UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

ANDRE GOMES DE LIRA MUNIZ

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE EM EMERGIA: ARQUITETURA WEB MODULAR E CÁLCULO AUTOMATIZADO DE INDICADORES

SÃO PAULO

2026

ANDRE GOMES DE LIRA MUNIZ

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE EM EMERGIA: ARQUITETURA WEB MODULAR E CÁLCULO AUTOMATIZADO DE INDICADORES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção

Linha de pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Economia Circular

Projeto de Pesquisa: Economia Circular e Sustentabilidade para a Competitividade: Gestão Baseada em Valoração Sistêmica

SÃO PAULO

2026

Muniz, André Gomes de Lira.
Desenvolvimento de ferramenta computacional para análise em emergia: arquitetura *web* modular e cálculo automatizado de indicadores / André Gomes de Lira Muniz. – 2026.
186 f.: il. color. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2026.
Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.
Orientadora: Prof.ª Dr.ª Cecília Maria Villas Bôas de Almeida.

1. Contabilidade em emergia. 2. Diagrama ternário. 3. UEV. 4. Software científico. 5. *Design Science Research*. 6. Rastreabilidade. I. Almeida, Cecília Maria Villas Bôas de (orientadora). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

ANDRE GOMES DE LIRA MUNIZ

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE EM EMERGIA: ARQUITETURA WEB MODULAR E CÁLCULO AUTOMATIZADO DE INDICADORES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção

Linha de pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Economia Circular

Projeto de Pesquisa: Economia Circular e Sustentabilidade para a Competitividade: Gestão Baseada em Valoração Sistêmica

Data de aprovação: _____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA

_____/_____/_____
Profa. Orientadora Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida
Universidade Paulista (UNIP)

_____/_____/_____
Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho
Universidade Paulista (UNIP)

_____/_____/_____
Prof. Dr. Fábio Sevegnani
Universidade Paulista (UNIP)

_____/_____/_____
Prof. Dr. Flávio Augusto Barrella
Centro Paula Souza N/A Fatec

_____/_____/_____
Profa. Dra. Ana Marilza Pernas Fleischmann
Universidade Federal de Pelotas - UFPel

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória de meu pai, Francisco Tonini Muniz, e à de meus avós. Eles não viram este trabalho concluído, mas dele são origem. Deixaram-me, sem grandes palavras, a disciplina e a convicção de que todo resultado consistente nasce de esforço sustentado no tempo. Esta tese é, também, uma forma de honrar o que aprendi com eles.

Dedico-o à minha mãe, Ivani Penha Gomes de Lira Muniz, porque ela foi e é o que há de mais estrutural neste percurso. Sua presença, mantida com firmeza, mesmo diante das dificuldades, foi o alicerce sobre o qual esta formação pôde ser construída.

Dedico-o à minha esposa, Vanessa Aparecida dos Santos Oliveira, e dedico a ela ainda o que não está escrito nestas páginas, mas conteúdo que é essência que as sustentou: sua paciência diante das ausências, sua compreensão diante do cansaço e sua companhia nos anos em que este trabalho exigiu mais do que eu tinha para dar. Sem Vanessa, este percurso teria sido provavelmente inviável.

Dedico-o a meus familiares, pelo reconhecimento por terem constituído, cada um à sua maneira, a base sobre a qual esta trajetória se tornou possível.

Dedico-o a meus colegas do Laboratório de Produção e Meio Ambiente, LaProMA, pela lembrança da convivência científica cotidiana, pelas discussões, pelas dúvidas compartilhadas e pelo ambiente de trabalho que tornou esta pesquisa mais bem fundamentada e menos solitária.

Dedico-o à minha orientadora, Profa. Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida, por um reconhecimento de outra natureza. Sua orientação não se limitou à condução técnica desta tese: moldou o modo como passei a pensar cientificamente. A consistência que este trabalho eventualmente alcança é, em grande medida, reflexo dessa formação.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida agradeço pela orientação rigorosa e pela disponibilidade constante ao longo de todo o desenvolvimento desta tese, apoios decisivos para a consistência técnica e metodológica do trabalho.

Ao Prof. Dr. Biagio Fernando Giannetti agradeço o estilo marcante de liderança e os ensinamentos transmitidos ao longo desta trajetória, marcas que contribuíram de forma significativa para minha formação científica.

Ao Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho agradeço a contribuição ao aprimoramento da ferramenta computacional desenvolvida em VBA que deu origem a esta linha de pesquisa, etapa fundamental para a maturação do problema que esta tese buscou enfrentar.

Ao Prof. Dr. Fábio Sevegnani agradeço pela experiência profissional compartilhada e pela convivência no time de Ciência da Computação do *campus* Tatuapé, o que contribuiu tanto para minha formação técnica, quanto para a maturação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Flávio Augusto Barrella agradeço sua dissertação, cuja base metodológica constitui o ponto de partida sobre o qual esta tese se desenvolveu, propôs-se a avançar.

À Profa. Dra. Ana Marilza Pernas Fleischmann agradeço a disponibilidade em avaliar esta tese e as contribuições que certamente qualificarão sua versão final.

Aos colegas de trabalho agradeço pelo convívio profissional e pelo apoio ao longo deste período de conciliação entre a atividade acadêmica e a atuação prática.

À EISA, empresa na qual atuei durante parte significativa deste percurso, agradeço a oportunidade de aplicar e testar conhecimentos que também influenciaram o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Paulista – UNIP – agradeço a estrutura oferecida à realização deste doutorado e a oportunidade de hoje integrar seu corpo docente como professor.

RESUMO

A contabilidade em emergia é uma abordagem biofísica orientada pela perspectiva doadora, segundo a qual recursos, produtos e serviços são analisados a partir da energia disponível empregada direta e indiretamente em sua formação, sempre na consideração de suportes ambientais e econômicos. Apesar da consolidação das equações, dos indicadores e do diagrama ternário, a infraestrutura computacional permanece frequentemente associada a planilhas locais e a fluxos fragmentados. Orientada por *Design Science Research*, esta tese propôs e avaliou princípios de modelagem de dados e de arquitetura de software científico implementados na plataforma *web TRIGES* (*Traditional R-N-F Interactive Graphical Emergy System*), delimitada à abordagem *Traditional R*, *N* e *F*. A avaliação combinou verificação funcional dos requisitos, comparação numérica com sete estudos publicados e verificação da coerência geométrica do diagrama ternário. Os resultados mostraram aderência funcional ao escopo, convergência numérica compatível com a precisão das fontes, identificação auditável de divergências e consistência geométrica entre formulação e renderização. A contribuição científica reside na proposição e na avaliação conjunta de princípios que conectam o valor de UEV empregado, o inventário persistente, os resultados derivados e a representação ternária, além de um protocolo que distingue convergência, arredondamento, limitação de resolução da fonte e inconsistência estrutural. A plataforma preserva, em cada *Flow*, o identificador e o valor numérico do UEV utilizado, o que permite reprodução determinística dos cálculos. Os demais metadados permanecem vinculados ao registro corrente da biblioteca, sem constituir *snapshot* histórico integral. Conclui-se que o *TRIGES* implementa corretamente, nas condições avaliadas, o núcleo metodológico da contabilidade em emergia *Traditional* e oferece uma base tecnicamente viável para sua operação auditável em ambiente *web*.

Palavras-chave: Contabilidade em emergia; diagrama ternário; UEV; software científico; *Design Science Research*; rastreabilidade.

ABSTRACT

Emergy accounting is a biophysical approach guided by the donor-side perspective, according to which resources, products, and services are assessed from the available energy used directly and indirectly in their formation, including environmental and economic support. Although its equations, indicators, and ternary diagram are established, computational practice often remains dependent on local spreadsheets and fragmented workflows. Guided by Design Science Research, this thesis proposed and evaluated data-modeling and scientific-software architecture principles implemented in the TRIGES (Traditional R-N-F Interactive Graphical Emergy System) web platform, delimited to the Traditional R, N, and F approach. The evaluation combined functional verification of requirements, numerical comparison with seven published studies, and verification of the geometric consistency of the ternary diagram. Results showed functional adherence to scope, numerical convergence compatible with source precision, auditable identification of divergences, and geometric consistency between formulation and rendering. The scientific contribution lies in the joint proposal and evaluation of principles connecting the UEV value actually used, the persistent inventory, derived results, and ternary representation, together with a protocol that distinguishes convergence, rounding, limited source resolution, and structural inconsistency. For each Flow, the platform preserves the identifier and numerical UEV value used, enabling arithmetic re-execution of calculations under the preserved data and formulas; other metadata remain linked to the library's current record and do not constitute a complete historical snapshot. It is concluded that, under the evaluated conditions, TRIGES correctly implements the methodological core of Traditional emergy accounting and provides a technically viable basis for its auditable operation in a web environment.

Keywords: Emergy accounting; ternary diagram; UEV; scientific software; Design Science Research; traceability.

UTILIDADE

Esta tese apresenta contribuições em três dimensões: científica, metodológica e tecnológica, alinhadas à necessidade de infraestrutura computacional para a contabilidade em emergia clássica.

No plano científico, a pesquisa posiciona a gestão de *Unit Emergy Values* (UEVs) como questão de governança metodológica. A plataforma preserva, em cada *Flow*, o identificador e o valor numérico do coeficiente empregado e mantém vínculo com referência, baseline e unidade no registro corrente da biblioteca. Esse mecanismo favorece a inspeção e a reexecução aritmética dos cálculos sob os dados e fórmulas preservados, sem equivaler à preservação histórica integral da proveniência ou à reprodutibilidade científica completa.

No plano metodológico, a pesquisa formaliza a equivalência entre diferentes parametrizações geométricas do diagrama ternário clássico e sistematiza a comparação entre resultados calculados e valores publicados na literatura. Essa sistematização apresenta potencial de aplicação em revisões críticas de estudos já publicados, ao tornar explícitas divergências e inconsistências internas nos dados de referência utilizados.

No plano tecnológico, o principal produto da pesquisa é a plataforma *web TRIGES*, que integra biblioteca estruturada de UEVs, inventário rastreável de fluxos, cálculo automático dos indicadores clássicos (*EYR*, *EIR*, *ELR*, *ESI* e *%R*) e diagrama ternário interativo. A ferramenta oferece suporte potencial à pesquisa em contabilidade em emergia, ao ensino do método em programas de pós-graduação e à comunicação de resultados a públicos não especializados por meio da visualização ternária.

Por fim, considerando a área de concentração do programa em Sustentabilidade em Sistemas de Produção e sua linha de pesquisa em Produção Mais Limpa e Economia Circular, o trabalho guarda relação com os esforços contemporâneos de disponibilização de infraestrutura computacional aberta para avaliação sistêmica de recursos, na medida em que oferece suporte metodológico à quantificação do trabalho ambiental incorporado a produtos e a processos. Essa relação é apresentada em caráter potencial e não como impacto social, ambiental ou econômico efetivamente mensurado pela pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformação conceitual de um diagrama de sistemas de energia em grafo de emergia para processamento algébrico 27

Figura 2 - Interface da ferramenta Excel/VBA para cálculo e representação do diagrama ternário em emergia, com pontos, linhas de sustentabilidade (SI = 1 e SI = 5) e ponto simérgico. 48

Figura 3 – Fluxograma e interface real do módulo GIS para estimativa espaço-temporal da emergia de água superficial 54

Figura 4 - Arquitetura de componentes da plataforma *TRIGES*: distribuição de módulos entre cliente, API e persistência 111

Figura 5 - Diagrama de sequência: cadastro de Flow, recálculo de totais R, N e F e atualização do diagrama ternário 112

Figura 6 - Modelo relacional das seis entidades centrais do núcleo do TRIGES avaliado nesta tese 115

Figura 7 - Ambiente institucional da plataforma *TRIGES*: (a) apresentação do escopo metodológico; (b) documentação estruturada por eixo metodológico (FAQ) 116

Figura 8 - Tela de autenticação da plataforma, com *login* por credenciais ou provedores federados 118

Figura 9 - Ambiente de trabalho: barra lateral com as áreas Data e Workspace e estado inicial sem sistema selecionado 119

Figura 10 - Formulário de cadastro de UEV (Global UEV Registry), com campos obrigatórios de unidade, baseline e referência bibliográfica 120

Figura 11 - Biblioteca de UEVs (UEV Library) com busca textual, paginação e campos de rastreabilidade bibliográfica 121

Figura 12 - Painel *System Inventory* da tela UEV *Analysis* (*Variation Scenarios*), com classificação *R*, *N* e F, UEV original e emergia calculada por Flow 122

Figura 13 - Inventário de fluxos e múltiplas saídas de um subsistema, com Total Emergy e UEVs de saída 123

Figura 14 - Simulação de UEV (aba *Variation Scenarios*): (a) estado inicial, com cálculo desabilitado até a informação de um valor válido; (b) valor simulado informado manualmente, habilitando o cálculo 124

Figura 15 - Resultados da simulação de UEV: (a) comparação tabular entre sistema original e simulado, com coeficiente de sensibilidade; (b) comparação em barras de *R*, *N*, *F* e *Y* e inventário simulado 125

Figura 16 - Diagrama ternário da simulação, com composição original e simulada plotadas simultaneamente 126

Figura 17 - Comparação entre registros alternativos de UEV (UEV *Reference Comparison*): (a) seleção do registro de referência; (b) comparação de fatores relativos e variação percentual entre registros do mesmo elemento 127

Figura 18 - Comparação entre baselines emergéticas globais (*Global Baseline Comparison*), com fator relativo e UEV normalizado para cada baseline histórica 128

Figura 19 - Saída nativa do *TRIGES* para os três sistemas agrícolas, a partir dos fluxos agregados recalculados 138

Figura 20 - Diagrama ternário produzido pelo TRIGES para os quatro tratamentos de cotratamento (EC2) 140

Figura 21 - Diagrama ternário do *TRIGES* após o recadastro granular do Tratamento IIIb, com foco no sistema Treatment IIIb (EC2) 141

Figura 22 - Diagrama ternário do *TRIGES* para a análise 4a (sem renovabilidade indireta do trabalho), sistema de bambu gigante (EC3) 143

Figura 23 - Diagrama ternário do *TRIGES* com os quatro sistemas de embalagem (EC4) 144

Figura 24 - Quatro sistemas de embalagem importados no *TRIGES*, com os agregados *R*, *N*, *F* e *Y* (EC4) 145

Figura 25 - Diagrama ternário dos nove sistemas provinciais e primeira página do painel de indicadores do *TRIGES* (EC5) 147

Figura 26 - Posição ternária e indicadores nativos do *TRIGES* para o sistema milpa familiar completo (EC6). 149

Figura 27 - Demonstração funcional do modo *Weighted* (*Simergy Point*) aplicado aos três sistemas analíticos por cultura (EC6) 150

Figura 28 - Diagrama ternário do *TRIGES* com os pontos das três camadas documentais e linhas de sustentabilidade (EC7) 151

Figura 29 - Painel *Outputs* do *TRIGES* para o sistema de embalagem PET virgem, com as UEVs calculadas nativamente para três saídas declaradas (EC4) 153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores em emergia clássicos: fórmulas, interpretação e faixas historicamente empregados 36

Tabela 2 - Aplicações do diagrama ternário em emergia em múltiplos domínios 44

Tabela 3 - Evolução histórica das ferramentas computacionais para o diagrama ternário em emergia 47

Tabela 4 - Antecedentes brasileiros de informatização da contabilidade em emergia e posicionamento funcional do *TRIGES* 51

Tabela 5 – Comparação entre ferramentas computacionais segundo problema, entrada, tratamento metodológico e evidências publicadas 57

Tabela 6 - Requisitos de governança para UEVs, implementação no TRIGES e lacunas residuais 64

Tabela 7 - Consequências do reescalonamento uniforme e da mistura de baselines 67

Tabela 8 - Delineamento da pesquisa 75

Tabela 9 - Correspondência entre terminologia da plataforma e conceitos em emergia 77

Tabela 10 - Matriz de rastreabilidade: lacuna, requisito, componente e evidência 79

Tabela 11 - Requisitos funcionais da plataforma *TRIGES* 80

Tabela 12 - Requisitos não funcionais da plataforma 83

Tabela 13 - Entidades do modelo de dados e justificativas de modelagem 87

Tabela 14 - Escolhas tecnológicas da plataforma e justificativas 91

Tabela 15 - Módulos da plataforma, responsabilidades e componentes principais 92

Tabela 16 - Estudos de caso selecionados para a avaliação 101

Tabela 17 - Módulos implementados, funcionalidade central e resultado operacional 110

Tabela 18 - Entidades centrais do banco de dados implementado 113

Tabela 19 - Síntese da verificação funcional dos requisitos RF01 a RF10 e RF12 a RF15 ... 131

Tabela 20 – Síntese comparativa dos sete estudos de caso executados na plataforma *TRIGES* 136

Tabela 21 - Indicadores em emergia publicados e recalculados no EC1 137

Tabela 22 - Indicadores publicados e calculados nativamente pelo *TRIGES* no EC2 (cadastro agregado da Tabela 7 do artigo) 139

Tabela 23 - Indicadores emergéticos publicados e calculados pelo *TRIGES* no EC3 (formato publicado / *TRIGES*) 142

Tabela 24 - Emergia total publicada e calculada pelo *TRIGES* no EC4 144

Tabela 25 - Indicadores emergéticos publicados e calculados pelo TRIGES no EC5 (nove províncias do *Pan-Pearl River Delta*) 146

Tabela 26 - Confronto entre valores publicados e a reaplicação do FMS completo no EC6 . 148

Tabela 27 - Indicadores publicados e recalculados nas três camadas documentais do EC7 .. 151

Tabela 28 - Síntese dos testes de coerência geométrica 161

Tabela 29 - Coordenadas teóricas e obtidas para dez composições de referência (canvas 560 × 560 px) 162

Tabela 30 - Síntese do atendimento aos objetivos específicos 167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Delimitação entre a formulação *Traditional R*, *N* e *F* adotada no *TRIGES* e a abordagem com renovabilidade parcial discutida por Ortega *et al*. (2005)..... 38

Quadro 2 - Distinção de escopo entre a EmCFdb e a biblioteca operacional do *TRIGES*..... 65

Quadro 3 - Princípios arquiteturais, mecanismos e limites de validade..... 70

Quadro 4 - Percurso da *Design Science Research*: etapas, entradas, atividades, saídas e evidências 75

