-sucedidas de infraestrutura digital — o Pix e o Gov.br demonstram que o país consegue construir plataformas de adoção massiva quando há liderança técnica forte e mandato claro. O que a IND adiciona a esse repertório é a camada de interoperabilidade que ainda falta: não mais plataformas setoriais de excelência, mas a infraestrutura que as conecta e permite que os dados produzidos em cada ponto do sistema sirvam a propósitos que nenhum sistema isolado consegue realizar. Se esta pesquisa contribuir para tornar mais clara a distinção entre o que já existe, o que precisa ser construído e o que precisará ser inventado nesse processo, terá cumprido seu propósito.

9. REFERÊNCIAS

ABRAHAM, R. et al. Data governance: a conceptual framework, structured review, and research agenda. *International Journal of Information Management*, [S. l.], v. 49, p. 424–438, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.07.008>.

ACKOFF, R. L. From data to wisdom. *Journal of Applied Systems Analysis*, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 3–9, 1989.

ANTHES, G. X marks the spot: estonia is the first nation to use blockchain technology for data security on a national scale. *Communications of the ACM*, [S. l.], v. 58, n. 6, p. 18–20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1145/2754955>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10520: informação e documentação – citações em documentos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14724: informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6023: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BAHEER, A. K.; LAMAS, D.; SOUSA, S. Digital public infrastructure: a review of digital building blocks for interoperability. In: *CONFERENCE ON ELECTRONIC GOVERNANCE AND OPEN GOVERNMENT COLLABORATION*, 13., 2020, Athens. Proceedings [...]. New York: ACM, 2020. p. 112–125. DOI: <https://doi.org/10.1145/3428502.3428511>.

BEDFORD, D. S.; SANCHEZ, M. *Knowledge Networks and Public Value Governance: articulating multiple actors in the digital era*. Washington, DC: World Bank Publications, 2021.

BISPAL, J. et al. Legacy information systems: issues and directions. *IEEE Software*, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 103–111, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/52.795104>.

BRASIL. Decreto nº 1.048, de 21 de janeiro de 1994. Dispõe sobre o Sistema de Administração dos Recursos de Informação e Informática, da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1994. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d1048.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Decreto nº 7.579, de 11 de outubro de 2011. Dispõe sobre o Sistema de Administração dos Recursos de Tecnologia da Informação - SISIP, do Poder Executivo federal. Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/decreto/d7579.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Decreto nº 10.046, de 9 de setembro de 2019. Dispõe sobre a governança no compartilhamento de dados no âmbito da administração pública federal e institui o Cadastro Base do Cidadão e o Comitê Central de Governança de Dados. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 set. 2019. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D10046.htm>. Acesso em: 15 maio 2026.

BRASIL. Decreto nº 12.198, de 24 de setembro de 2024. Dispõe sobre a Infraestrutura Nacional de Dados (IND) e institui a Estratégia Federal de Governo Digital para o período de 2024 a 2027. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12198.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Decreto-Lei nº 200, de 25 de fevereiro de 1967. Dispõe sobre a organização da Administração Federal, estabelece diretrizes para a Reforma Administrativa e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1967. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0200.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal (Lei de Acesso à Informação). Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112527.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BRASIL. Lei nº 14.129, de 29 de março de 2021. Dispõe sobre princípios, regras e instrumentos para o Governo Digital e para o aumento da eficiência pública. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114129.htm. Acesso em: 7 maio 2026.

BUHR, W. What is infrastructure? Siegen: University of Siegen, Department of Economics, 2003. Disponível em: <https://www.uni-siegen.de/fb5/vwl/repec/sie/papers/107-03.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

CAMBOIM, G. F. Barreiras cognitivas e adoção de governo digital: um estudo com servidores públicos brasileiros. 2023. 215 f. Tese (Doutorado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/261952>. Acesso em: 7 maio 2026.

CARSE, A. Keyword: infrastructure: how a humble French engineering term shaped the modern world. In: HARVEY, P.; JENSEN, C. B.; MORITA, A. (ed.). Infrastructures and social complexity: a companion. London: Routledge, 2016. p. 23–35. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315622880-11>.

CENTER FOR GLOBAL DEVELOPMENT. Digital Public Infrastructure: what is it and how can it help achieve the SDGs? Washington, DC: CGD, 2021. Disponível em: <https://www.cgdev.org/publication/digital-public-infrastructure-what-it-and-how-can-it-help-achieve-sdgs>. Acesso em: 7 maio 2026.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. COVID Data Tracker. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2023. Disponível em: <https://covid.cdc.gov/covid-data-tracker>. Acesso em: 7 maio 2026.

CORDELLA, A.; BONINA, C. M. A public value perspective for ICT enabled public sector reforms: a theoretical reflection. *Government Information Quarterly*, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 512–520, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2012.03.004>.

CORDELLA, A.; TEMPINI, N. E-government and organizational change: reappraising the role of ICT and bureaucracy in public service delivery. *Government Information Quarterly*, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 279–286, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2015.03.005>.

