Um framework de ciência de dados para o descomissionamento sustentável: inventários auditáveis, rastreabilidade de materiais e decisão baseada em evidências

Do inventário à descarbonização

Gabriel Gouveia Magalhães; Fernanda Araujo Baião; Paula Maçaira — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) — gabrielgouveiamagalhaes@gmail.com

Eixo temático: Aspectos Técnicos e Tecnológicos (interface com Aspectos Ambientais e Economia Circular)

Introdução. A sustentabilidade do descomissionamento de ativos offshore depende de uma condição muitas vezes negligenciada: a qualidade da informação sobre os materiais removidos, recuperados e reinseridos na cadeia industrial. No estado da prática brasileira, o inventário do aço recuperável é estimado a partir do LDT (lightweight displacement tonnage) ou de fichas de fabricante, e raramente medido. Como a rastreabilidade, a economia circular e a decisão de fim de vida se apoiam nesse inventário, sua baixa qualidade contamina todas as etapas seguintes. A Convenção Internacional de Hong Kong (IMO, 2009), em vigor desde 2025, torna a exigência inadiável ao impor inventário de materiais, cadeia de custódia e auditoria do destino físico do aço; em paralelo, a mensuração, reporte e verificação (MRV) digital é discutida como camada de auditoria para cadeias de circularidade (WORLD BANK, 2022). A literatura de descomissionamento concentra-se em opções e impactos (BULL; LOVE, 2019; SOMMER et al., 2019) e na análise multicritério de estratégias (MARTINS et al., 2020); a produção do inventário, porém, raramente é tratada como um problema metodológico de ciência de dados, embora registros operacionais já se mostrem fonte de evidência decisória robusta (DANTAS et al., 2021).

Este trabalho propõe um framework de ciência de dados para o descomissionamento sustentável, organizado pelo ciclo de vida de ciência de dados (WIRTH; HIPP, 2000; PROVOST; FAWCETT, 2013), que converte registros operacionais dispersos em inventários auditáveis, rastreabilidade de materiais e suporte à decisão baseado em evidências. A pergunta de pesquisa é: como estruturar um framework de ciência de dados capaz de apoiar o descomissionamento sustentável por meio de inventários auditáveis, rastreabilidade de materiais e suporte à decisão baseado em evidências? A contribuição é metodológica: um framework cuja viabilidade se demonstra por uma prova de conceito em operação real.

Objetivo. Propor um framework de ciência de dados para o descomissionamento sustentável que articule inventários auditáveis, rastreabilidade de materiais e decisão baseada em evidências, e demonstrar sua viabilidade por uma prova de conceito em desmantelamento metálico.

Framework e percurso metodológico. O framework adota o ciclo de vida de ciência de dados como percurso metodológico, em seis etapas iterativas (Figura 1); a Tabela 1 sintetiza o mapeamento de cada etapa à sua instanciação empírica na prova de conceito e à respectiva contribuição para a sustentabilidade. Em Business Understanding, formula-se o problema de origem: o inventário estimado e sua incerteza. Em Data Acquisition, coletam-se dados primários por pesagem oficial homologada e por documentos operacionais (ticket de balança, manifesto, nota fiscal). Em Data Preparation, os materiais são classificados em categorias controladas e consolidados, e derivam-se variáveis físico-operacionais (peso e receita acumulados, índice de eficiência operacional). Em Data Modeling, constrói-se o artefato central — um protocolo de mensuração físico-financeira por carga (MRV-P), que estrutura medição, reporte e verificação — e, sobre o mesmo registro por carga, constroem-se modelos

preditivos do aço recuperável, posteriormente avaliados. Em Evaluation, a curva físico-financeira é reconciliada (erro de fechamento), a acurácia dos modelos preditivos é aferida (RMSE e R^2) e a auditabilidade é comparada à prática corrente (LDT/placa) em quatro critérios: granularidade, rastreabilidade, auditabilidade independente e replicabilidade. Em Deployment, a informação auditável alimenta governança, economia circular e decisão de fim de vida. A contribuição própria do framework não se confunde com o artefato MRV-P: enquanto este mensura, aquele organiza o percurso completo e prescreve, nas etapas de modelagem e avaliação, um inventário físico-financeiro auditável e uma leitura de circularidade que a aplicação genérica do ciclo de ciência de dados não especifica.