Quadro 5 - Nível de evidência dos requisitos funcionais (RF01–RF18)..... 82

Quadro 6 - Nível de evidência dos requisitos não funcionais (RNF01–RNF11) 85

Quadro 7 - Cobertura dos estudos de caso por componente da cadeia de cálculo 102

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

Sigla	Significado
API	Application Programming Interface
CE	Circular Economy
CSV	Comma-Separated Values
DSR	Design Science Research
EIR	Emergy Investment Ratio
ELR	Environmental Loading Ratio
EmCF	Emergy Characterization Factor (equivalente ao UEV para fluxos elementares na EmCFdb)
EmCFdb	Emergy Characterization Factor database (DE VILBISS et al., 2024)
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
ESI	Emergy Sustainability Index
ESL	Energy Systems Language (Linguagem de Diagramas de Energia Sistêmica)
ETL	Extract, Transform, Load
EYR	Emergy Yield Ratio
F	Recursos Econômicos (Economic input)
FAC	Fly Ash Concrete
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
JSON	JavaScript Object Notation
JWT	JSON Web Token
LCI	Inventários de Ciclo de Vida
MJ	Megajoule
MySQL	Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional (SGBD)
N	Recursos Não Renováveis (Non-renewable)
Node.js	Ambiente de execução de JavaScript no servidor
R	Recursos Renováveis (Renewable)
RAC	Recycled Aggregate Concrete
SOA	Service-Oriented Architecture
SPA	Single Page Application
SQL	Structured Query Language
TRIGES	Traditional R-N-F Interactive Graphical Emergy System
UEV	Unidade de Valor de Emergia (Unit Emergy Value)
VBA	Visual Basic for Applications
VSCode	Visual Studio Code
WCAG	Web Content Accessibility Guidelines

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

2 REFERENCIAL TEÓRICO 23

2.1 Procedimento da revisão narrativa 23

2.2 Fundamentos da análise em emergia 23

2.3 Indicadores em emergia clássicos 32

2.4 Diagrama ternário em emergia 39

2.5 Ferramentas computacionais existentes para emergia: delimitação da lacuna 49

2.6 Gestão de UEVs 59

2.7 Princípios arquiteturais para software científico rastreável 68

2.8 Síntese do referencial teórico 71

3 MÉTODO 74

3.1 Delineamento da pesquisa 74

3.2 Vocabulário do domínio: correspondência entre terminologia do sistema e conceitos em emergia 77

3.3 Requisitos da plataforma 78

3.4 Modelagem de dados 86

3.5 Arquitetura de software 88

3.6 Implementação dos módulos 92

3.7 Procedimentos de avaliação 98

3.8 Síntese metodológica 107

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 109

4.1 Resultados do desenvolvimento do software 109

4.2 Verificação funcional dos requisitos 131

4.3 Comparação numérica integrada com estudos de caso 134
4.4 Discussão integrada dos estudos de caso 157
4.5 Verificação da coerência geométrica do diagrama ternário 161
4.6 Síntese dos resultados 164
5 CONCLUSÕES 165
5.1 Resposta ao problema de pesquisa 165
5.2 Atendimento aos objetivos da pesquisa 166
5.3 Contribuições da tese 168
5.4 Limitações da pesquisa 169
5.5 Próximos passos 172
5.6 Considerações finais 176
REFERÊNCIAS 178

1 INTRODUÇÃO

A contabilidade em emergia é uma abordagem biofísica orientada pela perspectiva doadora: emergia corresponde à energia disponível de uma única forma empregada, direta e indiretamente, na produção de um recurso, produto ou serviço, considerando os suportes ambientais e econômicos envolvidos (ODUM, 1996). Expressa em solar emjoules (sej), registra a memória das transformações que convergiram para o sistema avaliado. No modo *Traditional R*, *N* e *F* adotado nesta tese, o inventário distingue recursos renováveis locais (R), não renováveis locais (N) e insumos provenientes da economia (F), que compõem a emergia total (Y) e fundamentam o cálculo dos indicadores clássicos e a representação ternária, desenvolvidos nas Seções 2.2 a 2.4.

A emergia total corresponde à soma das três contribuições agregadas:

$$Y = R + N + F \tag{1}$$

Essa identidade estabelece o fechamento aritmético do inventário; sua aplicação pressupõe fronteira analítica explícita, classificação documentada dos fluxos, compatibilidade de baseline e prevenção de dupla contagem, discutidos no Capítulo 2 e delimitados metodologicamente no Capítulo 3. *Y* é, portanto, grandeza derivada de *R*, *N* e *F*, não uma entrada independente.

A partir dessa identidade calculam-se os indicadores clássicos e a renovabilidade percentual, apresentados na Seção 2.3: o *EYR* relaciona a emergia total ao investimento externo; o *EIR* expressa a dependência de *F* em relação aos recursos locais; o *ELR* compara as contribuições não renováveis e econômicas com *R*; o *ESI* combina rendimento e carga ambiental; e *%R* representa a participação renovável em *Y*. Esses indicadores são complementares e não constituem, isoladamente, prova de sustentabilidade.

A correção aritmética desses resultados depende da qualidade do inventário e dos Valores Unitários de Emergia (UEVs) associados aos fluxos, que convertem a quantidade física de um recurso ou serviço em emergia e devem ser interpretados junto de sua unidade, referência e baseline, distinção detalhada nas Seções 2.2 e 2.6. A plataforma organiza esses elementos, mas não decide se um coeficiente é cientificamente representativo do contexto analisado; essa avaliação permanece sob responsabilidade do pesquisador.

O diagrama ternário sintetiza a composição relativa de R, N e F em um triângulo equilátero, o que apoia a interpretação dos resultados sem substituir a análise dos valores absolutos. Para projetar sistemas de diferentes magnitudes, os componentes são normalizados pela emergia total:

$$\bar{R} = \frac{R}{Y},\ \bar{N} = \frac{N}{Y},\ \bar{F} = \frac{F}{Y},\ com\ \bar{R} + \bar{N} + \bar{F} = 1 \quad (2)$$

As frações normalizadas somam a unidade, o que fundamenta a transformação para coordenadas cartesianas da Seção 2.4.

A base conceitual decorre de Odum (1996), e a aplicação da geometria ternária à síntese *R*, *N* e *F* possui antecedentes em Barrella (2004), Giannetti, Barrella e Almeida (2006) e Almeida, Barrella e Giannetti (2007). Recursos computacionais e aplicações *web* relacionados à análise em emergia já foram desenvolvidos: Kamiya (2005) e Takahashi (2007) documentam recursos de persistência e gerenciamento de usuários, cujo alcance e diferenças são examinados na Seção 2.5; De Vilbiss *et al*. (2024) apresentam a EmCFdb, biblioteca institucional de fatores para fluxos elementares; Agostinho *et al*. (2025) retomam o modo *Traditional* e propõem conceitualmente um repositório comunitário, o *Emergyinvent*, precedentes cujo alcance é desenvolvido na Seção 2.5.

Esses trabalhos afastam alegações de novidade isolada nas equações *Traditional*, no diagrama ternário, na aplicação *web* ou no cadastro de UEVs, mas cobrem parcelas distintas do fluxo analítico. A lacuna investigada não decorre da ausência isolada de cada componente, *mas* sim da falta de integração documentada e avaliada entre eles no fluxo metodológico *Traditional R*, *N* e F, delimitação obtida por revisão narrativa, não sistemática.

O *TRIGES* restringe sua avaliação científica ao modo *Traditional R*, *N* e *F* e utiliza UEVs previamente calculados e documentados, distinguindo-se de formulações baseadas em grafos para propagação da emergia em redes com coprodutos, divisões de fluxo e retroalimentações, como o software SCALE (MARVUGLIA *et al*., 2013) e os algoritmos de Le Corre e Truffet (2012, 2015) e de Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018). A Energy Systems Language constitui referência conceitual para a representação de sistemas energéticos; a versão do *TRIGES* avaliada não implementa editor ESL nem processa diagramas sistêmicos como entrada para os cálculos, caracterização retomada na Seção 2.5.

A lacuna desta tese organiza-se em três dimensões. A primeira corresponde à ausência de uma integração documentada e avaliada que conecte, sobre a mesma base de dados, o inventário persistente, a classificação dos fluxos, a agregação de *R*, *N*, *F* e *Y*, os indicadores e a representação ternária. A segunda envolve a governança e a proveniência operacional dos UEVs, especialmente o registro do valor efetivamente utilizado em cada cálculo, distinto da simples disponibilização de um catálogo de coeficientes. A terceira refere-se à auditabilidade dos resultados por meio de critérios funcionais, numéricos e geométricos capazes de distinguir convergência, limitação de resolução da fonte e inconsistência estrutural.

A integração proposta reduz etapas de transcrição entre ambientes e cria condições estruturais para diminuir erros de fragmentação; a visualização ternária e a organização dos resultados são tratadas como capacidades analíticas com potencial de apoiar interpretação e comunicação, não como benefícios empiricamente demonstrados: esta tese não mediu produtividade, taxa de erros, compreensão, satisfação de usuários ou impacto decisório.

A questão de pesquisa é, portanto: quais princípios de modelagem de dados e de arquitetura de software permitem integrar, de maneira verificável, a síntese em emergia *Traditional R*, *N* e *F*, o uso rastreável de UEVs e a representação ternária em ambiente web, e em que medida sua implementação no *TRIGES* atende aos critérios funcionais, numéricos e geométricos definidos nesta tese?

Esta tese propõe que cinco princípios arquiteturais (a preservação do valor numérico efetivamente empregado, a rastreabilidade operacional da cadeia de cálculo, a separação entre dados persistidos e resultados derivados, a integridade das relações entre entidades e a comunicação estruturada entre módulos) sustentam, quando materializados conjuntamente, propriedades observáveis no artefato: consistência entre o inventário registrado e os resultados dele derivados; possibilidade de reconstruir a cadeia de cálculo a partir dos dados preservados; ausência de referências órfãs ou atualizações parciais entre estudos, sistemas, fluxos e UEVs; e coerência entre a composição *R*, *N* e *F*, os indicadores calculados e a projeção ternária correspondente. Essas propriedades são avaliadas de forma complementar pelos critérios funcionais, pela comparação numérica e pela verificação da coerência geométrica. Não se afirma que essa arquitetura seja única ou universal, nem que cada princípio seja causalmente indispensável; a proposição limita-se à relação verificável entre os princípios adotados e as propriedades observadas no *TRIGES* sob os requisitos e estudos avaliados.

A rastreabilidade implementada é operacional e parcial: a plataforma preserva, em cada *Flow*, o identificador e o valor numérico do UEV efetivamente empregado, o que permite a reexecução aritmética sob os dados e as fórmulas preservados. Como unidade, referência e baseline permanecem vinculadas ao registro corrente da biblioteca; esse mecanismo não constitui *snapshot* histórico integral nem demonstra, isoladamente, reprodutibilidade científica completa por terceiros.

O artefato é instanciação verificável dos princípios propostos: a avaliação mostra o que essa combinação realizou nos requisitos e estudos selecionados, sem comparação com arquiteturas alternativas. A generalização pretendida é analítica, não estatística: outros softwares científicos podem examinar a utilidade desses princípios em seus próprios contextos.

O objetivo geral é propor e avaliar princípios de modelagem de dados e de arquitetura de software científico, implementados na plataforma web *TRIGES*, para integrar verificavelmente o fluxo de trabalho da contabilidade *Traditional R*, *N* e *F*, o uso de UEVs e a representação ternária. Esse objetivo desdobra-se em sete objetivos específicos: (1) levantar e sistematizar os requisitos funcionais e não funcionais da plataforma; (2) projetar a modelagem conceitual, a arquitetura de software e a estrutura de dados que integram inventário, biblioteca de UEVs, resultados derivados e diagrama ternário; (3) implementar os módulos centrais de autenticação, estudos, fluxos, UEVs, cálculos e visualização; (4) implementar mecanismos que preservem, em cada *Flow*, o identificador e o valor numérico do UEV empregado e mantenham vínculo com os metadados disponíveis no registro corrente; (5) comparar numericamente os resultados produzidos pela plataforma com sete estudos publicados, *sempre no respeito à* granularidade dos dados de cada fonte; (6) verificar funcionalmente os requisitos e a coerência geométrica do diagrama ternário; (7) analisar as contribuições e as limitações do artefato quanto à governança, à auditabilidade, à reexecução aritmética, à comparabilidade e ao potencial de comunicação analítica.

A pesquisa segue o paradigma *Design Science Research*. Os sete estudos de caso foram cadastrados e executados no *TRIGES*, mas utilizam dados publicados com diferentes níveis de granularidade: EC1, EC3, EC4, EC6 e EC7 reconstroem o inventário item a item; EC2 e EC5 partem diretamente de agregados *R*, *N* e *F* já publicados. Por essa razão, a avaliação verifica os componentes passíveis de reconstrução a partir de cada fonte (agregação, cálculo de Y, indicadores, normalização e geometria) e não constitui rederivação universal, item a item, dos inventários físicos originais.

A cobertura empírica deve, portanto, ser interpretada por componente: a verificação funcional abrange os requisitos formalmente definidos para o escopo da tese; a comparação numérica avalia a convergência das grandezas reconstituíveis e permite, pelo protocolo comparativo, identificar inconsistências internas nas fontes examinadas; e a verificação geométrica examina coordenadas e elementos gráficos segundo tolerância previamente estabelecida. Nenhuma dessas dimensões equivale a ensaio de usabilidade, replicação independente por equipe externa ou validação do método de emergia como teoria científica.

A justificativa científica reside em tratar o software como infraestrutura metodológica, não apenas como interface para fórmulas conhecidas. A originalidade reivindicada está na proposição e na avaliação de um conjunto delimitado de princípios que conecta o UEV efetivamente empregado, o inventário persistente, os resultados derivados e a representação ternária, sob critérios explícitos de verificação funcional, de comparação numérica e de coerência geométrica, e no protocolo auditável que distingue convergência numérica, limites de resolução da fonte e inconsistências estruturais na reconstrução dos resultados publicados.

O conhecimento generalizável articula-se em três planos. No plano científico, compreende princípios de projeto que mantêm dados de referência, dados primários e resultados derivados sob regras explícitas e delimitam a governança do UEV como problema de método. No plano metodológico, compreende o protocolo que relaciona verificação funcional, comparação numérica e coerência geométrica, além de sistematizar a classificação das divergências. No plano tecnológico, compreende a implementação, no *TRIGES*, do mecanismo que preserva o valor numérico empregado do UEV, mantém seu vínculo com os metadados disponíveis e integra inventário, indicadores e representação ternária. O software é a materialização desses resultados e a fonte das evidências, não o único conteúdo da contribuição doutoral; autenticação, exportação e visualização são capacidades de engenharia que sustentam sua operação, mas não constituem, isoladamente, originalidade científica.

A relevância aplicada é apresentada como potencial: indicadores em emergia apoiam análises territoriais, energéticas e produtivas (Lou; Qiu; Ulgiati, 2015; Almeida; Barrella; G*iannetti*, 2007; Nacimento *et al*., 2022), e a integração computacional pode favorecer sua organização e sua interpretação. O *TRIGES*, contudo, não substitui o julgamento do analista, nem harmoniza automaticamente baselines incompatíveis.

Além desta Introdução, o Capítulo 2 apresenta a revisão teórica, o estado da arte das ferramentas computacionais para emergia, a delimitação da lacuna e os princípios arquiteturais dela derivados; o Capítulo 3 descreve o método, os requisitos, a modelagem, a arquitetura, os módulos e os procedimentos de avaliação; o Capítulo 4 reúne os resultados do desenvolvimento, a verificação funcional, os sete estudos de caso, os candidatos à ampliação da cobertura empírica e a verificação geométrica; o Capítulo 5 responde ao problema de pesquisa, demonstra o atendimento aos sete objetivos, sistematiza as contribuições, explicita as limitações e apresenta os próximos passos e as considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo reúne os fundamentos conceituais e o estado da arte que sustentam a proposta da tese. A exposição articula oito seções: procedimento da revisão narrativa; fundamentos da contabilidade em emergia; indicadores clássicos; geometria do diagrama ternário; ferramentas computacionais e delimitação da lacuna; governança de UEVs e incerteza; princípios arquiteturais; síntese do referencial. A sequência deriva princípios e requisitos para os capítulos seguintes, sem confundir teoria, implementação e resultados próprios.

2.1 Procedimento da revisão narrativa

A revisão apresentada neste capítulo possui caráter crítico e narrativo, não sistemático: não decorreu de protocolo formal de busca em bases indexadas, *strings* predefinidas, recorte temporal explícito ou critérios formais de inclusão e exclusão, nem esses elementos são reconstruídos retrospectivamente nesta tese. A seleção das fontes foi orientada por três eixos: os fundamentos seminais da contabilidade em emergia e do diagrama ternário, incluindo Odum (1996), Barrella (2004) e Giannetti, Barrella e Almeida (2006); os antecedentes computacionais diretamente relacionados ao problema investigado, como Kamiya (2005), Takahashi (2007), Marvuglia *et al*. (2013) e De Vilbiss *et al*. (2024); e a literatura recente que aplica ou discute a síntese *R*, *N* e *F*, os indicadores clássicos, a geometria ternária, a governança de UEVs e a reprodutibilidade de software científico. Em decorrência, afirmações de ausência ou insuficiência de determinada característica ficam circunscritas ao conjunto de fontes efetivamente examinado, sem alegação de exaustividade sobre a literatura ou o universo de software científico em emergia.

2.2 Fundamentos da análise em emergia

A contabilidade em emergia parte da perspectiva doadora e organiza recursos de naturezas distintas em uma métrica biofísica comum. Para estabelecer essa base, a seção articula o conceito de emergia e de UEV, a linha de base, a modelagem por diagrama de energia sistêmica, a elaboração da tabela de emergia e a classificação dos fluxos em *R*, *N* e *F*.

A emergia é a quantidade de energia disponível de um único tipo, convencionalmente a energia solar, utilizada direta e indiretamente na formação de um recurso, produto ou serviço

(ODUM, 1996). Expressa em solar emjoules (sej), não representa a energia atualmente contida no produto, mas o trabalho ambiental e econômico acumulado ao longo das transformações que o tornaram disponível. A expressão *energy memory* evidencia essa dimensão histórica: a emergia registra a memória energética da formação do recurso.

Com base nessa definição, a perspectiva doadora (*donor-side*) avalia os sistemas pelo trabalho biofísico investido na geração dos recursos. Essa orientação difere de abordagens centradas no usuário, que atribuem valor a partir da utilidade, da escassez ou dos impactos associados ao consumo. A contabilidade em emergia permite reunir recursos renováveis e não renováveis, serviços ecossistêmicos, trabalho humano e insumos industriais em uma unidade comum. Por isso, explicita contribuições, como radiação solar, ciclos hídricos e calor geotérmico, frequentemente ausentes das contas econômicas. Isso não implica superioridade sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ou outras abordagens; trata-se de uma perspectiva complementar, adequada ao problema investigado nesta tese (Arbault *et al*., 2014b).

Ingwersen (2011) demonstrou essa complementaridade ao incorporar emergia como indicador de uso agregado de recursos em uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) processual: enquanto a fronteira convencional da ACV parte da extração dos recursos, a extensão proposta incorpora também os processos ambientais associados à sua formação (radiação solar, chuva, vento, calor profundo e marés), o que reforça o caráter *donor-side* da emergia sem substituir as métricas de impacto *downstream* da ACV. A transformidade solar da energia das marés foi especificamente revisada por Campbell (2000).