DENCIK, L. et al. Data scores as governance: investigating uses of citizen scoring in public services. Cardiff: Data Justice Lab; Cardiff University, 2018. Disponível em: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/117517/>. Acesso em: 7 maio 2026.

DESAI, R.; MANOHARAN, A. P. Digital trust and user adoption in government platforms. *Public Administration Review*, [S. l.], v. 84, n. 1, p. 102–118, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/puar.13700>.

DIGITAL PUBLIC GOODS ALLIANCE. GovStack Community of Practice: building blocks for digital public infrastructure. Oslo: DPGA, 2022. Disponível em: <https://www.govstack.global/>. Acesso em: 7 maio 2026.

DRECHSLER, W.; MADISE, Ü. The digital governance revolution in Estonia. In: LINDQUIST, E.; VINCENT, S.; WANNA, J. (ed.). Handbook of Digital Government. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2020. p. 245–262. DOI: <https://doi.org/10.4337/9781785365638.00023>.

E-ESTONIA. The new frontier: X-Road launching towards data space. Tallinn: e-Estonia Briefing Centre, 2024. Disponível em: <https://e-estonia.com/the-new-frontier-x-road-launching-towards-data-space/>. Acesso em: 7 maio 2026.

E-ESTONIA. X-Road Factsheet 2024. Tallinn: e-Estonia Briefing Centre, 2024. Disponível em: <https://e-estonia.com/solutions/interoperability-services/x-road/>. Acesso em: 7 maio 2026.

EAVES, D.; SANDMAN, J. What is digital public infrastructure? UCL IIPP Blog, London, 5 abr. 2023. Disponível em: <https://medium.com/iipp-blog/what-is-digital-public-infrastructure-6fbfa74f2f8c>. Acesso em: 7 maio 2026.

EDWARDS, P. N. et al. Introduction: an agenda for infrastructure studies. Journal of the Association for Information Systems, [S. l.], v. 10, n. 5, p. 364–374, 2009. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/jais/vol10/iss5/6>. Acesso em: 7 maio 2026.

FETTER, J.; RAO, K.; EAVES, D. 2025 State of Digital Public Infrastructure Report: a look at measurement and prevalence as DPI transitions from experiment to scale. London: UCL Institute for Innovation and Public Purpose, 2025. Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/publications/2025/nov/2025-state-digital-public-infrastructure-report>. Acesso em: 7 maio 2026.

FRANCO, F. S. R. Brazilian federal public administration, open data, technologies and the right to information: the main strategies for the creation of broader public values. Brazilian Journal of Law, Technology and Innovation, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 140–192, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59224/bjlti.v2i1.140-192>.

FRISCHMANN, B. M. Infrastructure: the social value of shared resources. Oxford: Oxford University Press, 2012.

FUTURE SHIFT LABS. X-Road in Africa: Namibia's digital identity implementation report. Tallinn: Future Shift, 2024. Disponível em: <https://futureshiftlabs.com>. Acesso em: 7 maio 2026.

GOZZI, A.; COMINI, E.; PERRA, M. Digital inequalities and participation: social impacts of DPI. *Technology in Society*, [S. l.], v. 76, art. 102450, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102450>.

HANSEH, O.; LYYTINEN, K. Design theory for dynamic complexity in information infrastructures: the case of building the internet. *Journal of Information Technology*, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 1–19, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1057/jit.2009.19>.

HENMAN, P. Governing digitally: data, algorithms and the state. *Policy & Politics*, Bristol, v. 47, n. 3, p. 345–362, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1332/030557319X15608556891052>.

JANSSEN, M.; KUK, G. The challenges and opportunities of data-driven government in the public sector. *Government Information Quarterly*, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 625–634, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2016.09.004>.

KALVET, T. Innovation: a factor explaining e-government success in Estonia. *Electronic Government: An International Journal*, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 142–157, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1504/EG.2012.046264>.

KALVET, T.; KATTEL, R. *Innovation and e-Government: the Estonian case*. Tallinn: Praxis Center for Policy Studies, 2006.

KALVET, T.; TOOTS, A. *Economic Impacts of the X-Road: Estonia's e-government backbone*. Tallinn: Praxis Center for Policy Studies, 2016. Disponível em: <https://praxis.ee/en/xroad-impact>. Acesso em: 7 maio 2026.

KOTKA, T.; VARGAS, C. A.; KORJUS, K. *Estonia: the digital republic secured by blockchain*. London: PwC, 2016. Disponível em: <https://www.pwc.com/gx/en/services/legal/tech/assets/estonia-the-digital-republic-secured-by-blockchain.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

KOUROUBALI, A.; KATEHAKIS, D. G. The new European interoperability framework as a model for interoperable electronic health records. *Journal of Medical Internet Research*, [S. l.], v. 21, n. 8, art. e14820, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2196/14820>.

LOPES, K. M. G. et al. Intervening factors in the prioritization of rival public values in Brazilian digital government initiatives. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO — SEMEAD, 25., 2022, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: SEMEAD, 2022. p. 1–17.