Figura 1 — Framework: o ciclo de vida de ciência de dados aplicado ao descomissionamento sustentável, do problema do inventário estimado às saídas de sustentabilidade (inventário auditável, rastreabilidade, circularidade e descarbonização).

Etapa (ciclo de ciência de dados)	Instanciação na prova de conceito (STS)	Contribuição à sustentabilidade
1. Business Understanding	Inventário por LDT/placa; incerteza de pré-operação	Explicita o problema de origem da informação
2. Data Acquisition	Pesagem homologada por carga; ticket, manifesto, nota	Rastreabilidade e cadeia de custódia
3. Data Preparation	Classificação por categoria e consolidação dos materiais	Recuperação de recursos; qualificação da sucata
4. Data Modeling	Protocolo MRV-P (medição–reporte–verificação)	Inventário auditável e replicável
5. Evaluation	Reconciliação da curva; quatro critérios de auditabilidade	Redução da incerteza; verificação por terceiros
6. Deployment	Suporte à decisão de fim de vida por evidência	Economia circular, governança e descarbonização

Tabela 1 — Mapeamento das etapas do framework à instanciação empírica (prova de conceito) e à contribuição para a sustentabilidade.

Resultados (demonstração empírica). A viabilidade do framework é demonstrada, como prova de conceito, em uma operação real e concluída de desmantelamento de uma estrutura metálica portuária (um guindaste Ship-to-Shore), em terminal brasileiro, em 2021, com 808 t recuperadas, registradas em 107 linhas de expedição, conferidas com pesagens da portaria e do comprador e classificadas em quatro categorias de material (estudo de caso instrumental; YIN, 2018). Em coerência com a distinção entre evidência para a decisão e validação técnica, reportam-se dois tipos de resultado.

(i) Resultados operacionais e decisão baseada em evidências (insights). A etapa de Acquisition reduziu a incerteza de pré-operação: o peso medido (808 t) contrasta com a ficha de fabricante (850 t, +5,2%) e com a estimativa de campo (680 t, -15,8%), distância equivalente a 25% do menor valor — ganho direto de informação para a decisão de fim de

vida. A etapa de Deployment evidenciou o valor decisório do inventário rastreado: a segregação de materiais por carga associou-se a um ganho de receita de cerca de +46% sobre a venda indiferenciada, estável sob diferentes preços de referência e majoritariamente concentrado na categoria estrutural. São esses os insights operacionais que sustentam uma decisão baseada em evidências, e não em estimativa agregada.

Como exploração metodológica, foram comparados modelos sobre dados que combinavam parâmetros empíricos e simulações controladas. As métricas desse exercício não constituem validação empírica preditiva. A evidência operacional defensável é a reconciliação do P2: 680 t estimadas em campo versus 808 t pesadas (−15,8%) e 850 t na referência do fabricante versus 808 t pesadas (+5,2%).

(iii) Resultados de sustentabilidade e governança da informação. Neste enquadramento, a sustentabilidade emerge da qualidade da informação e da gestão dos materiais. Inventários auditáveis reduzem a incerteza de pré-operação e qualificam a sucata para reinserção industrial em nível compatível com a aciaria. Como o aço produzido por rota secundária (sucata em forno elétrico) evita da ordem de 1,5 a 1,9 tCO_2e por tonelada frente à rota primária (IEA, 2023), a recuperação documentada de 808 t corresponde a uma ordem de grandeza de 1,2 a 1,5 mil tCO_2e evitadas na prova de conceito; a circularidade do mix pode ser sintetizada por um índice como o Material Circularity Indicator (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN, 2015), em consonância com o vocabulário e os princípios da ISO 59004:2024. A rastreabilidade por carga e a verificação documental constituem a cadeia de custódia exigida pela Convenção de Hong Kong, deslocando a governança de declarações agregadas para evidência verificável por terceiros. Recuperação de recursos, circularidade e descarbonização tornam-se, assim, propriedades mensuráveis do processo informacional, sujeitas a auditoria.