Para operacionalizar essa perspectiva, a relação quantitativa entre emergia e energia é expressa pela transformidade (τ), definida como a razão entre a emergia incorporada em um produto e sua energia disponível, com unidade $\frac{sej}{J}$ (ODUM, 1996). Quando a grandeza física de referência é a massa, utiliza-se a emergia específica, expressa em $\frac{sej}{g}$. O conceito mais geral é o Valor Unitário de Emergia (UEV, *Unit Emergy Value*), isto é, a emergia por unidade física de produto ou de recurso, independentemente de a referência ser energia, massa, volume, tempo ou valor monetário (Marvuglia *et al*., 2013). Nesta tese, emprega-se sej (*solar emjoule*) como unidade de emergia solar, distinta de seJ (*solar equivalent joule*), notação reservada à *Geobiosphere Emergy Baseline* (GEB) (Brown *et al*., 2016), e registra-se a baseline de origem de cada UEV. Quando a literatura adota distinções notacionais adicionais entre níveis de referência, essa informação é preservada na documentação bibliográfica do coeficiente. Para

fins terminológicos, utiliza-se transformidade para $\frac{sej}{J}$, emergia específica para $\frac{sej}{g}$ e UEV como designação genérica para os diferentes coeficientes de conversão.

Além de sua função operacional como coeficiente de conversão, a transformidade expressa, na formulação de Odum (1988), a posição relativa de uma forma de energia na hierarquia de qualidade energética da biosfera: transformações sucessivas concentram formas de energia capazes de realizar trabalho de maior qualidade, ao custo da quantidade disponível. Giannetti *et al*. (2019), ao reunirem transformidades de processos naturais e antrópicos publicadas ao longo de três décadas, encontraram correlação negativa expressiva entre energia disponível e transformidade ($r = -0{,}81$; $p < 0{,}001$), e sustentaram empiricamente a hipótese de hierarquia energética que fundamenta a noção de UEV empregada nesta tese.

Essa operacionalização exige distinguir os recursos naturais locais dos insumos adquiridos da economia. Entre os primeiros estão, conforme a fronteira adotada, radiação solar, chuva, vento, água e nutrientes do solo; entre os segundos estão eletricidade, combustíveis, produtos químicos, equipamentos e serviços. Os recursos locais dependem da disponibilidade e da capacidade de reposição no contexto do sistema, enquanto os insumos econômicos incorporam cadeias tecnológicas anteriores à aquisição. Essa distinção fundamenta a classificação *R*, N e *F* e explica por que produtos tecnológicos recorrentes podem ser apoiados por uma biblioteca de UEVs, enquanto recursos locais continuam dependentes da delimitação e do julgamento do analista.

A comparabilidade entre resultados exige ainda uma linha de base (baseline), definida pelo total anual de emergia associado aos processos geofísicos primários da Terra. Como os UEVs são proporcionais à baseline adotada, valores provenientes de linhas de base distintas não devem ser combinados sem conversão explícita, uniforme e documentada (Odum, 1996; Arbault *et al*., 2014a). A baseline não é, portanto, um metadado meramente editorial: ela condiciona a comparabilidade dos valores absolutos e precisa acompanhar cada UEV utilizado.

A linha de base foi revisada em diferentes momentos. Odum (1996) adotou $9{,}44 \times 10^{24} seJ \cdot ano^{-1}$, e Brown e Ulgiati (2016a) estimaram $12{,}1 \times 10^{24} seJ \cdot ano^{-1}$ com explicitação das incertezas dos fluxos e das razões de equivalência. Brown, Campbell, De Vilbiss e Ulgiati (2016) compararam procedimentos independentes e recomendaram a GEB2016 de $12{,}0 \times 10^{24} seJ \cdot ano^{-1}$. A síntese considerou a proximidade entre as estimativas de Brown e Ulgiati e de Campbell e a faixa independente obtida por De Vilbiss *et*

al.; não correspondeu a uma média indiscriminada de todos os resultados. Esse valor foi adotado na versão da biblioteca institucional documentada por De Vilbiss *et al*. (2024) e constitui a convenção operacional desta tese. A escolha não altera retrospectivamente os valores publicados em outras baselines nem transforma valores de $12{,}1 \times 10^{24}$ em resultados de $12{,}0 \times 10^{24}$; apenas declara a referência comum utilizada nos cálculos aqui apresentados.

Diferentes baselines coexistem na literatura e constituem fonte documentada de incompatibilidade entre estudos. Arbault *et al*. (2014a), ao compararem métodos em emergia aplicados a plantas de tratamento de água, identificaram diferenças quantitativas relevantes entre UEVs derivados de fontes distintas, ampliadas quando baselines incompatíveis são combinadas inadvertidamente. Nesta tese, cada UEV registra sua baseline de origem; a conversão proporcional entre baselines, seus limites e seus efeitos sobre a invariância dos indicadores são formalizados na Seção 2.6.

Essa exigência de harmonização também orienta sínteses bibliográficas de maior escala: antes de agrupar transformidades reunidas ao longo de aproximadamente três décadas de literatura, Giannetti *et al*. (2019) converteram os valores compilados para a referência comum de $12{,}0 \times 10^{24} seJ \cdot ano^{-1}$, a mesma convenção operacional adotada nesta tese.

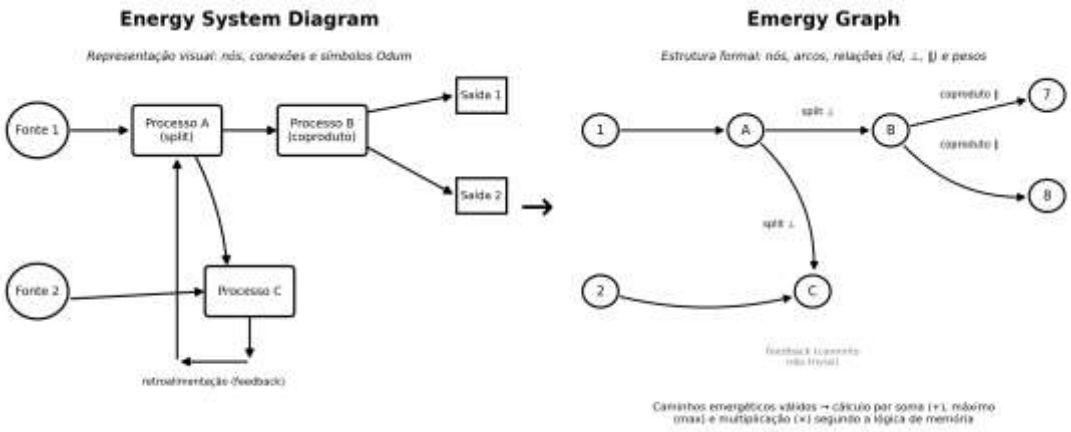
A análise é operacionalizada pela elaboração do diagrama de energia sistêmica, construído com a *Energy Systems Language* (ESL) desenvolvida por Odum (1988; 1996). A linguagem utiliza símbolos padronizados para representar fontes, processos de transformação, estoques, interações, consumidores e sumidouros, conectados por fluxos materiais, energéticos ou monetários dentro de uma fronteira de sistema explicitamente definida.

Nesse percurso, o diagrama ESL orienta três decisões essenciais: delimitar fronteiras e saídas; identificar os fluxos que compõem o inventário; apoiar a análise de coprodutos, divisões, retroalimentações e possíveis ocorrências de dupla contagem, o que constitui a base conceitual da tabela de emergia na abordagem tabular adotada nesta tese. A versão do *TRIGES* avaliada não implementa editor ESL nem processa diagramas sistêmicos como entrada para os cálculos; a definição de fronteiras, a classificação dos recursos e a elaboração de eventuais diagramas permanecem sob responsabilidade do analista e são realizadas externamente à plataforma (caracterização retomada na Seção 2.5). Reconhecer caminhos, relações de *split* e coproduto, retroalimentações e ancestralidade comum de fluxos constitui problema algorítmico

formalizado por Le Corre e Truffet (2012; 2015), que a representação gráfica não resolve por si só.

Conforme ilustrado na Figura 1, o processamento algébrico de redes exige converter o diagrama de sistemas de energia em uma estrutura formal de nós, arcos, relações e pesos antes da enumeração dos caminhos emergéticos.

Figura 1 - Transformação conceitual de um diagrama de sistemas de energia em grafo de emergia para processamento algébrico



Fonte: adaptado de Le Corre e Truffet (2015).

A partir do modelo sistêmico, a tabela de emergia organiza cada fluxo em linhas que registram descrição, unidade física, quantidade, UEV, referência bibliográfica, baseline, emergia calculada e classificação em *R*, *N* ou *F*. A emergia de cada fluxo resulta do produto entre a quantidade física e o UEV correspondente; os valores classificados são então agregados para formar *R*, *N* e *F*. A identidade fundamental da síntese clássica é:

$$\text{Emergia}_i = \text{Fluxo}_i \times \text{UEV}_i \tag{3a}$$

$$Y = R + N + F \tag{3b}$$

$$\text{UEV}_{\text{out},j} = \frac{Y}{Q_j} \tag{3c}$$

em que Y representa a emergia total que converge para o sistema avaliado. A identidade $Y = R + N + F$ é a base numérica da abordagem clássica e fundamenta o requisito de que Y e os percentuais sejam derivados do inventário registrado, e não mantidos como entradas independentes; a implementação desse requisito é descrita no Capítulo 3.

A partir da mesma identidade, define-se o Valor Unitário de Emergia de uma saída declarada. Se Y é a emergia total do sistema, conforme a equação (3b), e Q_j é a quantidade física da saída j informada pelo analista, o UEV dessa saída, $\mathrm{UEV}_{\mathrm{out},j}$, é dado pela equação (3c). A unidade de $\mathrm{UEV}_{\mathrm{out},j}$ depende da natureza física de Q_j: sej J^{-1} para energia, $\frac{sej}{kg}$ para massa ou sej por outra unidade física declarada. O UEV de saída é uma derivação a jusante do inventário consolidado e não deve ser confundido com o UEV de entrada associado a um fluxo, que constitui coeficiente previamente selecionado para calcular a emergia pela equação (3a). A relação também não resolve automaticamente a lógica de coprodutos ou de divisões: sua aplicação pressupõe que o analista tenha definido a saída, a quantidade e a regra metodológica de atribuição de Y. Assim, cálculo aritmético e legitimidade da alocação permanecem dimensões distintas.

Essa derivação corresponde a uma prática já estabelecida na síntese em emergia aplicada. Almeida *et al*. (2012), por exemplo, calcularam a transformidade da eletricidade gerada a partir da queima do biogás de um aterro sanitário dividindo a emergia total do sistema ($Y \approx 1{,}60 \times \frac{10^{20} sej}{ano}$) pela energia elétrica produzida ($Q \approx 1{,}22 \times \frac{10^{15} J}{ano}$), obtendo aproximadamente $1{,}31 \times \frac{10^{5} sej}{J}$, cálculo equivalente, em estrutura, ao UEVout, $\mathrm{UEV}_{\mathrm{out},j} = \frac{Y}{Q_j}$ empregado nesta tese. Os autores destacam ainda que a transformidade não é função de estado e depende das características particulares de cada processo, o que reforça, com evidência aplicada, a governança de UEVs contextuais discutida nesta seção.

A classificação dos fluxos decorre da natureza do recurso e de sua relação com a fronteira do sistema (Giannetti; Barrella; Almeida, 2006). *R* reúne recursos renováveis locais, como radiação solar, vento, chuva e fluxos hidrológicos repostos em ritmo compatível com o horizonte do estudo. *N* reúne estoques locais consumidos acima de sua capacidade de recuperação, como solo perdido, minerais e águas subterrâneas não renováveis. *F* reúne recursos, materiais, energia, serviços e trabalho adquiridos da economia, como combustíveis, eletricidade, fertilizantes, máquinas e mão de obra remunerada. A classificação exige

julgamento contextual e deve ser documentada pelo analista. Díaz-Delgado *et al*. (2014) ilustram essa exigência para recursos hídricos, e distinguem, dentro de um mesmo aquífero, volumes de recarga, tratados como renováveis, de volumes extraídos em sobre-exploração, classificados como não renováveis segundo um índice de preenchimento (*filling index*) baseado no nível piezométrico histórico, o que reforça que a categoria *R* ou *N* pode depender da escala temporal e da condição de reposição, não apenas da identidade física do recurso, decisão contextual do analista distinta da renovabilidade parcial de *F*, que não integra o modo *Traditional* adotado nesta tese.

A classificação de um fluxo como *R* não determina, isoladamente, sua regra de agregação. Brown e Ulgiati (2016b) mostram que vento, chuva, escoamento e ondas podem expressar trabalho de forças motrizes primárias comuns; sua soma indiscriminada pode produzir dupla contagem. Para sistemas de paisagem, os autores comparam a soma das fontes primárias independentes ao maior fluxo secundário ou terciário e adotam o maior resultado, procedimento contextual, não regra universal. Também ressaltam que transformidades globais são médias e que relevo, altitude e intensidade dos processos podem modificar o valor aplicável localmente. Assim, classificar um fluxo e decidir se ele é contabilmente independente são operações distintas. A primeira define sua categoria no inventário; a segunda examina ancestralidade comum e relações físicas entre contribuições. O *TRIGES* agrega deterministicamente os fluxos informados, mas não identifica dependências biofísicas nem seleciona a regra de agregação em lugar do analista.

A fronteira também determina quais fluxos permanecem externos. Morandi *et al*. (2015), ao compararem União Europeia, Itália e Toscana como níveis territoriais aninhados, mostraram que um fluxo importado para uma unidade pode tornar-se interno quando a fronteira incorpora o nível superior de origem. O efeito recai principalmente sobre *F*, enquanto *R* e *N* permanecem associados à mesma unidade física subjacente. Portanto, externo e interno são categorias relativas à fronteira, e a rastreabilidade de um resultado exige documentar o sistema ao qual os agregados se referem.

Um exemplo empírico dessa classificação é apresentado por Lefroy e Rydberg (2003), que avaliaram três sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália, rotação anual tremoço/trigo, plantação do arbusto forrageiro tagasaste e cultivo em ruelas que combinam as duas espécies, decompõem cada sistema em fontes renováveis locais (*R*), fontes não renováveis locais (*N*), materiais e energia adquiridos (*M*) e serviços contratados (*S*). Os autores não utilizam a notação

F adotada nesta tese; a agregação $F = M + S$ constitui uma harmonização do estudo original para a estrutura R, N e F empregada aqui, e não uma notação originalmente proposta pelos autores. Reclassificados dessa forma, os três sistemas ilustram como a estrutura R, N e F acomoda arranjos produtivos distintos, de um sistema anual predominantemente não renovável a um sistema perene com maior participação renovável, sem alterar a formulação canônica das equações (3a) a (3c).

Em uma formulação aplicada à avaliação de sistemas agrícolas, Agostinho e Pereira (2013) agrupam os recursos ambientais como $I = R + N$ e os recursos econômicos como $F = M + S$; M são os materiais adquiridos e S, o trabalho e os serviços; como $Y = I + F$, a estrutura resulta em $Y = R + N + F$, compatível com a síntese clássica adotada nesta tese.

Dois cuidados são particularmente relevantes. Entre fluxos ambientais renováveis movidos pela mesma fonte, contabiliza-se apenas a contribuição independente pertinente e evita-se somar manifestações do mesmo trabalho ambiental. Além disso, um mesmo fluxo não deve ser registrado simultaneamente em categorias diferentes sem decomposição física ou metodológica justificável; quando há uma parcela natural e outra adquirida, como em determinados usos de água, cada parcela deve ser registrada segundo sua origem. O *TRIGES* armazena a classe atribuída e deriva os resultados a partir dela, mas não substitui o julgamento do analista nem garante, sozinho, a ausência de dupla contagem na construção do inventário.

Por fim, a álgebra em emergia segue a lógica de memorização, e não a lógica de conservação empregada em balanços de energia ou em procedimentos convencionais de alocação da ACV (Brown; Herendeen, 1996). Em processos com coprodutos, cada saída pode carregar a memória integral do trabalho comum que a gerou; quando trajetórias voltam a se reunir, porém, as regras da álgebra impedem de que a mesma emergia seja somada novamente. O *TRIGES* opera a jusante dessa etapa, sem calcular UEVs por propagação em redes; a Seção 2.5 delimita essa diferença em relação às implementações baseadas em grafos.

A relevância computacional dessas regras foi demonstrada por Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018), que desenvolveram em MATLAB um algoritmo que combina busca com profundidade *Depth First Search* e *Track-Summing Method* para identificar caminhos emergéticos e aplicar tratamentos específicos a saídas únicas, coprodutos, divisões e retroalimentações. O procedimento inclui mecanismos destinados a impedir dupla contagem quando caminhos emergéticos retornam ou voltam a se encontrar, o que evidencia que a

propagação da emergia em redes interconectadas constitui um problema algorítmico distinto da agregação tabular de fluxos previamente associados a UEVs.

O *TRIGES* permite registrar múltiplas saídas declaradas por um *Point* e calcular seus UEVs pela equação (3c), sem identificar automaticamente coprodutos, divisões ou retroalimentações. O analista permanece responsável pela fronteira, pela natureza das saídas, pelas quantidades físicas e pela consistência do inventário que origina Y; a plataforma deriva o valor unitário de cada saída declarada, mas não decide se a atribuição integral de Y é metodologicamente aplicável ao caso.

A atribuição integral de Y a cada saída declarada deve ser distinguida de procedimentos de alocação entre múltiplas saídas. Ingwersen (2011), ao comparar a regra de coprodutos empregada convencionalmente em emergia com uma alocação econômica utilizada em ACV para um estudo real de mineração de ouro, prata e mercúrio, demonstrou que a escolha da regra pode produzir diferenças substanciais nos UEVs resultantes: sob alocação econômica, o UEV da prata caiu para aproximadamente 2,8% do valor obtido pela regra de coprodutos; o do mercúrio, para aproximadamente 0,8%. Assim, a relação $\mathrm{UEV}_{\mathrm{out},j} = \frac{Y}{Q_j}$ implementada no *TRIGES* representa uma derivação a partir da emergia integral do *Point*, e não constitui algoritmo geral de alocação entre produtos, coprodutos, subprodutos ou *splits*. A classificação metodológica das saídas e a decisão acerca da aplicabilidade da atribuição integral de Y permanecem sob responsabilidade do analista.

Essa natureza encadeada da avaliação, do diagrama sistêmico, do inventário, da quantificação física, da conversão por UEV e do cálculo dos indicadores permanece presente em sínteses recentes da literatura. Zhang *et al*. (2024), ao sistematizarem aplicações da análise em emergia a serviços ecossistêmicos, descrevem um fluxo metodológico que parte da representação sistêmica, passa pela quantificação física e aplicação dos fatores de conversão e culmina na análise de indicadores, o que reforça a necessidade de preservar as relações entre modelo sistêmico, inventário, parâmetros e resultados derivados, retomada nos indicadores discutidos a seguir.

A cadeia conceitual desta seção define também a unidade mínima de auditoria: um resultado não é adequadamente explicado apenas pelo valor final de Y ou de um indicador, mas deve ser relacionável à fronteira declarada, às linhas do inventário, às quantidades físicas, aos UEVs, às classes *R*, *N* e *F* e às regras de agregação adotadas. Essa exigência não transfere ao

software a decisão científica do analista; estabelece, porém, quais registros precisam permanecer conectados para que uma decisão seja examinada e divergências sejam localizadas no nível em que surgiram.