MARGETTS, H.; DUNLEAVY, P. The second wave of digital-era governance: a quasi-paradigm for government on the Web. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, [S. l.], v. 371, n. 1987, art. 20120382, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0382>.

MARGETTS, H.; NAUMANN, A. *Government as a Platform: what can Estonia teach the UK?* Oxford: Oxford Internet Institute; University of Oxford, 2017. Disponível em: <https://oii.ox.ac.uk/government-platform-estonia>. Acesso em: 7 maio 2026.

MAZZUCATO, M. From market fixing to market-creating: a new framework for innovation policy. *Industry and Innovation*, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 140–156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/13662716.2016.1146124>.

MAZZUCATO, M. Governing the economics of the common good: from correcting market failures to shaping collective goals. *Journal of Economic Policy Reform*, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 1–24, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/17487870.2023.2280969>.

MAZZUCATO, M. *The Entrepreneurial State: debunking public vs. private sector myths*. London: Anthem Press, 2013.

MAZZUCATO, M. et al. *Digital Public Infrastructure: enabling an inclusive digital economy*. London: UCL Institute for Innovation and Public Purpose, 2024. (IIPP Working Paper Series, 2024/07).

MAZZUCATO, M.; EAVES, D.; VASCONCELLOS, B. *Digital Public Infrastructure and Public Value: what is 'public' about DPI?* London: University College London, 2024. (IIPP Working Paper Series, 2024-05). Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/publications/2024/mar/digital-public-infrastructure-and-public-value-what-public-about-dpi>. Acesso em: 7 maio 2026.

MAZZUCATO, M.; KATTEL, R. Mission-oriented innovation policy and dynamic capabilities in the public sector. *Industrial and Corporate Change*, [S. l.], v. 27, n. 5, p. 787–801, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dty032>.

MAZZUCATO, M.; RYAN-COLLINS, J. Putting value creation back into 'public value': from market-fixing to market-shaping. *Journal of Economic Policy Reform*, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 345–360, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/17487870.2022.2053537>.

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. *Machine, Platform, Crowd: harnessing our digital future*. New York: W. W. Norton & Company, 2017.

MELO, M. L. R. M.; DIAS, M. A. H. Tecnologia blockchain e seu impacto nos diversos setores da administração pública brasileira. *Revista Eixos Tech*, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 1–19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18406/2359-1269v11n32024393>.

MERGEL, I.; EDELMANN, N.; HAUG, N. Defining digital transformation: results from expert interviews. *Government Information Quarterly*, [S. l.], v. 36, n. 4, art. 101402, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.06.002>.

MUKHERJEE, A.; MARUWADA, S. *Fast-tracking development: a building blocks approach for digital public goods*. Washington, DC: Center for Global Development, 2021. Disponível em: <https://www.cgdev.org/publication/fast-tracking-development-building-blocks-approach-digital-public-goods>. Acesso em: 7 maio 2026.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. *The Knowledge-Creating Company: how Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford: Oxford University Press, 1995.

NORDIC INSTITUTE FOR INTEROPERABILITY SOLUTIONS. NIIS announces proof of concept for revolutionary X-Road 8 "Spaceship". Helsinki: NIIS, 2024. Disponível em: <https://www.niis.org/news-archive/2024/1/8/niis-announces-proof-of-concept-for-revolutionary-x-road-8-spaceship>. Acesso em: 7 maio 2026.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Digital Government Review of Estonia*. Paris: OECD Publishing, 2019. (OECD Digital Government Studies). DOI: <https://doi.org/10.1787/e4c6b4ec-en>.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Observatory of Public Sector Innovation (OPSI): X-Road trust federation for cross-border data exchange*. Paris: OECD, 2022. Disponível em: <https://oecd-opsi.org/innovations/x-road-trust-federation-for-cross-border-data-exchange/>. Acesso em: 7 maio 2026.

OTTO, G.; VOSS, G. Public infrastructure and private protection. *Agenda: A Journal of Policy Analysis and Reform*, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 189–191, 1995. Disponível em: [link suspeito removido]. Acesso em: 7 maio 2026.

PARKIN, B. India to expand digital payments with AI-powered voice transactions. *Financial Times*, London, 19 ago. 2023. Disponível em: <https://www.ft.com/content/a9a11275-a0f5-4f40-99e2-4c532afd77d4>. Acesso em: 7 maio 2026.

PARSONS, C. et al. The invisible costs of internet surveillance and control. *International Journal of Communication*, [S. l.], v. 11, p. 1–21, 2017.

POLANYI, K. *The Great Transformation: the political and economic origins of our time*. Boston: Beacon Press, 1944.

RAVAT, F.; ZHAO, Y. Data lakes: trends and perspectives. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATABASE AND EXPERT SYSTEMS APPLICATIONS*, 30., 2019, Linz. Proceedings [...]. Cham: Springer, 2019. p. 304–313. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27615-7_23.