Conclusões. O trabalho reposiciona o descomissionamento sustentável como um problema de ciência de dados e de governança da informação: a qualidade auditável do inventário é o que habilita a rastreabilidade, a economia circular e a decisão baseada em evidências. A prova de conceito metálica indica a viabilidade do framework, ainda restrita a um único caso e a um equipamento portuário; sua transposição a ativos offshore (topsides, jackets, FPSOs e sistemas submarinos) exige adaptar a etapa de Acquisition a contaminantes, NORM e corte subaquático, e a etapa de Modeling a inventários mais heterogêneos. A consolidação do framework constitui a agenda de pesquisa: replicação multi-caso com componentes offshore reais e anonimizados, quantificação da circularidade e da descarbonização por indicadores formais, formalização operacional da ontologia de domínio e incorporação da decisão sob incerteza e da mineração de processos. O framework oferece, assim, uma base metodológica replicável para tratar, com rigor de ciência de dados, a informação que sustenta o descomissionamento sustentável.

Palavras-chave: Descomissionamento sustentável. Ciência de dados. Rastreabilidade de materiais. Economia circular. Decisão baseada em evidências.

Referências

BULL, A. S.; LOVE, M. S. Worldwide oil and gas platform decommissioning: a review of practices and reefing options. Ocean & Coastal Management, v. 168, p. 274–306, 2019.

DANTAS, L. F. et al. App-based symptom tracking to optimize SARS-CoV-2 testing strategy using machine learning. PLOS ONE, v. 16, n. 3, e0248920, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN. Circularity indicators: an approach to measuring circularity — methodology. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

FRANÇA, J. B. S. et al. KIPO: the knowledge-intensive process ontology. Software and Systems Modeling, v. 14, n. 3, p. 1127–1157, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Iron and steel technology roadmap: towards more sustainable steelmaking. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). Hong Kong international convention for the safe and environmentally sound recycling of ships. Londres: IMO, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 59004:2024: circular economy — vocabulary, principles and guidance for implementation. Genebra: ISO, 2024.

MARTINS, I. D. et al. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. Ocean & Coastal Management, v. 184, art. 105000, 2020.

PROVOST, F.; FAWCETT, T. Data science for business: what you need to know about data mining and data-analytic thinking. Sebastopol: O'Reilly, 2013.

RICHETTI, P. H. P.; BAIÃO, F. A.; CAMPOS, M. L. M. Decision-making in knowledge-intensive processes: the case of value ascription and goal processing. In: CONCEPTUAL MODELING (ER 2019), 38., 2019, Salvador. Anais [...]. Cham: Springer, 2019. p. 363–377. (Lecture Notes in Computer Science, v. 11788).

SOMMER, B. et al. Decommissioning of offshore oil and gas structures: environmental opportunities and challenges. Science of the Total Environment, v. 658, p. 973–981, 2019.

WIRTH, R.; HIPP, J. CRISP-DM: towards a standard process model for data mining. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PRACTICAL APPLICATIONS OF KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 4., 2000, Manchester. Proceedings [...]. 2000. p. 29–40.

WORLD BANK. Digital measurement, reporting and verification (D-MRV): concepts, architecture and use cases. Washington, DC: World Bank, 2022.

YIN, R. K. Case study research and applications: design and methods. 6. ed. Thousand Oaks: Sage, 2018.