No mesmo estudo do aterro sanitário, Almeida *et al*. (2012) descrevem a síntese em emergia (ODUM, 1996) como um procedimento de quatro etapas sucessivas: construção do diagrama do sistema, elaboração da tabela de emergia, cálculo dos indicadores e interpretação por diagramas ternários, fato que evidencia que essas etapas são articuladas, não independentes; o diagrama ternário, em particular, depende da síntese *R*, *N* e *F* previamente estabelecida e não constitui metodologia autônoma. A contribuição do *TRIGES* não está em propor essa sequência, mas em operacionalizar computacionalmente as etapas de estruturação tabular do inventário, cálculo dos indicadores e interpretação pelo diagrama ternário, a partir de dados previamente definidos pelo analista. A construção do diagrama de energia sistêmica permanece externa à plataforma.

2.3 Indicadores em emergia clássicos

A síntese *R*, *N* e *F* produz um conjunto operacional composto por quatro índices clássicos EYR, EIR, ELR e ESI e pela renovabilidade percentual (%R). Os quatro índices são razões adimensionais entre agregados de emergia; %R é uma fração de composição, de natureza conceitual distinta, embora seja analisada em conjunto com eles por sua relevância diagnóstica e por corresponder à coordenada renovável do diagrama ternário.

A Taxa de Carga Ambiental (ELR) relaciona as contribuições não renováveis e econômicas à base renovável local, conforme a equação (4):

$$ELR = \frac{(N + F)}{R} \tag{4}$$

A Taxa de Rendimento em Emergia (EYR) expressa a emergia total disponibilizada pelo sistema por unidade de emergia adquirida da economia, equação (5):

$$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{(R+N+F)}{F} \tag{5}$$

A Taxa de Investimento em Emergia (EIR) relaciona os insumos adquiridos da economia à contribuição ambiental local.

Na formulação canônica adotada nesta tese, em que $Y = R + N + F$, obtém-se ainda a relação algébrica demonstrada por Brown e Ulgiati (1997) $EIR = \frac{1}{(EYR-1)}$:

$$EIR = \frac{F}{(R+N)} \tag{6}$$

O Índice de Sustentabilidade em Emergia (ESI) é definido pela razão entre EYR e ELR, interpretado conjuntamente com seus componentes, não como avaliação autossuficiente de sustentabilidade (BROWN; ULGIATI, 1997; 2002):

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \tag{7}$$

A estrutura algébrica do modo Traditional corresponde à formulação explicitada por Brown e Ulgiati (1997), que sistematizaram EYR, EIR e ELR como funções dos fluxos renovável, não renovável e adquirido e propuseram a razão $\frac{EYR}{ELR}$ como medida agregada de rendimento e carga ambiental, posteriormente consolidada na literatura como ESI. Os próprios autores ressaltam que uma mesma razão EYR pode resultar de combinações distintas de contribuição renovável e não renovável, de modo que nenhuma razão isolada, EYR, EIR, ELR ou ESI, descreve integralmente o desempenho de um sistema; essa é a razão pela qual o *TRIGES* apresenta simultaneamente *R*, *N*, *F*, os quatro índices clássicos, %R e a posição no diagrama ternário.

A Renovabilidade Percentual (%R) expressa a participação de *R* na emergia total. Diferentemente dos quatro índices clássicos, é uma fração de composição e uma coordenada baricêntrica do diagrama ternário. Sua interpretação depende do setor, da escala e das fronteiras do estudo (Nacimento *et al*., 2022):

$$\%R = \frac{R}{Y} \times 100 \tag{8}$$

As razões pressupõem denominadores admissíveis: $F > 0$ para EYR; $R + N > 0$ para EIR; $R > 0$ para ELR; $e\ ELR > 0$ para ESI. Quando essas condições não são satisfeitas, o resultado deve ser tratado explicitamente como infinito, indefinido ou não aplicável, conforme a expressão, e não convertido automaticamente em zero. No recorte avaliado, o *TRIGES* utiliza as formulações canônicas das equações (4) a (8), sem incorporar variantes híbridas ou de

fronteira estendida. Arbault *et al*. (2014b) demonstraram que a padronização da fórmula é condição necessária para comparações reprodutíveis.

Esses casos de fronteira possuem interpretação matemática e não devem ser ocultados por conveniência computacional. Quando F tende a zero, EYR cresce e EIR tende a zero, o que expressa baixa dependência de insumos adquiridos, desde que R + N permaneça positivo. Quando R tende a zero, ELR cresce, pois a carga não renovável e econômica deixa de ser comparada a uma base renovável positiva. Se Y for zero, também não existem frações normalizadas nem ponto ternário definido. Portanto, verificações de domínio devem anteceder o cálculo e distinguir valor numérico válido, limite matemático e ausência de informação. Essa distinção é necessária para que a interface não transforme uma condição indefinida em resultado aparentemente preciso.

A utilização dessas razões requer consistência entre fórmula e fronteira sistêmica. Arbault *et al*. (2014b) demonstraram que variantes de EYR e ELR coexistem na literatura e, quando combinadas, originam versões semanticamente distintas de ESI. Os autores distinguem uma formulação convencional orientada ao sítio de produção, denominada pelos autores ESI00, de uma formulação orientada ao ciclo de vida, que adverte que combinações intermediárias podem misturar fronteiras incompatíveis. Na nomenclatura de Arbault *et al*. (2014b), a formulação convencional pode ser relacionada à síntese desta tese, considerando-se os recursos locais renováveis como *R*, os locais não renováveis como *N* e o conjunto dos investimentos diretos e de background como *F*, preservando a estrutura agregada $Y = R + N + F$. Por essa razão, a comparação entre estudos exige que a definição empregada seja explicitada e mantida de forma consistente; nesta tese, a convenção operacional é a formulação clássica centrada no sítio de produção, implementada no modo *Traditional R*, *N* e *F*. Valores ou faixas de ESI somente são comparáveis quando derivados de formulações e fronteiras compatíveis.

Essa formulação clássica, sob outra nomenclatura, aparece em Pan et al. (2021), que estruturam a avaliação de um sistema urbano a partir de recursos renováveis locais (*R*), extrações locais não renováveis (LN = *N*) e recursos importados (IN = *F*), com expressões de EYR, EIR, ELR e ESI equivalentes às formulações canônicas adotadas nesta tese. Song *et al*. (2024) replicam essa estrutura em avaliação longitudinal (1990–2019) de um sistema agrícola regional na bacia do rio Liaohe, China (I ≡ F, U ≡ Y), reportando EYR de 1,16 para 1,13, ELR de 6,71 para 8,31 e ESI de 0,17 para 0,14 ao longo do período, sob baseline de $1{,}21 \times 10^{25}$ sej (BROWN et al., 2016), de mesma ordem de grandeza, mas não idêntica à de $12{,}0 \times 10^{24} sej$

adotada nesta tese, diferença tratada sem conversão retroativa. Ambos os casos confirmam que a estrutura agregada *R*, *N* e *F* permanece em uso corrente na literatura recente, inclusive em avaliações longitudinais.

Avalos-Rangel *et al*. (2021) aplicaram a estrutura *R*, *N* e *F* a um sistema familiar de milpa sob a GEB2016. O estudo separa parcelas renovável e não renovável do trabalho em linhas distintas, evita dupla contagem entre vento e chuva e calcula UEVs para coprodutos e divisões. O caso acrescenta três aspectos relevantes ao referencial: classificação explícita, tratamento metodológico de fluxos relacionados e distinção entre UEV de entrada e UEV de saída. A comparação numérica, limitada aos componentes reconstruíveis a partir dos dados publicados, é apresentada no Capítulo 4.

Lei e Wang (2008), ao analisarem a evolução do sistema urbano de Macao, empregam $U = R + N + F$ para a emergia utilizada pelo sistema e reservam Y à emergia exportada; nesse contexto, o EYR é apresentado como $\frac{Y}{F}$. Essa convenção difere da formulação operacional adotada nesta tese, em que $Y = R + N + F$ e $EYR = \frac{Y}{F}$ apenas porque, no vocabulário da tese, Y coincide com o agregado $R + N + F$. O caso evidencia que rótulos e símbolos coincidentes não asseguram equivalência matemática entre estudos, o que reforça a necessidade de explicitar fórmula, fronteira e semântica das variáveis na comparação de resultados.

As faixas reunidas na Tabela 1 são referências históricas de interpretação, e não leis universais. Seu uso depende da fronteira do sistema, do domínio de aplicação, da escala espacial e temporal, das escolhas de classificação e da consistência dos UEVs empregados. A baseline também precisa ser tratada de forma uniforme: o simples reescalonamento de todos os UEVs preserva os índices adimensionais, enquanto a mistura de baselines pode produzir distorções. Em especial, o ESI não deve ser utilizado isoladamente para declarar que um sistema é sustentável ou insustentável; a leitura recomendada combina EYR, EIR, ELR, ESI, %R, inventário e posição no diagrama ternário.

A interpretação deve considerar também o método e o tipo de sistema. Agostinho e Pereira (2013) mostram que contabilidade em emergia, pegada ecológica e energia incorporada respondem a fronteiras e a fenômenos diferentes, o que impede que seus indicadores sejam tratados como medidas intercambiáveis. Bonilla *et al*. (2010) qualificam as leituras temporais do ESI como referências comparativas entre sistemas semelhantes. Em sistemas territoriais hierarquicamente aninhados, Morandi *et al*. (2015) observam que o significado original do

EYR, associado ao rendimento de um processo produtivo em relação ao investimento externo, não se transfere diretamente, e recorrem à reinterpretação de Campbell e Garmestani (2012), que tratam a razão entre a emergia total utilizada e os fluxos importados como medida de vitalidade do sistema, e não necessariamente como rendimento em relação a um sistema maior. Essa discussão não invalida o EYR para territórios, mas exige que sua leitura seja qualificada pelo tipo de sistema e pela escala analisada; fórmula e interpretação constituem, portanto, dimensões relacionadas, mas não idênticas.

Tabela 1 - Indicadores em emergia clássicos: fórmulas, interpretação e faixas historicamente empregados

Sigla	**Nome completo**	**Fórmula**	**Interpretação**	**Faixas interpretativas historicamente empregadas**
ELR	Environmental Loading Ratio / Taxa de Carga Ambiental	$ELR = \frac{N + F}{R}$	Expressa a pressão relativa dos fluxos não renováveis e econômicos sobre a base renovável local.	Valores próximos ou inferiores a 2 foram historicamente associados a menor carga; valores entre aproximadamente 3 e 10, a carga intermediária; e valores superiores a 10, a maior carga. A leitura depende do setor e da fronteira.
EYR	Emergy Yield Ratio / Taxa de Rendimento em Emergia	$EYR = \frac{Y}{F}$	Expressa a emergia total disponibilizada por unidade de emergia adquirida da economia.	Valores próximos de 1 indicam pequena contribuição local adicional; faixas entre aproximadamente 2 e 5 foram historicamente associadas a rendimento intermediário; valores superiores a 5, a maior mobilização relativa de recursos locais.
EIR	Emergy Investment Ratio / Taxa de Investimento em Emergia	$EIR = \frac{F}{R + N}$	Relaciona o investimento econômico externo à contribuição ambiental local.	Não há limiar universal. Valores maiores indicam maior dependência relativa de F; valores menores, maior participação dos recursos locais, sempre considerada a fronteira adotada.
ESI	Emergy Sustainability Index / Índice de Sustentabilidade em Emergia	$ESI = \frac{EYR}{ELR}$	Sintetiza a relação entre rendimento e carga ambiental; não constitui, isoladamente, prova de sustentabilidade.	ESI < 1: faixa historicamente associada a menor relação rendimento/carga; 1 < ESI < 5: faixa intermediária; ESI > 5: faixa historicamente interpretada como de

				maior contribuição relativa à sustentabilidade.
%R	Renovabilidade Percentual	$\%R = \left(\frac{R}{Y}\right) \times 100$	Expressa a participação renovável na emergia total e corresponde à coordenada renovável do diagrama ternário.	Quanto maior, maior a participação relativa de R. Não há referência universal; a interpretação depende do setor, do contexto e da fronteira.

Fonte: elaborado pelo autor com base em Ulgiati *et al*. (1995), Brown e Ulgiati (1997), Giannetti, Barrella e Almeida (2006), e Nacimento *et al*. (2022).

Brown e Ulgiati (1997) fundamentam a formulação matemática de EYR, EIR, ELR e ESI e suas primeiras interpretações históricas; situam o ESI então recém-proposto entre valores próximos de 1 e aproximadamente 10 para economias nacionais. O limiar ESI = 5 utilizado nesta tese e no diagrama ternário deriva de desenvolvimentos posteriores da linhagem ternária em emergia, especificamente de Giannetti, Barrella e Almeida (2006), e não deve ser atribuído a Brown e Ulgiati (1997).

A literatura também registra formulações de fronteira estendida, nas quais frações renováveis de insumos econômicos são desagregadas ao longo das cadeias produtivas (Arbault *et al*., 2014b). O escopo desta tese permanece na formulação clássica centrada no sítio de produção e no modo *Traditional R*, N e *F*, condição necessária para a comparação direta com os estudos selecionados para a avaliação numérica. Variantes de fronteira estendida e renovabilidade parcial não integram a avaliação científica apresentada.

A renovabilidade parcial não constitui formulação surgida com as atualizações recentes da ferramenta ternária. Ortega *et al*. (2005), em análise de sistemas brasileiros de produção de soja, já desagregavam materiais e serviços em frações renováveis e não renováveis e incorporavam externalidades como serviços adicionais. Partindo da mesma estrutura agregada *Traditional*, $I = R + N$, $F = M + S$ e $Y = I + F$, portanto $Y = R + N + F$, os autores propõem uma decomposição adicional dos fluxos econômicos: $M = MR + MN$ e $S = SR + SN + SA$, em que MR e MN correspondem, respectivamente, às parcelas renovável e não renovável dos materiais; SR e SN, às parcelas renovável e não renovável dos serviços e AS, a serviços adicionais associados a externalidades negativas (poluição, perda de solo, custos de saúde, entre outros fatores).

Essa abordagem preserva a estrutura geral da síntese em emergia, mas altera a decomposição dos fluxos e, consequentemente, a formulação de determinados indicadores: $\%R = 100 \times \frac{(R + MR + SR)}{Y}$; $EYR = \frac{y}{(MN + SN + SA)}$; $EIR = \frac{(MN + SN + SA)}{(R + MR + SR + N)}$; $ELR = \frac{(N + MN + SN + SA)}{(R + MR + SR)}$. Essas expressões são apresentadas apenas para caracterizar a variante metodológica discutida na literatura; não integram o motor de cálculo avaliado do *TRIGES* nesta tese, que permanece restrito às equações *Traditional* apresentadas na Seção 2.3 e implementadas no Capítulo 3.

Agostinho *et al*. (2025) devem ser entendidos, portanto, como responsáveis pela incorporação dessa possibilidade à atualização da ferramenta ternária Excel/VBA, e não como origem metodológica da renovabilidade parcial: a desagregação de materiais e serviços por renovabilidade e a inclusão de externalidades como serviços adicionais já haviam sido propostas por Ortega *et al*. (2005), que se apoiam, por sua vez, em formulações ainda anteriores dos mesmos autores (Ortega; Polidoro, 2002; Panzieri *et al*., 2002; Bastianoni *et al*., 2001). O Quadro 1 (que se apresenta a seguir) delimita, de forma objetiva, a diferença entre a formulação *Traditional* adotada pelo *TRIGES* e a formulação expandida discutida por Ortega *et al*. (2005).

Quadro 1 - Delimitação entre a formulação *Traditional R*, *N* e *F* adotada no *TRIGES* e a abordagem com renovabilidade parcial discutida por Ortega *et al*. (2005)

Aspecto	***Traditional R*, *N* e *F* do *TRIGES***	**Formulação expandida de Ortega *et al*. (2005)**
Recursos naturais	R e N	R e N
Materiais adquiridos	Agregados em *F*	Desagregados em MR e MN
Serviços	Agregados em *F*	Desagregados em SR, SN e SA
Renovabilidade parcial de materiais	Não	Sim
Renovabilidade parcial de serviços	Não	Sim
Externalidades como serviços adicionais	Não	Sim (SA)
Indicadores modificados em função das frações	Não	Sim
Implementado no *TRIGES* avaliado nesta tese	Sim	Não

Fonte: elaboração própria a partir de Ortega *et al*. (2005).

2.4 Diagrama ternário em emergia

A normalização de *R*, *N* e *F* transforma a composição em emergia em três frações, cuja soma é unitária. Essa restrição define um espaço bidimensional representável por um triângulo, no qual a posição de cada sistema sintetiza sua composição relativa e permite relacioná-la aos indicadores clássicos.

Geometricamente, definidas as frações normalizadas $\bar{R} = \frac{R}{Y}$, $\bar{N} = \frac{N}{Y}$ e $\bar{F} = \frac{F}{Y}$, tem-se $\bar{R} + \bar{N} + \bar{F} = 1$. É a soma das frações normalizadas, e não o valor absoluto de Y, que permanece constante. Em um triângulo equilátero, a soma das distâncias perpendiculares de um ponto aos três lados é constante, independentemente da posição do ponto. Giannetti, Barrella e Almeida (2006) aplicam essa propriedade geométrica para interpretar as distâncias perpendiculares normalizadas como as proporções $\bar{R}, \bar{N} e \bar{F}$.

A aplicação dessa geometria à contabilidade em emergia foi proposta por Barrella (2004) e formalizada por Giannetti, Barrella e Almeida (2006). As coordenadas baricêntricas normalizadas de um sistema são definidas pela equação (9):

$$\overline{R} = \frac{R}{Y}, \overline{N} = \frac{N}{Y}, \overline{F} = \frac{F}{Y} \text{ com } \overline{R} + \overline{N} + \overline{F} = 1 \qquad (9)$$

A condição de soma unitária reduz a composição a dois graus de liberdade independentes. Por isso, cada combinação válida de $\bar{R}$, $\bar{N}$ e $\bar{F}$ corresponde de forma unívoca a um ponto no interior ou na fronteira do triângulo.

Nesta tese, adota-se a seguinte convenção de orientação, coerente com a implementação computacional: *R* no vértice superior, *N* no vértice inferior esquerdo e *F* no vértice inferior direito. A composição ($\bar{R}$ = 1, $\bar{N}$ = 0, $\bar{F}$ = 0) coincide com o vértice *R*; a composição ($\bar{R}$ = 0, $\bar{N}$ = 0, $\bar{F}$ = 1) coincide com o vértice *F*; e a composição ($\bar{R}$ = 0, $\bar{N}$ = 1, $\bar{F}$ = 0) coincide com o vértice *N*. Sistemas reais ocupam posições intermediárias, cujas coordenadas ternárias são associadas às distâncias perpendiculares normalizadas do ponto aos lados opostos aos respectivos vértices, o que expressa a participação de cada categoria de recurso (Giannetti; Barrella; Almeida, 2006).

Para renderização computacional, as coordenadas baricêntricas são convertidas em coordenadas cartesianas. Uma parametrização de referência considera um triângulo equilátero de lado L, com *N* no vértice inferior esquerdo, *F* no inferior direito e *R* no vértice superior:

$$x = L.\left(\overline{F} + \frac{\overline{R}}{2}\right) \tag{10a}$$

$$y = L \cdot \overline{R} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \tag{10b}$$

onde L é o comprimento do lado do triângulo, em pixels ou unidades de tela. Nessa parametrização, $\bar{R} = 1$ corresponde ao ponto $(\frac{L}{2}, \frac{L\sqrt{3}}{2})$, no vértice superior; $\bar{F} = 1$ corresponde a (L, 0), no vértice inferior direito; e $\bar{N} = 1$ corresponde a (0, 0), no vértice inferior esquerdo. A equilateralidade é mantida como invariante do projeto em todas as operações de projeção, normalização e conversão de coordenadas.