SANCHEZ, M. Knowledge networks for public value governance: actors, structures and institutional dynamics. In: BEDFORD, D. S.; SANCHEZ, M. (ed.). *Knowledge Networks and Public Value Governance*. Washington, DC: World Bank Publications, 2021. cap. 3.

SANTOS, F. S.; MADEIRA, F. N.; ANDRADE, M. M. Governança das contratações públicas no governo digital. *Controle em Foco: Revista MPC-MG*, [S. l.], v. 4, n. 7, p. 56–69, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12111508>.

SARLET, I. W.; MOLINARO, C. A. Direito à informação e direito de acesso à informação como direitos fundamentais na Constituição Brasileira. *Revista da AGU*, Brasília, v. 13, n. 42, p. 9–38, out./dez. 2014.

SEN, A. K. *Commodities and Capabilities*. Amsterdam: North-Holland, 1985.

SULLIVAN, C.; BURGER, E. In the loop: regulating governance, governance of regulation. *Regulation & Governance*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 3–22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/rego.12101>.

TAMMPUU, P.; MASSO, A. 'Welcome to the virtual state': Estonian e-residency and the digitalised state as a commodity. *European Journal of Cultural Studies*, [S. l.], v. 21, n. 5, p. 543–560, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/1367549417751148>.

TORRISI, G. Public infrastructure: definition, classification and measurement issues. *Economics, Management, and Financial Markets*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 100–124, 2009.

TOTAPALLY, S. et al. *State of Aadhaar: a people's perspective*. New Delhi: Dalberg, 2019.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. Levantamento sobre governança de TI na Administração Pública Federal. Brasília, DF: TCU, 2023. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/>. Acesso em: 7 maio 2026.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. Accelerating the SDGs through Digital Public Infrastructure: a compendium of the potential of digital public infrastructure. New York: UNDP, 2023. Disponível em: <https://www.undp.org/publications/accelerating-sdgs-through-digital-public-infrastructure-compedium-potential-digital-public-infrastructure>. Acesso em: 7 maio 2026.

VARDANYAN, G.; KOCHARYAN, T. Cybersecurity strategies in digital government: mitigation of emerging threats. *Journal of Cyber Security*, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 88–104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyac012>.

VASSIL, K. Estonian e-Government Ecosystem: foundation, applications, outcomes. Washington, DC: World Bank, 2016. (Background paper for World Development Report 2016: Digital Dividends).

WEITZBERG, K. Biometrics, race making, and white exceptionalism: the controversy over universal fingerprinting in Kenya. *The Journal of African History*, [S. l.], v. 61, n. 1, p. 23–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185372000002X>.

WORLD BANK. Identification for Development (ID4D) and Digitalizing G2P Payments (G2Px) 2022 Annual Report. Washington, DC: World Bank Group, 2022. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099437402012317995/>. Acesso em: 7 maio 2026.

X-ROAD GLOBAL. Scaling interoperability across states for national digital transformation in Brazil. Case Studies Library, 21 out. 2024. Disponível em: <https://x-road.global/xroad-case-studies-library/2024/10/21/scaling-interoperability-across-states-for-national-digital-transformation-in-brazil>. Acesso em: 7 maio 2026.

X-ROAD GLOBAL. X-Road world map. Tallinn: NIIS, 2023. Disponível em: <https://x-road.global/xroad-world-map>. Acesso em: 7 maio 2026.

YOO, Y.; HENFRIDSSON, O.; LYYTINEN, K. Research commentary: the new organizing logic of digital innovation: an agenda for information systems research. *Information Systems Research*, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 724–735, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0322>.

ZUCKERMAN, E. The case for digital public infrastructure. Knight First Amendment Institute at Columbia University, New York, 2020. Disponível em:

<https://knightcolumbia.org/content/the-case-for-digital-public-infrastructure>. Acesso em: 7 maio 2026.

GLOSSÁRIO

A

Aadhaar: Sistema de identificação biométrica único da Índia que atribui número de identificação de 12 dígitos a cada residente, baseado em dados biométricos (impressões digitais, íris e fotografia facial). Lançado em 2009, cobre mais de 1,3 bilhão de pessoas.

API (Application Programming Interface): Interface de programação que permite comunicação padronizada entre diferentes sistemas de software. Define regras e protocolos para que aplicações conversem entre si sem necessidade de conhecer implementação interna.

Arquitetura Descentralizada: Modelo arquitetural onde dados e processamento são distribuídos entre múltiplos nós autônomos, ao invés de concentrados em servidor central único. No contexto do X-Road, significa que cada instituição mantém seus próprios dados e security servers.

Auditabilidade: Capacidade de rastrear e verificar todas as transações e operações realizadas em um sistema através de registros (logs) completos e imutáveis. Essencial para transparência e accountability em DPI.

B

Barramento de Serviços (ESB - Enterprise Service Bus): Arquitetura de software que facilita comunicação entre múltiplos sistemas através de hub central que roteia mensagens. Difere do modelo X-Road por depender de intermediação centralizada.