Para compatibilizar a formulação teórica com a renderização, a implementação utiliza inicialmente coordenadas lógicas normalizadas, definidas por $x_l = \frac{\bar{F}-\bar{N}}{\sqrt{3}}$ e $y_l = \bar{R}$. No sistema cartesiano de referência das equações (10a) e (10b), o centróide do triângulo equilátero de lado L está localizado em $(\frac{L}{2}, \frac{L\sqrt{3}}{6})$. Na conversão para o Canvas, entretanto, o eixo vertical é invertido, pois suas coordenadas crescem de cima para baixo. Considerando (c_x, c_γ) como a posição, em pixels, do centróide do triângulo renderizado e $s = \frac{L\sqrt{3}}{2}$, como a escala correspondente à altura do triângulo, as coordenadas de renderização são dadas pelas equações (11a) e (11b).

$$x = c_x + \frac{\overline{F} - \overline{N}}{\sqrt{3}} \cdot s \tag{11a}$$

$$y = c_y + \left(\frac{1}{3} - \overline{R}\right) \cdot s \tag{11b}$$

As equações (11a) e (11b) representam a mesma geometria das equações (10a) e (10b) após a mudança de origem, a aplicação de escala e a inversão do eixo vertical do Canvas. A inversão altera apenas a orientação do sistema de coordenadas, preserva as proporções baricêntricas, as distâncias relativas e a posição composicional dos pontos no triângulo.

A equivalência entre as parametrizações pode ser verificada nos casos-limite após a conversão entre os respectivos sistemas de coordenadas. Para $\bar{R} = 1$, o ponto coincide com o vértice superior; para $\bar{N} = 1$, com o vértice inferior esquerdo; e para $\bar{F} = 1$, com o vértice inferior

direito. Na composição uniforme $\bar{R} = \bar{N} = \bar{F} = \frac{1}{3}$, as coordenadas coincidem com o centróide. Como ambas as transformações são afins, a coincidência nos vértices determina a mesma posição para qualquer combinação convexa das três componentes. Essa propriedade também preserva segmentos e razões relativas no interior do triângulo. A verificação computacional dessa equivalência deve, portanto, examinar vértices, centróide e pontos intermediários, separar erro de orientação, erro de escala e erro de arredondamento da renderização. A relação exata entre a escala s e o lado L e a coincidência numérica entre as duas parametrizações são verificadas no Capítulo 4.

Sobre essa base geométrica, o diagrama combina quatro elementos analíticos definidos por Giannetti, Barrella e Almeida (2006) em sua formalização do diagrama ternário aplicado à contabilidade em emergia: linhas de recursos, curvas de sustentabilidade, linhas de sensibilidade e ponto simérgico (Simergy Point), isto é, o ponto de composição em emergia agregada. Esses elementos conectam as coordenadas baricêntricas aos indicadores calculados a partir de *R*, *N* e *F*.

As linhas de recursos são segmentos paralelos aos lados do triângulo e representam valores constantes de $\bar{R}$, $\bar{N}$ ou $\bar{F}$. Como $\bar{R} + \bar{N} + \bar{F} = 1$, os indicadores EYR, EIR e ELR podem ser expressos diretamente em termos das coordenadas baricêntricas normalizadas, conforme a equação (12), derivação equivalente à apresentada por Giannetti, Barrella e Almeida (2006), que expressa as mesmas relações em escala percentual ($EYR = \frac{100}{\%F}$, $EIR = \%\frac{F}{100-\%F}$, $ELR = \frac{(100-\%R)}{\%R}$).

$$EYR = \frac{1}{\overline{F}}, EIR = \frac{\overline{F}}{1-\overline{F}}, ELR = \frac{1-\overline{R}}{\overline{R}} \tag{12}$$

Linhas paralelas ao lado *R* e *N* mantêm $\bar{F}$ constante e, por consequência, representam valores constantes de EYR e EIR. Linhas paralelas ao lado *N* e *F* mantêm $\bar{R}$ constante e representam valores constantes de ELR. Assim, a posição do ponto permite relacionar visualmente composição e desempenho, sem substituir o cálculo numérico apresentado na tabela de indicadores.

As curvas de sustentabilidade constituem o lugar geométrico das composições ($\bar{R}$, $\bar{N}$, $\bar{F}$) que satisfazem ESI = k, para uma constante positiva k. Substituindo as equações (4), (5) e (7) pelas relações em coordenadas baricêntricas, obtém-se a equação (13):

$$ESI = \frac{\overline{R}}{\overline{F}.\left(1 - \overline{R}\right)} = k \tag{13}$$

Geometricamente, as curvas partem do vértice *N* e se dirigem à face *R* e *F*, com concavidade variável conforme k. As curvas ESI = 1 e ESI = 5 delimitam faixas historicamente utilizadas para apoiar a leitura comparativa, mas não constituem fronteiras universais entre sistemas sustentáveis e insustentáveis. A utilização dessas duas referências no espaço ternário deriva diretamente de Giannetti, Barrella e Almeida (2006), que representam graficamente as curvas SI = 1 e SI = 5 e que delimitam áreas de sustentabilidade no triângulo. SI é a sigla empregada pelos autores para o índice correspondente ao ESI na terminologia adotada nesta tese. Esse tratamento gráfico fundamenta o requisito de que as curvas sejam derivadas computacionalmente pela equação (13), o que assegura correspondência entre o indicador calculado e sua representação visual; a implementação desse requisito é descrita no Capítulo 3.

Giannetti, Almeida e Bonilla (2012) sobrepuseram ao domínio *R*, *N* e *F*, critérios baseados na ordem relativa dos componentes, em combinações de EYR e ELR e em faixas de ESI; as partições não coincidem integralmente, o que confirma que um único índice não funciona como veredito de sustentabilidade. Os autores observam, por exemplo, que o critério de desigualdade $R \gg N \gg F$ de Harizaj (2011) e a faixa ESI > 10 se sobrepõem apenas parcialmente no domínio ternário, e isto reforça a escolha desta tese de apresentar simultaneamente a composição *R*, *N* e *F* e os indicadores derivados, em vez de um único índice agregado.

As linhas de sensibilidade de Giannetti, Barrella e Almeida (2006) conectam um vértice a um ponto, representam a variação de uma fração e mantêm constante a razão entre as outras duas. Esse recurso geométrico não se confunde com três mecanismos distintos: a sensibilidade analítica à variação do agregado *F* estudada por Barrella (2011); os cenários multivariados, nos quais vários fluxos são alterados simultaneamente, como em Chen e Chen (2012); a alteração determinística de um UEV por vez no RF14. A linha ternária descreve uma trajetória composicional, enquanto o RF14 perturba um coeficiente de fluxo e recalcula os agregados. Nenhum desses procedimentos constitui, por si, propagação probabilística de incerteza.

O ponto simérgico, denominado *simergic point* por Giannetti, Barrella e Almeida (2006) e apresentado como Simergy Point na interface da plataforma, é calculado como média ponderada das coordenadas baricêntricas dos sistemas individuais, com pesos iguais aos respectivos valores de Y. A ponderação pela magnitude de saída de cada sistema corresponde à propriedade descrita pelos autores originais para a agregação de processos com produções distintas. A formulação algorítmica empregada na plataforma é implementação própria desta tese:

$$\left(\overline{R_{ag}}, \overline{N_{ag}}, \overline{F_{ag}}\right) = \frac{\sum_i Y_i\left(\overline{R_i}, \overline{N_i}, \overline{F_i}\right)}{\sum_i Y_i} \tag{14}$$

O ponto agregado representa a composição resultante de um conjunto de sistemas, como uma cadeia produtiva, um território ou um bloco econômico. Trata-se de uma mistura ponderada no espaço baricêntrico, aplicada componente a componente, conforme a equação (14a):

$$\bar{R}ag = \frac{(\Sigma i\, Yi\, \bar{R}i)}{(\Sigma i\, Yi)},\ \bar{N}ag = \frac{(\Sigma i\, Yi\, \bar{N}i)}{(\Sigma i\, Yi)},\ \bar{F}ag = \frac{(\Sigma i\, Yi\, \bar{F}i)}{(\Sigma i\, Yi)} \tag{14a}$$

Como cada composição individual satisfaz $\bar{R}i + \bar{N}i + \bar{F}i = 1$, a composição agregada também satisfaz $\bar{R}ag + \bar{N}ag + \bar{F}ag = 1$, desde que $\Sigma i\, Yi > 0$. Adicionalmente, o tamanho dos marcadores pode ser proporcional a Y, o que combina composição relativa, expressa pela posição, e magnitude absoluta, expressa pela área do marcador.

A utilidade dessa síntese visual é documentada em sistemas produtivos, territoriais, energéticos, agropecuários e de restauração ecológica, conforme a Tabela 2. Em comum, essas aplicações articulam composição *R*, *N* e *F*, magnitude de Y e referências interpretativas, como as curvas de ESI. O diagrama não substitui os indicadores nem a análise do inventário; ele integra essas informações em um espaço comparativo que favorece a identificação de padrões e trajetórias.

Agostinho e Pereira (2013) destacam que a força conceitual da metodologia não elimina dificuldades de comunicação para públicos que não executam diretamente os cálculos. O uso do diagrama como instrumento de síntese e interface analítica é fundamentado por Giannetti, Barrella e Almeida (2006) e Almeida, Barrella e Giannetti (2007), que condicionam essa função

à explicação cuidadosa de cada linha; o *TRIGES* operacionaliza essa proposta em arquitetura *web* integrada, sem avaliação empírica da efetividade comunicacional junto a usuários finais.

Tabela 2 - Aplicações do diagrama ternário em emergia em múltiplos domínios

Domínio de aplicação	**Referência**	**Contribuição analítica documentada**
Formalização metodológica	Giannetti, Barrella e Almeida (2006)	Dez sistemas comparados; linhas de recurso, sustentabilidade e sensibilidade; SI = 1 e SI = 5 (correspondente ao ESI desta tese) como limiares explícitos; ponto simérgico (composição em emergia agregada).
Sistemas agrícolas reais, sudoeste da Austrália	Almeida, Barrella e Giannetti (2007); dados originais de Lefroy e Rydberg (2003)	Reaplicação, como um dos exemplos do artigo, dos três sistemas agrícolas de Lefroy e Rydberg (2003), tremoço/trigo, tagasaste e cultivo em ruelas, no espaço ternário *R*, *N* e *F*, com dados empíricos publicados de fluxos ambientais e econômicos reais, o que demonstra a aplicação do diagrama a dados empíricos de sistemas agrícolas durante o processo de consolidação da ferramenta computacional em Excel/VBA.
Sustentabilidade nacional no Mercosul	Giannetti *et al*. (2010)	Quatro países posicionados no espaço *R*, *N* e *F* trajetória do bloco em direção a regiões de maior sustentabilidade; marcadores proporcionais à emergia total.
Produção cafeeira no Cerrado brasileiro	Giannetti *et al*. (2011)	Comparação de cenários com diferentes percentuais de reserva legal; revelação de insustentabilidade não discernível pelos indicadores numéricos isolados.
Restauração ecológica de área de subsidência por mineração de carvão, China	Sun, J. *et al*. (2019)	Comparação de dois sistemas *swamp dike-pond* e um sistema convencional de piscicultura mediante composição *R*, *N* e *F*; aplicação do ternário a sistemas reais de restauração ecológica. Os autores desagregam recursos adquiridos em frações renovável e não renovável (FR e FN) para os indicadores calculados, mas, ao construir o diagrama ternário, retomam explicitamente as três categorias agregadas *R*, *N* e *F* e informam não considerar o fator de renovabilidade nessa representação.
Produção animal - frangos, Brasil	Nacimento *et al*. (2022)	Comparação entre sistemas orgânico e convencional; uso conjunto de ESI e %R como apoio à interpretação, condicionado às fronteiras e aos dados do estudo.
Cadeia produtiva industrial da construção civil, China	Zhao *et al*. (2024)	ELR > 10 em sete regiões; linhas de sensibilidade para orientar política de redução de insumos não renováveis; trajetórias comparativas entre regiões.

Produção industrial de biohidrogênio, China	Ma *et al*. (2013)	Representação da estrutura de entradas emergéticas do processo no espaço *R*, *N* e *F*; utilização de R%, N% e F% para caracterizar configurações da tecnologia de produção de biohidrogênio e relacionar a composição das entradas à avaliação do processo.
Sistema agroenergético integrado com biogás, China	Chen e Chen (2012)	Aplicação regional do *Emergetic Ternary Diagram* (EmTD) a um sistema agroenergético (BLAS) e a quatro subsistemas, plantio, criação animal, aquicultura e biogás; comparação da condição corrente com cinco cenários hipotéticos de política e tecnologia, com o emprego de agregação de subsistemas, de linha geométrica de sensibilidade, de equivalência de recursos e zonas de sustentabilidade.
Avaliação territorial regional, Pan-Pearl River Delta, China	Li *et al*. (2014)	Nove sistemas provinciais e o agregado regional (dez composições no total); linhas de recurso, sustentabilidade e sensibilidade; ponto simérgico calculado como composição ponderada por Y, não como média aritmética dos percentuais provinciais; combinação com mapeamento por sistema de informação geográfica (GIS) para densidade e distribuição espacial da emergia, dimensão não implementada no *TRIGES* avaliado nesta tese.

Fonte: Autor (2026).

Essa evidência histórica, já discutida a partir de Ortega *et al*. (2005) (Seção 2.3), tem contraponto recente em Sun, J. *et al*. (2019). Os autores desagregam parte dos recursos adquiridos em frações renováveis e não renováveis (FR e FN) nos indicadores, mas, ao construir o diagrama ternário para comparar alternativas de restauração de áreas de subsidência mineral no norte da China, retomam as três categorias agregadas *R*, *N* e *F* e declaram não considerar o fator de renovabilidade nessa representação. Enquanto Ortega *et al*. (2005) demonstram que a desagregação de renovabilidade antecede cerca de duas décadas a atualização de Agostinho *et al*. (2025), Sun, J. *et al*. (2019) demonstram que a representação ternária pode permanecer construída sobre a composição agregada *R*, *N* e *F*, mesmo quando os indicadores empregam tratamentos de renovabilidade parcial. A opção metodológica desta tese pelo modo *Traditional* deve, portanto, ser entendida como delimitação do artefato avaliado e não como desconhecimento das variantes de renovabilidade parcial discutidas na literatura.

Além da comparação entre sistemas distintos, a composição ternária pode representar configurações alternativas de um mesmo processo, como discutido por Ma *et al*. (2013) para a produção de biohidrogênio, ou alternativas construídas por cenário e sistemas hierárquicos compostos por subsistemas. Chen e Chen (2012) aplicaram o *Emergetic Ternary Diagram*, fundamentado em Giannetti, Barrella e Almeida (2006) e Almeida, Barrella e Giannetti (2007), a um sistema agroenergético chinês (BLAS) e seus quatro subsistemas que comparam a condição corrente com cinco cenários hipotéticos de política e tecnologia. Os autores representam a composição agregada dos subsistemas por um *simergic point* coincidente com a posição do sistema como um todo, *com a* aplicação hierárquica da propriedade de composição agregada a um sistema real multissubsistema.

Indicadores emergéticos também aparecem em análises prospectivas sem diagrama ternário: Wu, Fan e Lu (2021) acoplaram a contabilidade em emergia a um modelo de *System Dynamics* no setor de transportes de Qinghai, China, usando EYR, ELR e ESI como variáveis de saída de um modelo temporal com realimentação e cenários prospectivos, distinto da comparação pontual de Chen e Chen (2012). Essa abordagem não corresponde à funcionalidade do *TRIGES*, mas constitui precedente relevante para futuras extensões de persistência de estados sucessivos e simulação dinâmica.

Do ponto de vista histórico, a evolução computacional do diagrama ternário em emergia pode ser organizada em cinco marcos, apresentados na Tabela 3: a ferramenta original de Barrella (2004), a formalização internacional de 2006, as aplicações consolidadas em 2007, a experiência de simulação em MATLAB/Simulink de 2011 e a atualização da ferramenta Excel/VBA publicada em 2025. A trajetória demonstra maturidade metodológica do diagrama, ao mesmo tempo que evidencia limitações persistentes relacionadas à execução local, à gestão manual de UEVs e ao compartilhamento de estudos. Essa evolução não é estritamente linear: a experiência de 2011 constitui uma ramificação computacional distinta da linhagem de formalização e aplicação do diagrama (2006-2025), na qual o próprio Barrella reutiliza o diagrama ternário desenvolvido em seu trabalho de 2004 como espaço de visualização de um modelo dinâmico mais amplo, dedicado à simulação da geração elétrica brasileira.

Tabela 3 - Evolução histórica das ferramentas computacionais para o diagrama ternário em emergia

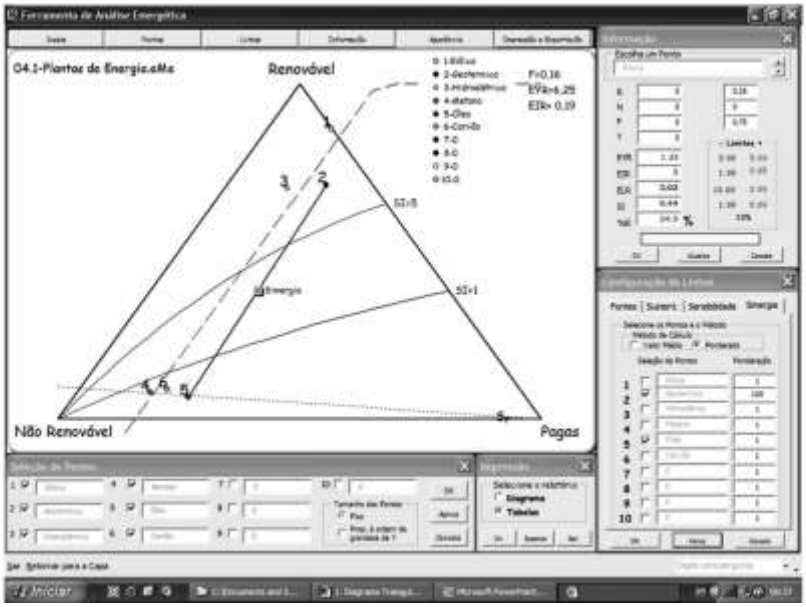
Ano	Referência	Ambiente/tecnologia	Características e limitações relevantes
2004	Barrella (2004), dissertação de mestrado, UNIP	Microsoft Excel® / VBA	Primeira ferramenta para diagrama ternário em emergia; geometria equilátera, posicionamento por coordenadas ternárias; operação local, sem banco de UEVs e sem multiusuário.
2006	Giannetti, Barrella e Almeida (2006), Journal of Cleaner Production	Microsoft Excel® / VBA	Formalização e expansão: até 10 sistemas e 50 itens por sistema; linhas de recursos, sustentabilidade, sensibilidade e composição agregada; publicação internacional do método; operação local e dependência de licença *Microsoft Office*.
2007	Almeida, Barrella e Giannetti (2007), Journal of Cleaner Production	Microsoft Excel® / VBA	Cinco exemplos em geração de eletricidade, sistemas agrícolas e desenvolvimento econômico/territorial (Itália, EUA, Taiwan e Austrália), com análises comparativas e temporais; demonstração aplicada das propriedades analíticas do diagrama.
2011	Barrella (2011), tese de doutorado, IPEN/USP	MATLAB®/Simulink® + Excel® (exportações e gráficos)	Modelo dinâmico da geração elétrica brasileira a partir da matriz 27×47 do BEN, com a incorporação do diagrama ternário de Barrella (2004) como espaço de visualização; implementação avaliada configurada para seis fontes energéticas, com matriz de influência e perturbações individuais e combinadas; cálculo temporal de EYR, ELR e ESI e representação do percurso emergético como trajetória de estados sucessivos no ternário; ambiente desktop; não se documenta biblioteca estruturada de UEVs com metadados e rastreabilidade integrada.
2025	Agostinho *et al*. (2025), Journal of Cleaner Production	Microsoft Excel® / VBA (atualização)	Atualização da ferramenta Excel/VBA com preservação explícita do modo *Traditional* (*R*, *N* e *F*, clássico) e incorporação, na ferramenta, de uma alternativa de cálculo baseada em renovabilidade parcial (formulação com antecedentes anteriores na literatura); reconhecimento formal da ausência de repositório de UEVs; proposta do

	Emergyinvent; operação ainda restrita ao ambiente Excel/VBA.