Bem Público Digital (DPG - Digital Public Goods): Software, dados, modelos de IA, padrões e conteúdo de código aberto que aderem a privacidade e outros padrões aplicáveis, não causam dano e ajudam a atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

C

Catálogo de Dados: Inventário centralizado que documenta quais conjuntos de dados existem, onde estão localizados, quem são seus custodiantes, e como podem ser acessados. Na IND, o Catálogo Nacional de Bases de Dados é componente central.

CCGD (Comitê Central de Governança de Dados): Instância colegiada de caráter consultivo e deliberativo instituída pelo Decreto nº 10.046, de 9 de setembro de 2019, que dispõe sobre a governança no compartilhamento de dados no âmbito da APF.

Certificado Digital: Documento eletrônico que vincula identidade de uma pessoa ou organização a um par de chaves criptográficas (pública e privada). Usado no X-Road para autenticação e assinatura digital de transações.

Convergência Estratégica: Conceito original proposto nesta dissertação que designa a integração deliberada e coordenada entre Governança do Conhecimento e Governança de Dados mediada por infraestruturas públicas digitais. Parte da premissa de que dados são insumos para o conhecimento e que o conhecimento contextualiza e confere significado aos dados — sendo DPIs como o X-Road o locus operacional dessa integração. Difere da simples coexistência dos dois domínios por exigir alinhamento institucional, técnico e normativo deliberado, com o sujeito humano — servidores, gestores e cidadãos — como agente e beneficiário central do processo.

Curador de Dados: Profissional responsável por gerir conjuntos específicos de dados dentro de uma organização, assegurando qualidade, atualização, documentação adequada e conformidade com políticas de governança.

D

Data Lake: Repositório centralizado que armazena grandes volumes de dados estruturados e não-estruturados em seu formato bruto (nativo), até que sejam necessários para análise. Diferencia-se de data warehouse por não requerer estruturação prévia.

Data Warehouse: Repositório centralizado de dados estruturados, integrados e otimizados para consultas analíticas e geração de relatórios. Dados são extraídos, transformados e carregados (ETL) de múltiplas fontes operacionais.

DIKW (Data-Information-Knowledge-Wisdom): Hierarquia conceitual que descreve progressão de valor: dados (fatos brutos) → informação (dados contextualizados) → conhecimento (informação compreendida) → sabedoria (conhecimento aplicado com discernimento ético).

DPI (Digital Public Infrastructure - Infraestrutura Pública Digital): Sistemas digitais compartilhados e interoperáveis que fornecem capacidades fundamentais para identificação digital, pagamentos eletrônicos e troca de dados. Análogos digitais de infraestruturas físicas como rodovias e redes elétricas.

E

e-Estônia: Portal oficial que documenta soluções de governo digital da Estônia, servindo como showcase internacional das capacidades tecnológicas e experiências de transformação digital do país.

e-Government (Governo Eletrônico): Uso de tecnologias da informação e comunicação (TIC) para melhorar prestação de serviços públicos, promover participação cidadã e aumentar transparência e eficiência governamental.

Executivo de Dados (Chief Data Officer - CDO): Autoridade máxima de governança de dados dentro de uma organização, responsável por estratégia de dados, conformidade regulatória, qualidade e maximização de valor de ativos informacionais.

F

Federalismo Digital: Modelo de governança de infraestrutura digital que equilibra coordenação necessária em aspectos técnicos essenciais com preservação de autonomia de diferentes níveis de governo, respeitando arranjos constitucionais federativos.

Framework: Estrutura conceitual e metodológica que fornece fundação reutilizável para desenvolvimento de sistemas, processos ou análises. Inclui princípios, padrões, melhores práticas e ferramentas organizadas de forma coerente.

G

Governança de Dados: Framework de pessoas, processos e tecnologias que assegura gestão adequada de ativos de dados organizacionais, incluindo qualidade, segurança, privacidade, conformidade regulatória e maximização de valor.

Governança do Conhecimento: Processos e estruturas através dos quais organizações gerenciam criação, compartilhamento, aplicação e proteção de conhecimento organizacional para atingir objetivos estratégicos e promover inovação.

I

IND (Infraestrutura Nacional de Dados): Conjunto de normas, políticas, arquiteturas, padrões, ferramentas tecnológicas e ativos de informação para promover uso estratégico de dados no Poder Executivo federal brasileiro. Instituída pelo Decreto nº 12.198/2024.

INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais): Sistema brasileiro de geração, armazenamento, acesso e compartilhamento de dados geoespaciais, instituído pelo Decreto nº 6.666/2008. Precursor conceitual da IND em domínio especializado.

Interoperabilidade: Capacidade de diferentes sistemas, organizações ou componentes trabalharem conjuntamente através de intercâmbio eficaz de informações e coordenação de processos, apesar de serem desenvolvidos independentemente.

J

JSON (JavaScript Object Notation): Formato leve de intercâmbio de dados legível por humanos e máquinas, amplamente usado em APIs modernas. Alternativa mais simples ao XML para representação de dados estruturados.