Fonte: Barrella (2004, 2011), Giannetti, Barrella e Almeida (2006), Almeida, Barrella e Giannetti (2007) e Agostinho et al. (2025).

A Figura 2 reproduz a interface real da ferramenta Excel/VBA descrita por Giannetti, Barrella e Almeida (2006), documenta visualmente o artefato computacional predecessor desta linhagem: o triângulo R, *N* e *F*, os pontos que representam os dez sistemas hipotéticos discutidos pelos autores, as linhas de sustentabilidade SI = 1 e SI = 5, o ponto simérgico (rotulado *Simergia* na interface original) e os painéis de configuração de pontos e linhas.

Figura 2 - Interface da ferramenta Excel/VBA para cálculo e representação do diagrama ternário em emergia, com pontos, linhas de sustentabilidade (SI = 1 e SI = 5) e ponto simérgico.



Fonte: Giannetti, Barrella e Almeida (2006, p. 206).

A trajetória sintetizada na Tabela 3 evidencia a consolidação metodológica do diagrama e sua ampliação para aplicações empíricas, temporais e variantes de renovabilidade. O *TRIGES* insere-se nessa linhagem ao transferir a síntese *Traditional* para uma arquitetura *web* integrada, sem reproduzir o motor dinâmico de Barrella (2011) nem a renovabilidade parcial incorporada por Agostinho *et al*. (2025).

Uma reclassificação decorrente de mudança legítima de fronteira pode deslocar um sistema no espaço ternário, pois as coordenadas dependem diretamente de *R*, *N* e *F*. Essa conclusão combina as relações geométricas da equação (9) com os efeitos de fronteira discutidos por Morandi *et al*. (2015) e constitui inferência desta tese. Assim, proximidade geométrica não certifica comparabilidade: baseline, categorias, fronteira, período e regras de classificação devem ser compatíveis antes da interpretação conjunta dos pontos.

2.5 Ferramentas computacionais existentes para emergia: delimitação da lacuna

A literatura apresenta sete classes de solução: ferramentas ternárias em planilhas; aplicações *web* de síntese; modelos dinâmicos; integração com GIS; integração com ACV e bases processuais; algoritmos de propagação em grafos; bibliotecas ou infraestruturas de UEVs. A comparação não estabelece hierarquia geral, pois essas classes resolvem problemas distintos. O exame considera problema, entrada, tratamento dos UEVs, coprodutos e retroalimentações, saída, ambiente e evidência publicada, o que distingue a síntese tabular *R*, *N* e *F* das implementações que calculam emergia em redes. A revisão é crítica e narrativa, não sistemática: o *corpus* reúne publicações e ferramentas identificadas na literatura de contabilidade em emergia examinada nesta tese que operacionalizam computacionalmente o inventário *R*, *N* e *F*, a gestão de UEVs ou a síntese ternária, sem pretensão de exaustividade sobre todo o campo de software científico. Afirmações de ausência de uma característica são, portanto, circunscritas a esse conjunto e não à literatura em sentido amplo.

No primeiro grupo, a implementação Excel/VBA, descrita por Giannetti, Barrella e Almeida (2006) e atualizada por Agostinho *et al*. (2025), consolidou o uso computacional do diagrama ternário. Suas principais virtudes são a transparência das fórmulas, a adaptação a diferentes estudos e a familiaridade do ambiente de planilhas para a comunidade acadêmica.

As limitações decorrem sobretudo do paradigma tecnológico: execução local, dependência do *Microsoft Office*, ausência de autenticação individual, gestão manual de UEVs e compartilhamento baseado em arquivos. A planilha não dispõe nativamente de banco relacional, API, isolamento de dados por usuário ou histórico automático dos estudos. Essas limitações não diminuem a contribuição original da ferramenta; indicam apenas que requisitos atuais de rastreabilidade e interoperabilidade demandam outra arquitetura.

Kamiya (2005) desenvolveu uma aplicação *web* para análise em emergia de sistemas agrícolas, com arquitetura em três camadas, banco *MySQL*, *servlets Java*, autenticação, cadastro de propriedades, recursos e produtos. A comparação com propriedades previamente avaliadas apresentou convergência geral e uma divergência atribuída à limitação de representação de biomassa. O autor também reconheceu que a ausência inicial de levantamento formal de requisitos e de modelagem orientada a objetos dificultou a evolução do código. O trabalho constitui antecedente direto da informatização *web* da síntese em emergia e impede atribuir ao *TRIGES* novidade baseada apenas em acesso *web*, autenticação ou persistência relacional.

Posteriormente, Takahashi (2007), em dissertação também orientada por Ortega na Unicamp, adotou abordagem distinta para o mesmo problema. O autor desenvolveu, em três etapas, documentos *XML* para representar sistemas agrícolas da Flórida e do Brasil, um aplicativo Java para editar esses arquivos e, por fim, páginas *web* dinâmicas em *JSP* e *Struts*, com persistência em banco de dados *MySQL*. O ambiente permitia cadastro e autenticação de usuários, seleção de sistemas, alteração dos recursos utilizados, gravação, recuperação, edição e exclusão de análises, com estrutura de agregação $I = R + N, F = M + S$ e $Y = I + F$ equivalente à síntese *Traditional* adotada nesta tese. A literatura examinada por Takahashi (2007) reconhece Kamiya (2005) como antecedente de aplicação *web* para diagnóstico emergético, o que situa os dois trabalhos em uma mesma linhagem de informatização, sem que o segundo constitua continuidade direta de código ou de arquitetura do primeiro.

Kamiya (2005) e Takahashi (2007) afastam qualquer alegação de novidade isolada para acesso *web*, autenticação, banco relacional, persistência de análises, armazenamento de coeficientes de transformidade/UEV ou múltiplos produtos. Nas versões documentadas, contudo, não foi identificada uma entidade independente de UEVs, no sentido de registros reutilizáveis com proveniência bibliográfica, baseline, alternativas associáveis a múltiplos inventários e à preservação do valor empregado por inventário, sem integração com o diagrama ternário. Em Kamiya, a transformidade aparece como atributo do recurso; em Takahashi, os coeficientes permanecem associados à representação de cada sistema. Essa formulação indica ausência de evidência nas fontes examinadas, não inexistência comprovada. A heterogeneidade encontrada por Takahashi nos sistemas brasileiros também evidencia o custo de modelos com colunas rígidas por categoria. O TRIGES posiciona sua contribuição na articulação entre

governança operacional de UEVs, inventário repetível, derivações e protocolo de avaliação e não na reinvenção das capacidades já demonstradas pelos antecedentes.

A comparação com esses antecedentes exige ainda distinguir presença de funcionalidade, forma de implementação e de evidência de avaliação. Uma aplicação pode possuir autenticação ou persistência e, mesmo assim, não registrar proveniência do coeficiente; pode armazenar transformidades e não preservar o valor efetivamente empregado por estudo, ou pode apresentar múltiplos produtos sem formalizar a regra de atribuição de emergia. Por isso, as células da Tabela 4 utilizam *não*, identificado na documentação examinada quando a fonte não permite concluir. Essa escolha protege a análise contra dois erros opostos: declarar inexistente aquilo que apenas não foi descrito e atribuir equivalência entre recursos que possuem o mesmo nome, mas executam funções metodológicas diferentes.

A Tabela 4 sintetiza essa comparação, célula a célula, entre os dois antecedentes brasileiros e a plataforma desenvolvida nesta tese. As células marcadas como "não identificado na documentação examinada" indicam ausência de evidência na fonte primária consultada e não ausência confirmada do recurso.

Tabela 4 - Antecedentes brasileiros de informatização da contabilidade em emergia e posicionamento funcional do *TRIGES*

Aspecto	**Kamiya (2005)**	**Takahashi (2007)**	***TRIGES***
Ambiente de execução	Web (applet Java integrado à página HTML)	Web (JSP/Struts) e aplicativo Java auxiliar para edição de XML	Web (SPA em React/TypeScript)
Arquitetura	Três camadas: dados (MySQL), negócio (servlets Java), apresentação (applet Java)	Documentos XML/XSLT processados em Java; páginas web dinâmicas em JSP/Struts	SPA + API REST (Node.js/Express) + banco relacional
Banco de dados	MySQL relacional	MySQL relacional	MySQL 8 relacional, via Prisma ORM
Autenticação	Sim; usuários autorizados e administradores, login por e-mail/senha	Sim; cadastro e autenticação de usuários	Sim; autenticação individual por credenciais ou OAuth (Google/GitHub), JWT stateless
Persistência das análises	Sim; análises gravadas no banco de dados relacional	Sim; gravação, recuperação, edição e exclusão de análises	Sim; estudos, subsistemas e fluxos persistidos relacionalmente
Representação do sistema/inventário	Propriedade com produtos e recursos associados a cada análise	Sistema agrícola representado em documento XML por análise	Study/Chart/Point/Flow como entidades relacionadas e reutilizáveis
Cadastro de recursos	Sim; administrador cadastra recursos no banco de dados	Sim; recursos representados nas estruturas XML do sistema	Sim; recursos vinculados a UEVs da biblioteca

Armazenamento de transformidade/UEV	Sim; atributo do recurso cadastrado (contribuição, unidade, transformidade, tipo, equação, parâmetro)	Sim; coeficiente incorporado à representação XML de cada sistema	Sim; UEV tratado como entidade independente na biblioteca
Metadados bibliográficos do UEV	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; referência bibliográfica associada ao UEV
Baseline associada ao UEV	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; baseline registrada no UEV
Registros alternativos de UEV	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; comparação entre registros alternativos do mesmo recurso
Preservação do UEV efetivamente empregado	Não identificado na documentação examinada	Coeficientes apresentados na representação da análise; não identificada, na documentação examinada, a preservação histórica do valor utilizado por inventário	Sim; valor do UEV preservado no Flow no momento do cálculo
Comparação entre UEVs	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; comparação entre registros bibliográficos de UEV (RF14)
Comparação entre baselines	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; comparação entre baselines emergéticas globais (RF14)
Múltiplos produtos/saídas	Sim; produtos vegetais, animais, serviços e outros, modelados por classes específicas	Não identificado na documentação examinada	Sim; múltiplas saídas (Outputs) declaradas por Point, como entidade persistente
Derivação do UEV da saída	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; UEV de saída derivado automaticamente de Y consolidado (RF15)
Relatórios/exportação	Sim; relatórios de análise emergética por propriedade	Não identificado na documentação examinada	Sim; exportação e importação estruturada de estudos em JSON
Diagrama ternário	Não	Não	Sim; diagrama ternário interativo com múltiplas camadas analíticas
Comparação determinística de registros de UEV	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; comparação determinística de registros alternativos de UEV e baseline (RF14)
Comparação com dados publicados	Sim; comparação com três propriedades avaliadas por Agostinho (2005)	Não identificado na documentação examinada	Sim; sete estudos de caso publicados (EC1–EC7)
Critérios explícitos de aceitação numérica	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; critérios de aceitação definidos por requisito e por estudo de caso
Verificação geométrica do ternário	Não aplicável (sem diagrama ternário)	Não aplicável (sem diagrama ternário)	Sim
Processo formal de requisitos	Não; ausência reconhecida pelo	Não identificado na documentação examinada	Sim; RF01–RF10, RF12–RF15 e requisitos não

	próprio autor (Seção 5.3)		funcionais especificados previamente
Rastreabilidade requisito → implementação → evidência	Não identificado na documentação examinada	Não identificado na documentação examinada	Sim; cada requisito vinculado a critério de aceitação e de evidência de verificação

Fonte: elaborado pelo autor com base em Kamiya (2005) e Takahashi (2007).

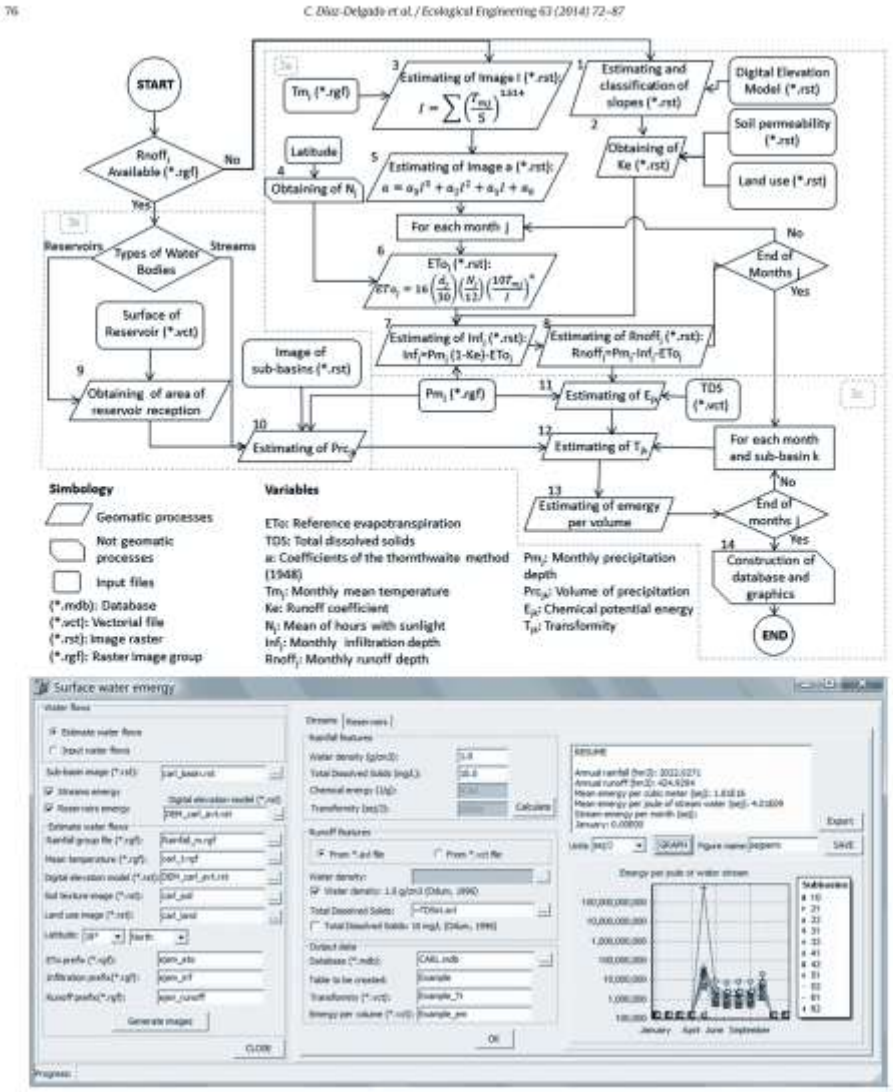
Um precedente distinto de integração computacional foi apresentado por Ingwersen (2011), que implementou emergia como indicador em um modelo processual de ACV utilizando o software SimaPro 7.1 e dados de inventário do Ecoinvent. Essa implementação demonstra que a operacionalização computacional da emergia não se restringiu historicamente às ferramentas específicas de diagrama ternário. Seu propósito, entretanto, difere do *TRIGES*: tratava-se da incorporação da emergia em uma infraestrutura de ACV que exige adaptações de fronteira, alocação e representação dos UEVs e não adaptações de uma plataforma dedicada à síntese clássica *R*, *N* e *F* integrada à biblioteca de UEVs, a indicadores e a diagrama ternário.

Modelos dinâmicos constituem outra classe. Lei e Wang (2008) associaram séries emergéticas e regressões a um modelo STELLA para explorar a evolução temporal de Macao, *com a representação de* trajetórias socioeconômicas, sem substituir a síntese tabular. Tilley e Brown (2006) foram além: desenvolveram no ambiente *Extend*® um modelo eco-hidrológico baseado em blocos da *Energy Systems Language*, capazes de executar matematicamente relações de energia, emergia, estoques e transformidades ao longo do tempo (*Dynamic Emergy Accounting*): o próprio diagrama sistêmico operava como estrutura executável de simulação, validada contra três anos de dados hidrológicos históricos, com divergências explicitamente discutidas pelos autores. Ambos os casos demonstram que indicadores de emergia também funcionam como variáveis de estado em modelos temporais e que a validação de software científico em emergia exige confronto com referências independentes, não apenas execução sem erros.

A Figura 3 documenta a classe de integração com GIS. Díaz-Delgado *et al*. (2014) desenvolveram módulos no *Idrisi* para estimar espacial e temporalmente a emergia de águas superficiais e subterrâneas; para isto, combinaram precipitação, escoamento, infiltração, energia química e níveis piezométricos. O objetivo era produzir resultados geograficamente distribuídos e apoiar a gestão hídrica, não oferecer uma plataforma generalista de síntese

tabular. O precedente confirma que a lacuna desta tese não decorre da inexistência de software em emergia, mas da insuficiente integração e avaliação da cadeia específica investigada.

Figura 3 – Fluxograma e interface real do módulo GIS para estimativa espaço-temporal da emergia de água superficial



Fonte: Díaz-Delgado et al. (2014, p. 76).

Uma vertente distinta enfrentou não a propagação de emergia em redes, mas a indisponibilidade de UEVs para produtos e serviços econômicos. Baral e Bakshi (2010) utilizaram um modelo econômico *input–output* termodinamicamente ampliado da economia norte-americana (software *Eco-LCA*) para obter quocientes emergia/moeda para centenas de

setores econômicos. Os próprios autores reconhecem que o tratamento de retroalimentações segue a lógica de embodied energy e viola a álgebra emergética estrita, perseguida pelo *SCALE*, discutido a seguir. A relação de Baral e de Bakshi (2010) com o *TRIGES* é de antecedente de um problema correlato, a governança de UEVs (Seção 2.6) e não de precedente arquitetural: o *TRIGES* não deriva UEVs a partir de modelos *input–output*; recebe-os como dados previamente definidos pelo analista.