L

LGPD (Lei Geral de Proteção de Dados - Lei nº 13.709/2018): Marco regulatório brasileiro que disciplina tratamento de dados pessoais por entidades públicas e privadas, estabelecendo direitos dos titulares e obrigações dos controladores e operadores.

Log Imutável: Registro permanente e inalterável de transações ou eventos em um sistema. No X-Road, logs distribuídos documentam

todas as consultas de dados, criando trilha de auditoria à prova de adulteração.

M

Maturidade de DPI: Medida do grau de desenvolvimento, adoção e impacto de uma infraestrutura pública digital, avaliada através de dimensões como cobertura populacional, volume transacional, diversidade de serviços e resultados socioeconômicos.

Metadados: "Dados sobre dados" que descrevem características de conjuntos de dados como origem, formato, qualidade, restrições de uso, data de atualização e responsável. Essenciais para descoberta e uso adequado de dados.

Modularidade: Princípio de design que decompõe sistemas complexos em componentes independentes mas interoperáveis (módulos), permitindo desenvolvimento, manutenção e evolução descentralizados sem comprometer integração.

N

NIIS (Nordic Institute for Interoperability Solutions): Organização internacional sem fins lucrativos fundada por Estônia e Finlândia (2017) para governança do X-Road como projeto open source compartilhado, coordenando desenvolvimento e disseminação global.

Não-repúdio: Garantia criptográfica de que autor de transação digital não pode negar posteriormente sua autoria. Implementado através de assinaturas digitais baseadas em certificados pessoais ou organizacionais.

O

ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável): Conjunto de 17 objetivos globais estabelecidos pela ONU em 2015 como agenda para desenvolvimento sustentável até 2030, abrangendo erradicação da pobreza, educação, saúde, igualdade e sustentabilidade ambiental.

Once-Only Principle (Princípio de Uma Única Vez): Paradigma de governo digital onde cidadãos e empresas fornecem mesma informação ao governo apenas uma vez, sendo então reutilizada internamente mediante consentimento, eliminando redundâncias.

Open Source (Código Aberto): Software cujo código-fonte é disponibilizado publicamente sob licença que permite inspeção, modificação e redistribuição. X-Road tornou-se open source em 2017 sob licença MIT.

P

PKI (Public Key Infrastructure - Infraestrutura de Chaves Públicas): Sistema de certificados digitais, autoridades certificadoras e protocolos que viabiliza autenticação forte, criptografia e assinaturas digitais através de pares de chaves assimétricas.

Pix: Sistema de pagamentos instantâneos brasileiro operado pelo Banco Central, lançado em 2020. Permite transferências e pagamentos 24/7 em segundos, gratuitamente para pessoas físicas. Exemplo brasileiro de DPI.

Protocolo: Conjunto de regras e convenções que governam como dados são formatados, transmitidos e processados entre sistemas. Exemplos: HTTP para web, SOAP/REST para APIs, TLS para comunicação segura.

R

REST (Representational State Transfer): Estilo arquitetural para APIs que usa protocolos web padrão (HTTP) e é mais simples que SOAP. X-Road versão 6+ suporta REST além de SOAP legado.

S

Security Server: Componente fundamental do X-Road: gateway através do qual cada organização conecta-se ao ecossistema. Implementa autenticação, criptografia, assinatura digital e logging de todas as transações.

SGD (Secretaria de Governo Digital): Órgão do Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos responsável por coordenar transformação digital da administração pública federal brasileira e operar a IND.

Silo de Dados: Repositório de dados isolado, gerenciado por um departamento ou sistema específico, com acesso restrito e sem integração com outros sistemas da organização ou do Estado. Os silos de dados são o problema central que motiva esta dissertação: a APF brasileira opera com dezenas de milhares de sistemas desenvolvidos de forma descoordenada ao longo de décadas, criando fragmentação que prejudica a prestação de serviços e o planejamento estratégico. O X-Road foi projetado para superar silos sem exigir substituição dos sistemas existentes, via envelopamento (wrapping) de legados.

SISP (Sistema de Administração dos Recursos de Informação e Informática): Estrutura matricial de coordenação dos recursos de TI da administração pública federal direta, autárquica e fundacional brasileira, instituída pelo Decreto nº 1.048/1994 e reestruturada pelo Decreto nº 7.579/2011.

SOAP (Simple Object Access Protocol): Protocolo para troca de mensagens estruturadas em XML entre sistemas, mais complexo mas também mais robusto que REST. Usado em versões originais do X-Road.

T

TCU (Tribunal de Contas da União): Órgão de controle externo que fiscaliza uso de recursos públicos federais no Brasil, auxiliando o Congresso Nacional. Produz auditorias relevantes sobre governança de dados governamental.

Timestamping (Carimbo de Tempo): Processo de associar data e hora verificáveis criptograficamente a evento ou transação digital, provando que ocorreu em momento específico. Usado no X-Road para auditoria.

Transformação Digital: Mudança profunda e abrangente em como organizações operam e entregam valor, viabilizada por tecnologias digitais mas envolvendo também transformações em processos, cultura organizacional e modelos de negócio.

U

UPI (Unified Payments Interface): Sistema de pagamentos instantâneos da Índia lançado em 2016, processando bilhões de transações mensalmente. Considerado caso paradigmático de DPI de pagamentos.

Uptime: Porcentagem de tempo que sistema permanece operacional e disponível para usuários. X-Road mantém uptime de 99,9%, significando menos de 9 horas de indisponibilidade por ano.

X

X-Road: Infraestrutura de interoperabilidade e troca segura de dados da Estônia, operacional desde 2001, que conecta aproximadamente 2.000 instituições públicas e privadas por meio de security servers descentralizados e protocolos padronizados. Seu nome combina "X" (cruzamento/interseção) com "Road" (estrada), simbolizando a "encruzilhada digital" onde diferentes sistemas se encontram. É o caso paradigmático de DPI madura analisado nesta dissertação como referência para a Infraestrutura Nacional de Dados brasileira. Tornou-se open source em 2017, sendo atualmente gerido pelo NIIS.

X-Road Act: Lei estoniana de 2002 que tornou conexão ao X-Road obrigatória para órgãos públicos e estabeleceu princípios de governança. Marco legal fundamental para sucesso e adoção universal da infraestrutura.

XML (eXtensible Markup Language): Linguagem de marcação para codificar documentos de forma legível tanto por humanos quanto máquinas. Usado em SOAP e versões originais do X-Road para estruturar mensagens.

ANEXO – RECOMENDAÇÕES

Com base na análise comparativa X-Road/IND e nos resultados esperados identificados, apresentam-se recomendações estruturadas em três horizontes temporais: curto prazo (1-2 anos), médio prazo (3-5 anos) e longo prazo (5-10 anos).

1.1 Recomendações de Curto Prazo (1-2 anos)

1.1.1 Estabelecimento de Piloto Estratégico:

Implementar piloto da IND focado em caso de uso de alto impacto e visibilidade, preferencialmente envolvendo múltiplos níveis de governo. Recomenda-se a área de saúde pública — prescrições médicas eletrônicas compartilhadas entre SUS estadual e municipal — similar ao caso estoniano que conquistou legitimidade mediante benefícios tangíveis imediatos. A seleção do piloto deve observar quatro critérios cumulativos: benefícios claros e mensuráveis para cidadãos; necessidade de integração interinstitucional que evidencie o valor da IND; complexidade técnica que permita implementação em prazo razoável; e liderança de instituições com comprometimento verificável com o sucesso da iniciativa.

1.1.2 Criação de Estrutura de Governança Multissetorial e Federativa:

Estabelecer, mediante ato normativo próprio, uma estrutura de governança para a IND que integre representantes dos entes subnacionais, do setor produtivo, da academia e da sociedade civil. Esta instância deve possuir caráter consultivo em sua fase de implementação, evoluindo para competências deliberativas conforme a maturidade do arranjo institucional.

1.1.3 Fortalecimento de Capacidades e Letramento de Dados:

Implementar um programa estruturado de capacitação voltado à arquitetura de sistemas distribuídos, interoperabilidade e governança de dados, com alcance federativo (União, Estados e Municípios). A estratégia baseia-se em acordos de cooperação técnica com instituições de ensino superior e escolas de governo para a formação de multiplicadores. Como diretriz tática, deve-se priorizar a qualificação das células técnicas envolvidas no projeto-piloto, assegurando a transferência de conhecimento e a autonomia operacional das instituições participantes.

1.1.4 Definição de Padrões Mínimos de Interoperabilidade

Publicar norma técnica estabelecendo padrões mínimos obrigatórios de interoperabilidade, inspirados no modelo X-Road mas adaptados ao contexto brasileiro. Incluir: protocolos de comunicação, formatos de dados, mecanismos de autenticação, requisitos de segurança e auditabilidade.

Estes padrões devem ser tecnologicamente neutros (não especificando fornecedores ou produtos) mas suficientemente precisos para garantir compatibilidade técnica entre implementações.

1.2 Recomendações de Médio Prazo (3-5 anos)

1.2.1 Expansão Gradual da IND

Expandir IND mediante adesão voluntária incentivada, não imposição obrigatória. Estabelecer mecanismos de incentivos:

- (a) financiamento preferencial para entes aderentes;
- (b) acesso a serviços federais condicionado à adesão;
- (c) simplificação de prestações de contas e relatórios mediante integração via IND.

Priorizar expansão para áreas de políticas públicas com alta frequência de interação intergovernamental: assistência social (Cadastro Único), educação (censo escolar, FUNDEB), segurança pública (compartilhamento de informações criminais).

1.2.2 Institucionalização Normativa

Propor Projeto de Lei específico sobre IND, estabelecendo:

- (a) definição legal da infraestrutura e seus componentes;
- (b) atribuições e responsabilidades de cada nível de governo;
- (c) mecanismos de coordenação e governança;
- (d) princípios de compartilhamento de dados;
- (e) regras sobre financiamento e sustentabilidade.