Em um segundo grupo, *SCALE*, o algoritmo *MATLAB* de Nimmanterdwong *et al*. (2018) e a formulação axiomática de Le Corre e Truffet (2012; 2015) tratam da propagação da emergia em grafos de processos. Essas abordagens calculam emergia e apoiam a derivação de UEVs em redes com divisões, coprodutos e retroalimentações, o que resolve um problema distinto da síntese tabular que parte de UEVs previamente calculados.

SCALE foi desenvolvido por Marvuglia *et al*. (2013) em C++ e Qt para aplicar regras da álgebra em emergia a redes processuais de inventários de ciclo de vida. O algoritmo representa a rede como grafo orientado, percorre caminhos por busca em profundidade e registra os nós visitados para evitar contagem indevida em ciclos; o parâmetro *minflow* interrompe ramos de contribuição inferior ao limiar definido e explicita o compromisso entre cobertura e tempo de execução (testado em matrizes de mais de 2.000 processos, com emergia não contabilizada próxima de 3%, sem ser limiar universal). Arbault *et al*. (2014a) mostraram que maior resolução da tecnosfera pode melhorar documentação e completude, mas os resultados permanecem condicionados à cobertura da base processual. *SCALE* atua a montante, reconstruindo contribuições emergéticas e apoiando a derivação de UEVs; o *TRIGES* parte de UEVs já selecionados para organizar inventário, indicadores e representação ternária.

Lyu *et al*. (2021) deram continuidade a essa linha; recuperaram inventários não alocados do *ecoinvent* para recalcular UEVs de produtos químicos agrícolas segundo as regras da álgebra em emergia. Esse procedimento resolve um problema a montante do escopo do *TRIGES*, que permanece restrito ao uso de UEVs já selecionados, não à sua derivação a partir de inventários processuais.

Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018) desenvolveram um algoritmo em MATLAB, baseado em enumeração e em rastreamento de caminhos, capaz de tratar divisões, coprodutos e retroalimentações. O trabalho contribui para a solução

computacional de redes complexas, mas permanece no domínio da álgebra de grafos e em ambiente *desktop*, sem biblioteca de UEVs, sem autenticação *web* ou *sem* diagrama ternário.

Le Corre e Truffet (2012) formularam axiomaticamente as regras da álgebra em emergia por caminhos: soma para fluxos independentes ou divisões, máximo quando caminhos de um mesmo coproduto voltam a se reunir e multiplicação para propagar frações ao longo do percurso. A lógica de memória difere de um balanço conservativo: coprodutos podem carregar o trabalho comum integral, mas esse trabalho não pode ser somado novamente quando os caminhos se reencontram. O algoritmo de 2012 pressupunha caminhos conhecidos. Le Corre e Truffet (2015) complementaram a abordagem ao converter o diagrama de sistemas de energia em grafo, construir a matriz de adjacência e enumerar caminhos válidos antes do cálculo recursivo. Essa formalização torna inequívoca a escolha das regras em redes complexas; não é executada pelo *TRIGES*, que recebe os UEVs de entrada como dados previamente definidos.

A abordagem tabular foi adotada por três razões: corresponde ao corpo predominante da literatura aplicada; é preservada no modo *Traditional* de Agostinho *et al*. (2025) e permite investigar a gestão de UEVs como problema de rastreabilidade e governança. Nessa camada, a complexidade algébrica anterior está incorporada nos UEVs e nas decisões de inventário.

As abordagens são complementares. A álgebra de grafos propaga emergia e trata caminhos interconectados; a síntese tabular agrega fluxos já associados a UEVs para obter *R*, *N*, *F*, indicadores e representação ternária. O *TRIGES* pertence ao segundo grupo e pressupõe modelo e inventário metodologicamente consistentes. A derivação de UEV de saída pela equação (3c) opera sobre Y já consolidado e não equivale à propagação em rede realizada por *SCALE* ou pelos algoritmos de Le Corre e Truffet e de Nimmanterdwong *et al*.

A Tabela 5 aplica essas mesmas dimensões de forma simétrica às ferramentas examinadas. Quando uma propriedade não pôde ser confirmada, utiliza-se a expressão *não documentado* nas publicações examinadas, o que evita transformar ausência de informação em prova de inexistência.

As classes comparadas também não constituem alternativas substituíveis, dado que resolvem problemas de entrada e propósito distintos, já caracterizados no início desta seção. Uma avaliação simétrica pergunta se cada ferramenta resolve o problema que declara resolver e qual evidência sustenta esse desempenho. A lacuna da tese emerge da articulação entre

problemas compatíveis, não os de uma pontuação geral em que uma plataforma deveria superar todas as demais classes.

Tabela 5 – Comparação entre ferramentas computacionais segundo problema, entrada, tratamento metodológico e evidências publicadas

Dimensão comparativa	**Excel / VBA**	**SCALE**	**MATLAB (Nimmanterdwong *et al.*)**	***TRIGES***
Problema metodológico resolvido	Síntese tabular *R*, *N* e *F* e representação ternária.	Cálculo de emergia em redes extensas de inventário de ciclo de vida.	Cálculo de caminhos emergéticos em redes com divisões, coprodutos e retroalimentações.	Síntese tabular *R*, *N* e *F* integrada à biblioteca de UEVs, indicadores e diagrama web.
Tipo de entrada	Tabela de fluxos e UEVs selecionados pelo analista.	Matriz de processos de LCI/Ecoinvent e valores de recursos naturais.	Grafo ou matriz de processos e fluxos interconectados.	Inventário de Flows classificados em R, N ou *F* e associados a UEVs previamente calculados.
Relação com UEVs	Utiliza UEVs; não os deriva automaticamente em redes.	Propaga emergia em redes e calcula resultados emergéticos para produtos/processos.	Calcula emergia por caminhos e pode apoiar a derivação de valores de saída.	Consulta, registra e utiliza UEVs de entrada; preserva o valor empregado, mas não os calcula por propagação em redes. Deriva o UEV de saídas declaradas pelo analista a partir de Y (UEVout = Y/Q), sem propagação em redes.
Coprodutos, divisões e retroalimentações	Tratamento depende da modelagem manual do analista.	Tratamento algorítmico conforme regras da álgebra em emergia, por busca em profundidade (depth-first search) e variante do algoritmo track-summing.	Tratamento por enumeração e rastreamento de caminhos.	Não identifica nem trata automaticamente; responsabilidade do analista na construção do inventário.
Saídas principais	*R*, *N*, *F*, indicadores e diagrama ternário.	Emergia associada a produtos e a processos em redes LCI.	Emergia por caminhos, nós e saídas de redes complexas.	*R*, *N*, *F*, *Y*, indicadores, diagrama ternário e exportação estruturada.
Suporte à incerteza	Não documentado nas publicações examinadas.	Operação determinística; propagação probabilística não documentada nas	Operação determinística; propagação probabilística não documentada nas	Valores pontuais; não implementa propagação de incerteza nem intervalos de confiança.

		publicações examinadas.	publicações examinadas.	
Reprodutibilidade e rastreabilidade	Fórmulas inspecionáveis e arquivos compartilháveis; metadados de UEV dependem do preenchimento manual.	Algoritmo e estudos de caso publicados; resultados dependem da versão da base LCI e dos dados de entrada.	Procedimento algorítmico e estudos de caso publicados; disponibilidade integral do código não documentada nas publicações examinadas.	JSON versionado para estudos, vínculo com UEV e preservação do valor numérico; sem versionamento bibliográfico completo do UEV.
Disponibilidade e dependências	Arquivo Excel/VBA e licença Microsoft Office.	Apresentado como software open-source em ambiente desktop; disponibilidade atual não verificada nesta pesquisa.	Requer MATLAB; código-fonte completo não documentado nas publicações examinadas.	Aplicação web com backend e banco de dados; disponibilidade operacional descrita nesta tese.
Evidência de avaliação documentada	Exemplos metodológicos e aplicações publicados em 2006, 2007 e 2025.	Dois casos no artigo original e avaliação comparativa posterior em plantas de tratamento de água.	Três estudos de caso, que incluem redes complexas e simbiose industrial.	Verificação funcional, comparação numérica com sete estudos e verificação geométrica apresentadas nesta tese.
Ambiente de execução	Desktop local.	Desktop local.	Desktop local.	Navegador web com serviços de backend e banco relacional.
Limitação central no recorte desta tese	Execução local, compartilhamento por arquivos e ausência de biblioteca integrada de UEVs.	Não foi concebido para indicadores clássicos e diagrama ternário; recursos locais, trabalho e serviços podem exigir complementação.	Foco algorítmico em redes; não integra biblioteca, gestão de estudos e visualização ternária.	Depende de inventário correto e UEVs predefinidos; não executa álgebra de redes nem análise de incerteza.

Fonte: elaborado pelo autor com base em Giannetti, Barrella e Almeida (2006), Almeida, Barrella e Giannetti (2007), Marvuglia *et al*. (2013), Arbault *et al*. (2014a), Le Corre e Truffet (2012; 2015), Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018) e Agostinho *et al*. (2025).

A lacuna não é a inexistência de algoritmos, planilhas ou aplicações web, nem a simples ausência de uma ferramenta com a mesma lista de funcionalidades. No conjunto de fontes examinado, permanece insuficientemente formalizada e avaliada a cadeia que liga seleção e proveniência do UEV, inventário persistente, regras derivativas centralizadas, indicadores e representação ternária, acompanhada de um protocolo capaz de distinguir erro computacional, arredondamento, limitação da fonte e incompatibilidade metodológica. Essa formulação desloca a contribuição de uma integração promocional de recursos para um problema de

conhecimento: quais condições de dados e arquitetura mantêm a cadeia auditável, e quais evidências permitem avaliar sua execução sem confundir precisão numérica e validade metodológica? O *TRIGES* investiga esse recorte por princípios de projeto e evidências funcionais, numéricas e geométricas. A generalização limita-se às condições avaliadas e não inclui propagação em grafos, tratamento automático de coprodutos ou incerteza probabilística.

Como o levantamento possui caráter crítico e narrativo, a ausência de integração é apresentada como resultado do *corpus* examinado, não como prova exaustiva sobre todo o software existente. Trabalhos acadêmicos, artigos e documentação técnica possuem níveis diferentes de detalhamento, e sistemas descontinuados podem ter implementado funções não registradas nas fontes disponíveis. Essa limitação não elimina a lacuna investigada; restringe seu alcance e desloca a avaliação para a combinação efetivamente documentada e testada nesta tese. A contribuição deve ser sustentada pelas propriedades, pelas evidências do artefato e não pela impossibilidade de localizar um concorrente idêntico.

2.6 Gestão de UEVs

A primeira camada da governança de UEVs é a heterogeneidade contextual. Baral e Bakshi (2010) mostraram que quocientes de emergia/moeda específicos por setor podem divergir expressivamente de uma média nacional, o que evidencia a limitação de tratar toda a economia como homogênea. Mostraram ainda que o tratamento de coprodutos altera os coeficientes derivados. Esses resultados não são incorporados ao *TRIGES* como método de geração automática; eles demonstram que um UEV não deve ser reduzido a um número isolado; método, unidade, fonte, fronteira e contexto condicionam sua adequação. A biblioteca da plataforma atua em problema complementar; preserva o coeficiente selecionado pelo analista e os metadados disponíveis para examiná-lo, sem decidir qual valor é cientificamente superior.

Dois termos são empregados de forma recorrente nesta seção e devem ser fixados desde já. A expressão biblioteca de UEVs designa, nesta tese, um conjunto persistente de registros reutilizáveis de UEVs, associados a unidade, a referência, a baseline e a demais metadados disponíveis, e não a um simples catálogo de coeficientes avulsos. Proveniência operacional designa o vínculo entre o fluxo, o identificador do UEV selecionado, o valor numérico efetivamente empregado e os metadados disponíveis no registro corrente da biblioteca, sem

implicar versionamento histórico integral, nem preservação retrospectiva de unidade, referência ou baseline anteriores à atualização do registro.

A dependência contextual dos UEVs também se manifesta em fluxos socioeconômicos, e não apenas em coeficientes de recursos naturais ou industriais. Bonilla *et al*. (2010), ao avaliarem a influência do trabalho humano em uma plantação de bambu gigante no Brasil, aplicaram o mesmo procedimento de cálculo a três contextos nacionais: Brasil, Austrália e China, e obtiveram transformidades de trabalho substancialmente distintas ($1{,}15 \times 10^7$; $7{,}03 \times 10^7$; e $2{,}79 \times 10^6$ sej/J, respectivamente). A substituição desse único coeficiente, mantendo constante o restante do inventário, alterou a emergia adquirida F, os quatro indicadores derivados e a posição dos três sistemas no diagrama ternário. O exemplo evidencia que a escolha de um UEV pode constituir decisão metodológica material para o resultado de uma avaliação e não uma escolha meramente formal, o que reforça a exigência de registrar valor, referência, baseline e contexto de aplicação do coeficiente utilizado.

Os UEVs encontram-se dispersos em livros, fólios, artigos e tabelas suplementares, o que dificulta identificar qual valor foi utilizado e sua compatibilidade com o fluxo analisado: Arbault *et al*. (2014a), por exemplo, compararam valores para cal e calcita que diferiam por um fator de 5, 6. Já Zhang *et al*. (2015), Lou *et al*. (2015) e Zhao *et al*. (2024) mobilizaram conjuntos heterogêneos de referências e baselines em estudos aplicados. O problema não é apenas localizar um número, mas preservar a cadeia de evidências, fato que permite avaliar sua adequação.

Essa heterogeneidade não deve ser confundida automaticamente com erro. Giannetti *et al*. (2019), ao harmonizarem transformidades publicadas ao longo de três décadas para uma baseline comum, identificaram dispersão e *outliers* estatísticos entre grupos de processos e optaram por não os excluir, já que foram obtidos por pesquisadores distintos em contextos diferentes. O resultado reforça a governança adotada nesta tese: preservar proveniência e alternativas bibliográficas, em vez de reduzir valores heterogêneos a um coeficiente presumidamente universal.

A dependência temporal também se manifesta pelo envelhecimento tecnológico. Lyu *et al*. (2021) recalcularam UEVs de produtos químicos agrícolas com inventários do *ecoinvent* adaptados ao contexto chinês e harmonizados à GEB2016 e encontraram diferenças substanciais em relação a valores anteriores e a coeficientes genéricos. Para a ureia, o

coeficiente recalculado ficou entre referências anteriores convertidas à mesma baseline; para o glifosato, um UEV específico diferiu amplamente do coeficiente genérico usado como aproximação. O resultado separa duas fontes de heterogeneidade: ausência de UEV específico, suprida por aproximações de categoria, e defasagem de um coeficiente frente a processos produtivos atualizados. A localização pode representar diferenças estruturais de matriz elétrica, transporte e cadeia produtiva, não apenas um rótulo geográfico. Atualização tecnológica exige novo inventário processual, e isto não se obtém por simples conversão de baseline.

A segunda camada é a compatibilidade de baseline. Harmonizar um UEV para uma referência comum permite comparar sua escala numérica, mas não corrige tecnologia, localização, período, fronteira ou método de derivação. Um coeficiente antigo convertido para a GEB2016 não se torna tecnologicamente atualizado. O *TRIGES* registra valor, unidade, referência e baseline, mas não deriva ou atualiza automaticamente coeficientes a partir de inventários processuais. A conversão proporcional e seus limites são formalizados nas equações (15) e (16).

A harmonização precisa preservar três registros distinguíveis: o valor publicado na baseline de origem, o fator de conversão utilizado e o valor empregado no inventário de destino. Sem essa separação, não é possível reconstruir se uma diferença decorre da fonte, da conversão ou de uma transcrição posterior. A relação proporcional pressupõe que a mudança relevante seja apenas a referência global. Se dois coeficientes diferem também em fronteira ou tecnologia, convertê-los para a mesma baseline os torna dimensionalmente comparáveis, mas não metodologicamente equivalentes. O requisito de auditabilidade é, portanto, mais amplo que a armazenagem de um campo baseline, ele exige preservar o encadeamento entre decisão, transformação e uso.

Essa questão se amplia em Arbault *et al*. (2014a): ao comparar UEVs convencionais com valores recalculados a partir de uma representação mais detalhada da tecnosfera, os autores encontraram diferenças relevantes para diversos insumos e mostraram que valores obtidos em níveis de resolução distintos não devem ser somados, sob risco de viés. A dimensão espacial reforça o problema: os mesmos autores encontraram diferenças relevantes entre um valor genérico de água e UEVs específicos dos locais avaliados, o que justifica registrar localização, escala e método quando metodologicamente relevantes. A versão avaliada do *TRIGES* não possui campos estruturados para contexto geográfico ou nível de resolução; essa limitação é registrada como agenda futura, não como problema resolvido.

A necessidade de resolução geográfica identificada por Arbault *et al*. (2014a) encontra demonstração operacional em Díaz-Delgado *et al*. (2014), que integraram contabilidade em emergia a um GIS (Idrisi) para estimar a emergia de recursos hídricos superficiais e subterrâneos em duas bacias mexicanas. Isto permitiu que se obtivessem diferenças superiores a uma ordem de grandeza entre UEVs de água superficial de bacias distintas ($2{,}79 \times 10^{12}$ e $4{,}58 \times 10^{13}$ sej/m³): a identificação nominal de um recurso, "água", não garante a intercambiabilidade de seus UEVs entre estudos. Fonseca *et al*. (2017), do mesmo grupo, avançaram com a implementação de módulos hidrogeomáticos em Delphi/GIS para a bacia do Alto Rio Lerma, com classificação dinâmica da renovabilidade da água, antecedente tecnológico distinto da linha tabular/algébrica desta seção. As soluções identificadas na literatura examinada apresentam, portanto, escopos específicos, arquiteturas distintas e níveis variáveis de integração, não constituem uma plataforma *web* generalista que reúna, no mesmo ambiente, biblioteca rastreável de UEVs, inventários *Traditional R*, *N* e *F*, indicadores e representação ternária, lacuna que esta tese busca preencher.

Em escala global, Arbault *et al*. (2014c) desenvolveram uma base de UEVs de águas superficiais espacialmente explícita a partir de mapas globais, com mais de quatro milhões de segmentos de rios, com a observação de maior variação do UEV no interior de uma mesma bacia hidrográfica do que entre bacias distintas. A comparação com valores publicados revelou divergências de aproximadamente −8% a mais de +200%, atribuídas à heterogeneidade dos procedimentos de cálculo de cada estudo anterior, o que reforçou que “água” não deve ser tratada como possuidora de um único UEV universal.

Armazenar UEVs, derivá-los computacionalmente e selecionar o coeficiente adequado são problemas distintos. A base espacial de Arbault *et al*. (2014c) gera valores por processamento geográfico; a EmCFdb organiza fatores para fluxos elementares e a biblioteca do *TRIGES* registra valores escolhidos pelo analista e sua aplicação aos estudos. A plataforma concentra-se no armazenamento rastreável e no uso operacional, sem seleção contextual automática.