Esta lei deve harmonizar legislações existentes (Lei nº 14.129/2021, Decreto nº 12.198/2024, LGPD), resolvendo ambiguidades e estabelecendo hierarquias claras.

1.2.3 Desenvolvimento de Ecossistema de Fornecedores

Estimular formação de ecossistema de fornecedores nacionais capacitados em implementação de componentes IND compatíveis com padrões estabelecidos. Realizar rodadas de capacitação técnica para empresas, publicar documentação técnica aberta e casos de uso, facilitar certificação de conformidade.

Objetivo: evitar dependência de poucos fornecedores internacionais, promover competição, reduzir custos e aumentar capacidade de suporte técnico distribuída nacionalmente.

1.2.4 Fortalecimento de Mecanismos de Auditabilidade

Implementar sistema nacional de auditoria de acessos a dados, inspirado nos logs blockchain do X-Road. Cidadãos devem poder consultar, via portal único, quais instituições acessaram seus dados, quando, por qual motivo legal, e quem autorizou o acesso.

Esta transparência constrói confiança, permite fiscalização social, e fornece evidências em casos de uso indevido.

1.3 Recomendações de Longo Prazo (5-10 anos)

1.3.1 Evolução para Modelo de Governança Federativo

Transformar estrutura de governança inicialmente centralizada (SGD/MGI) em modelo federativo com tomada de decisão compartilhada. Inspirar-se no modelo NIIS, onde coordenação técnica é exercida colaborativamente por múltiplos países.

No caso brasileiro, estados e municípios com implementações maduras da IND devem gradualmente assumir corresponsabilidade pela evolução dos padrões técnicos, desenvolvimento de novos serviços e governança do ecossistema.

1.3.2 Integração Internacional

Explorar possibilidades de integração da IND com infraestruturas digitais de parceiros internacionais, particularmente países do Mercosul. O X-Road demonstrou viabilidade de compartilhamento transfronteiriço de dados governamentais mediante protocolos padronizados.

Aplicações práticas: reconhecimento mútuo de identidades digitais, compartilhamento de informações sobre saúde pública (vigilância epidemiológica), cooperação em segurança pública, facilitação de comércio internacional mediante integração de sistemas aduaneiros.

1.3.3 Incorporação de Inteligência Artificial e Análises Avançadas

Desenvolver camada de serviços analíticos avançados sobre dados compartilhados via IND, respeitando privacidade e consentimento. Aplicações incluem: previsão de demandas por serviços públicos, identificação de fraudes mediante análise de padrões, personalização de serviços conforme necessidades individuais, avaliação de impacto de políticas públicas baseada em dados.

Esta evolução requer governança robusta de algoritmos, transparência sobre modelos utilizados, e mecanismos de contestação de decisões automatizadas.

1.3.4 Sustentabilidade Financeira e Operacional

Estabelecer modelo de sustentabilidade financeira de longo prazo, evitando dependência de financiamentos episódicos ou projetos com prazo definido. Opções:

- (a) orçamento regular vinculado;
- (b) taxa de serviço cobrada de instituições participantes proporcionalmente ao volume de transações;
- (c) arranjo consorciado entre entes federativos.

Priorizar desenvolvimento de competências internas no setor público para manutenção e evolução da IND, reduzindo dependência de consultorias externas.

1.4 Síntese das Recomendações

As recomendações propostas não constituem lista de medidas independentes, mas estratégia sequencial em que cada horizonte temporal cria as condições para o seguinte. O curto prazo tem função específica e insubstituível: não é apenas sobre implementar pilotos ou publicar normas técnicas, mas sobre produzir evidências de que a IND funciona — evidências que nenhum argumento técnico ou normativo consegue substituir para construir o apoio político necessário à expansão. Sem essa base de legitimidade construída empiricamente, as medidas de médio e longo prazo perdem o suporte que as torna viáveis.

O horizonte de médio prazo é onde o modelo enfrenta seu teste mais difícil: expandir sem os incentivos excepcionais de um piloto cuidadosamente selecionado, institucionalizar sem a energia de uma iniciativa nova, e construir ecossistema de fornecedores num mercado que ainda não tem certeza sobre a escala do investimento público. A experiência estoniana sugere que este é o momento em que mais iniciativas de interoperabilidade fracassam — não por deficiência técnica, mas por incapacidade de sustentar coordenação política através de ciclos eleitorais. A institucionalização normativa recomendada para este período tem, portanto, função de proteção contra descontinuidade, não apenas de clareza jurídica.

O longo prazo projeta um estado que o Brasil ainda não alcançou em nenhuma iniciativa de infraestrutura digital: governança genuinamente federativa, com estados e municípios como corresponsáveis — não apenas usuários — pela evolução do sistema. Chegar a esse ponto depende de acumulação gradual de confiança intergovernamental que não se

decreta, mas se constrói transação a transação, decisão a decisão, ao longo de anos de operação transparente e *accountable*.