A fragmentação histórica motivou iniciativas de consolidação. De Vilbiss *et al*. (2024) apresentam a EmCFdb, desenvolvida pela *U. S. Environmental Protection Agency*, biblioteca de 203 fatores emergéticos para fluxos elementares, documentada com planilhas de cálculo, referências e registro de alterações. A iniciativa avança na padronização de fatores elementares, mas não inclui *commodities* refinadas nem bens manufaturados; permanece distinta da função

do *TRIGES* que gerencia o uso de UEVs selecionados pelo analista, integra inventário, indicadores e representação ternária. No vocabulário da EmCFdb, EmCF equivale ao UEV apenas para fluxos elementares; esta tese mantém UEV como termo central, sem generalizar essa equivalência a produtos ou a processos. O Quadro 2 detalha essa distinção de escopo.

Lefroy e Rydberg (2003) reforçam que um produto pode possuir transformidades diferentes conforme a origem e recomendam selecionar condições semelhantes às do sistema avaliado. Também documentam quantidade, transformidade, emergia e premissas por fluxo. O artigo não propõe governança computacional, mas sustenta duas exigências reunidas na Tabela 6: metadados contextuais e memória de cálculo.

A terceira camada é a proveniência e a governança. Marvuglia *et al*. (2013) associaram o uso sistemático do *SCALE* à possibilidade futura de uma base harmonizada; Lyu *et al*. (2021) defenderam uma base dedicada e revisada por pares; De Vilbiss *et al*. (2024) materializaram a EmCFdb para fluxos elementares; Agostinho *et al*. (2025) propuseram o *Emergyinvent* como repositório comunitário. Essas iniciativas ocupam níveis diferentes: derivação a partir de redes, armazenamento institucional de fatores elementares, curadoria comunitária proposta e aplicação operacional em estudos. O *TRIGES* atua no último nível, integra valores selecionados ao inventário e aos resultados. Não substitui as demais infraestruturas e não oferece curadoria por pares, homologação institucional, identificadores persistentes ou versionamento bibliográfico integral.

Para evitar que governança seja tratada como conceito único, esta tese distingue níveis cumulativos. O nível mínimo registra valor e unidade; o seguinte acrescenta referência e baseline; o nível operacional preserva qual valor foi usado em cada estudo; o nível de versionamento mantém estados históricos dos metadados; o nível comunitário acrescenta curadoria, revisão, identificadores persistentes e regras de publicação. A versão avaliada concentra-se nos níveis de registro e no uso operacional, com limitações explícitas quanto aos níveis históricos e comunitários. Essa taxonomia permite avaliar o artefato pelo qual foi implementado sem reduzir o modelo ideal ao alcance atual da plataforma.

A Tabela 6 organiza as dimensões de governança derivadas da literatura e explicita, para cada uma, o mecanismo implementado e a lacuna residual. Essa distinção evita equiparar a biblioteca operacional da plataforma a um repositório comunitário completo.

Tabela 6 - Requisitos de governança para UEVs, implementação no TRIGES e lacunas residuais

Requisito	**Problema que endereça**	**Implementação no *TRIGES* e na lacuna residual**
Rastreabilidade bibliográfica	UEVs dispersos em dezenas de fontes, sem identificação clara de origem.	Cadastro obrigatório de referência bibliográfica em campo textual, associado à unidade, à classe e à baseline do UEV. Autor, ano, periódico e contexto não são armazenados em campos bibliográficos separados nesta versão.
Linha de base registrada	UEVs de baselines distintas não são combináveis diretamente sem conversão (Arbault *et al*., 2014a).	Campo explícito de baseline no cadastro do UEV, com a permissão de identificação e de verificação pelo analista. A plataforma não executa conversão automática nem bloqueio de combinações entre baselines.
Unidade de referência precisa	Ambiguidades entre sej/J e sej/g geram erros de conversão silenciosos.	Unidade e classe registradas no UEV e no Flow, com a permissão de inspeção da compatibilidade pelo analista. A rejeição automática de combinações dimensionalmente incoerentes não foi implementada nesta versão.
Preservação histórica do valor numérico empregado	UEVs são revistos ao longo do tempo; estudos anteriores precisam manter o valor efetivamente usado no cálculo.	O valor numérico do UEV empregado e seu identificador são preservados no Flow. Os metadados permanecem vinculados ao registro corrente da biblioteca; histórico formal de versões e snapshot bibliográfico completo não foram implementados.
Caracterização da incerteza do UEV	UEVs pontuais podem ocultar amplitude de incerteza associada ao coeficiente, aos dados e ao modelo (INGWERSEN, 2010; 2011; HUDSON; TILLEY, 2014).	O *TRIGES* registra valores pontuais e não armazena distribuição probabilística, intervalo de confiança ou parâmetros de incerteza. A incorporação desses metadados e sua propagação permanecem como trabalho futuro (Seção 5.5).
Versionamento formal do registro de UEV	Alterações posteriores de valor, de referência, de baseline ou dos demais metadados de um registro podem dificultar a reconstrução da evolução histórica da biblioteca, ainda que o valor utilizado em determinado Flow tenha sido preservado.	O *TRIGES* preserva no Flow o identificador e o valor numérico efetivamente empregados, mas não implementa histórico formal de versões do próprio registro de UEV; ele inclui autoria, data e justificativa de cada alteração. A EmCFdb documentada por De Vilbiss *et al*. (2024) utiliza uma planilha específica de Readme and Changinglog para registrar alterações da base.
Contexto geográfico/metodológico do UEV	O mesmo recurso pode apresentar UEV distinto conforme localização, condições ambientais e método de derivação; médias regionais ou globais podem não representar sistemas locais (Arbault *et al*., 2014c).	A versão atual permite registrar referência bibliográfica e baseline, mas não possui estrutura dedicada para geolocalização, para resolução espacial ou para domínio geográfico de validade do UEV. A incorporação desses metadados permanece como evolução futura (Seção 5.5).
Contexto temporal do UEV	Em determinados sistemas, transformidades podem variar em resposta à dinâmica de fontes, de estoques e de saídas ao longo do tempo, distinção que não deve ser confundida com incerteza	A versão avaliada utiliza valores pontuais de UEV definidos pelo analista para cada estudo; séries temporais e cálculo dinâmico de transformidades não estão implementados nesta plataforma.

	paramétrica (Tilley; Brown, 2006).	

Fonte: elaborado pelo autor com base em Marvuglia *et al*. (2013), Arbault *et al*. (2014a; 2014c), De Vilbiss *et al*. (2024), Agostinho *et al*. (2025), Ingwersen (2010; 2011), Hudson e Tilley (2014) e Tilley e Brown (2006).

A EmCFdb e a biblioteca operacional do TRIGES ocupam camadas distintas e potencialmente complementares do fluxo científico da contabilidade em emergia. O Quadro 2 diferencia as duas infraestruturas segundo dimensões verificáveis nas fontes examinadas, evitando tratá-las como sistemas concorrentes equivalentes.

Quadro 2 - Distinção de escopo entre a EmCFdb e a biblioteca operacional do *TRIGES*

Dimensão	**EmCFdb**	***TRIGES***
Finalidade principal	Fatores emergéticos para fluxos elementares.	Uso rastreável de UEVs no *workflow* da síntese *R*, *N* e *F*.
Meio documentado	Banco/planilha Microsoft Excel associado ao relatório.	Banco relacional integrado à aplicação web.
Escopo dos fatores	Elementary flows.	UEVs cadastrados/selecionados pelo analista para associação aos *Flows*.
Baseline	$12{,}0 \times 10^{24}$ seJ/ano.	Baseline registrada por UEV.
Histórico	Readme and Changinglog da base.	Valor e identificador preservados no Flow; sem versionamento formal do registro de UEV.
Governança	Quality Assurance institucional documentada pela EPA.	Curadoria/homologação institucional não implementada.
Workflow *R*, *N* e *F* + indicadores + ternário	Não documentado como parte do escopo da EmCFdb no relatório examinado.	Integrado no *TRIGES* conforme demonstrado nesta tese.

Fonte: elaborado pelo autor com base em De Vilbiss *et al*. (2024) e na implementação do *TRIGES* documentada nesta tese.

A quarta camada abrange incerteza e variabilidade. Ingwersen (2010) distingue incerteza de cenário, relacionada à adequação geográfica, temporal ou tecnológica; incerteza de modelo, decorrente da representação do sistema e incerteza de parâmetro, associada às quantidades e aos UEVs. Zhang *et al*. (2024) confirmam a persistência de lacunas de dados e parametrização. A variabilidade temporal real, na sua vez, corresponde à mudança efetiva de um coeficiente ao longo do funcionamento do sistema, não à falta de conhecimento sobre seu valor.

A análise de sensibilidade responde a uma pergunta diferente: examina quanto a saída muda quando uma entrada é perturbada segundo regra definida. Ela pode ser local ou global,

determinística ou probabilística, univariada ou multivariada. A propagação de incerteza, por outro lado, combina distribuições e dependências para caracterizar a incerteza do resultado. Um método OAT identifica efeito local sob as demais condições constantes, mas não fornece intervalo de confiança nem captura interações entre parâmetros. Preservar essa taxonomia evita que qualquer comparação entre UEVs seja denominada análise de incerteza ou demonstração geral de robustez.

A rastreabilidade inclui o escopo de cálculo. Ingwersen (2011) distingue UEVs com e sem trabalho e serviços e harmoniza os valores para uma baseline comum. Pan *et al*. (2021) convertem coeficientes de 15,83 para $12{,}0 \times 10^{24}$ seJ·ano^{-1} e reconhecem a heterogeneidade das fontes como limitação. Referência, unidade e baseline são, portanto, metadados necessários, mas não suficientes para uma governança comunitária: fronteira, tecnologia, período, localização e método de derivação também podem ser relevantes.

A conversão proporcional de um UEV entre duas baselines pode ser expressa pela equação (15), desde que B1 e B2 representem referências globais comparáveis, com a mesma unidade e o mesmo período de referência:

$$u_i^{(B_2)} = u_i^{(B_1)} \frac{B_2}{B_1} \tag{15}$$

Na equação (15), ui(B1) é o UEV do item i na baseline de origem, e ui(B2) é o valor expresso na baseline de destino. A relação corrige somente a referência global. Não corrige diferenças de tecnologia, de localização, de período, de fronteira ou de método de derivação. Quando o mesmo fator $c = \frac{B2}{B1}$ é aplicado a todos os UEVs do inventário, obtém-se a relação da equação (16):

$$(R', N', F', Y') = c(R, N, F, Y), \quad c = \frac{B_2}{B_1} \tag{16}$$

Sob reescalonamento uniforme, *R*, *N*, *F* e *Y* mudam proporcionalmente, mas EYR, EIR, ELR, ESI, %R e as frações $\bar{R}$, $\bar{N}$ e $\bar{F}$ permanecem invariantes. A conversão seletiva de apenas parte do inventário rompe essa propriedade e pode distorcer as razões e a posição ternária. A Tabela 7 sintetiza essa diferença algébrica e metodológica.

Tabela 7 - Consequências do reescalonamento uniforme e da mistura de baselines

Situação	**Transformação dos agregados**	**Efeito nos indicadores**	**Implicação metodológica**
Reescalonamento uniforme	R', N', F' e Y' são multiplicados pelo mesmo fator c.	EYR, EIR, ELR, ESI e %R permanecem invariantes.	Ajusta a referência global, sem atualizar tecnologia, localização, período, fronteira ou método de derivação.
Mistura de baselines ou conversão seletiva	Partes do inventário recebem fatores distintos ou permanecem sem conversão.	As razões e as frações composicionais podem ser distorcidas.	Compromete a comparabilidade e exige correção uniforme e documentada antes da agregação.

Fonte: elaboração própria com base nas relações apresentadas nas equações (15) e (16).

A Tabela 7 distingue uma conversão uniforme, que preserva as razões adimensionais, da mistura de baselines, que altera os componentes de forma não proporcional. Registrar a baseline declarada e o valor efetivamente empregado é condição de auditabilidade, mas não assegura, sozinho, adequação contextual. A plataforma preserva o valor numérico usado em cada Flow e o vínculo com os metadados correntes do UEV; não realiza harmonização automática nem válida a escolha metodológica do coeficiente.

Ingwersen (2011) incorporou incertezas de inventário e de UEV por simulação de Monte Carlo em uma análise processual de mineração e obteve intervalo de confiança substancial em torno do resultado central. Hudson e Tilley (2014) mostraram, em sistemas agrícolas, que a incerteza pode concentrar-se em poucos parâmetros dominantes. Esses estudos demonstram que um cálculo determinístico correto pode permanecer associado a ampla incerteza dos dados e coeficientes.

Tilley e Brown (2006) tratam fenômeno distinto: variabilidade temporal real. Em seu sistema eco-hidrológico dinâmico, transformidades da água mudaram em função dos estoques, fontes e saídas. Incerteza representa conhecimento imperfeito sobre o valor apropriado; variabilidade representa mudança efetiva do coeficiente no tempo. Um UEV pode apresentar baixa incerteza e alta variabilidade, ou o inverso.

Essa discussão exige separar erro computacional de incerteza metodológica. Erros de implementação, arredondamento ou transcrição podem ser identificados por testes e reprodução numérica. Já a incerteza associada às fronteiras, à seleção dos fluxos, à classificação R, N e F e à escolha dos UEVs permanece mesmo quando o algoritmo executa as fórmulas com alta

precisão. Portanto, convergência numérica com uma fonte publicada demonstra fidelidade do cálculo aos dados fornecidos, mas não comprova, por si só, exatidão epistemológica do inventário ou do valor de emergia.

A quinta camada reúne as lacunas residuais do *TRIGES*. A versão avaliada trabalha com valores pontuais e não armazena distribuições, intervalos de confiança ou correlações, nem propaga incerteza. O RF14 executa alteração determinística local de um UEV por vez e recalcula o inventário; não constitui Monte Carlo, intervalo de confiança, análise multivariada ou prova geral de robustez. Também difere das linhas de sensibilidade do diagrama, que representam trajetórias geométricas no espaço composicional.

Arbault *et al*. (2014b) analisam variantes do ESI por derivadas parciais e complementam condições de sinal indeterminado com Monte Carlo. Pan *et al*. (2021) aplicam o método *one-at-a-time* aos agregados de um sistema urbano. O RF14 compartilha apenas a lógica determinística de alterar um fator e mantém os demais constantes, mas opera sobre o UEV de um Flow. Portanto, propagação probabilística, sensibilidade sistemática, OAT em agregados, alteração local de UEV e linha ternária são procedimentos distintos.

2.7 Princípios arquiteturais para software científico rastreável

Os problemas discutidos nas Seções 2.2, 2.3 e 2.6 possuem implicações arquiteturais. Boas práticas de pesquisa computacional recomendam preservar entradas, registrar transformações, documentar versões e tornar a cadeia de resultados reconstruível (Sandve *et al*., 2013; Wilson *et al*., 2014); os princípios FAIR enfatizam metadados, interoperabilidade e reutilização (Wilkinson *et al*., 2016). Neste trabalho, repetição determinística significa obter o mesmo resultado com os mesmos dados e regras no encadeamento especificado. Reprodutibilidade computacional pressupõe que terceiros consigam reconstruir o resultado com dados, procedimentos e ambiente suficientemente documentados. Replicação científica envolve ainda nova execução empírica ou metodológica independente. O *TRIGES* cria condições principalmente para a primeira e apenas parcialmente para a segunda; não demonstra a terceira.

Kamiya (2005) registrou que a ausência inicial de requisitos formais e modelagem orientada a objetos dificultou a evolução de sua aplicação em emergia. O antecedente mostra que correção matemática e arquitetura sustentável são dimensões complementares. A partir da

literatura geral e das exigências do domínio, esta tese estabelece cinco condições de projeto, sem as apresentar como arquitetura única ou universalmente suficiente.

Cinco princípios estruturam essa tradução. O primeiro, preservar o valor numérico efetivamente utilizado, evita que mudanças posteriores em dados de referência alterem silenciosamente resultados anteriores (Sandve *et al*., 2013; Wilson *et al*., 2014). O segundo, a rastreabilidade da cadeia de cálculo, exige que quantidades, UEVs, classes, agregados, indicadores e coordenadas formem uma cadeia reconstruível (Sandve *et al*., 2013; Wilkinson *et al*., 2016), sem validar automaticamente fronteira, classificação ou adequação contextual do UEV. O terceiro, a separação entre dados persistidos e derivações, evita estados conflitantes quando uma entrada é alterada, o que permite refazer resultados a partir da base persistida (Sandve *et al*., 2013; Wilson *et al*., 2014). O quarto, a integridade das relações entre estudos, sistemas, fluxos e UEVs, usa restrições referenciais e transações para impedir referências órfãs e atualizações parciais (Oracle Corporation, 2026), sem provar por si só a confiabilidade científica do conteúdo armazenado. O quinto, a comunicação estruturada entre módulos, segue os princípios FAIR de formatos e metadados interpretáveis (Wilkinson *et al*., 2016), o que garante que indicadores, exportações e diagrama consumam as mesmas grandezas derivadas, sem assegurar equivalência de fronteira, baseline ou método entre estudos. Sua implementação e seus limites são apresentados no Capítulo 3.

A pertinência de infraestruturas computacionais para emergia também aparece em literatura recente de aplicação. Zhang *et al*. (2024), ao sintetizarem desafios e perspectivas da análise emergética de serviços ecossistêmicos, apontam o desenvolvimento de plataformas baseadas em emergia para análise e gestão como uma direção futura. A indicação é compatível com a necessidade de sistemas capazes de estruturar dados e resultados, embora o artigo não estabeleça requisitos de arquitetura, rastreabilidade ou implementação equivalentes aos adotados nesta tese.

Morandi *et al*. (2015) demonstram que resultados aritmeticamente corretos podem não ser comparáveis quando as fronteiras diferem. Assim, rastrear um resultado inclui documentar o sistema ao qual ele se refere, além dos UEVs e da baseline. A versão avaliada identifica estudos e sistemas, mas não possui campo estruturado completo para fronteiras ou relações hierárquicas. Correção computacional e comparabilidade metodológica permanecem dimensões distintas, e a implementação desses limites é detalhada nos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 descreve como essas condições foram materializadas, e o Capítulo 4 apresenta o que foi efetivamente verificado, o que evita apresentar uma decisão de arquitetura como contribuição sem evidência associada.

Em conjunto, esses princípios transformam requisitos metodológicos do domínio em decisões verificáveis de projeto: preservação do valor empregado, proveniência da cadeia de cálculo, separação entre base persistida e derivação, integridade relacional e comunicação estruturada. A literatura de reprodutibilidade e gestão de dados fornece a orientação geral; a forma concreta de implementação decorre das entidades e das limitações específicas da contabilidade em emergia.

O Quadro 3 sintetiza os cinco princípios e sua correspondência com mecanismo, propriedade verificável, evidência e limite de validade e torna explícita a articulação entre a lacuna discutida na Seção 2.5 e os requisitos derivados para o Capítulo 3.

Quadro 3 - Princípios arquiteturais, mecanismos e limites de validade

Princípio	**Mecanismo**	**Propriedade verificável**	**Evidência (onde é apurada)**	**Limite de validade**
1. Preservação do valor numérico efetivamente utilizado	Conservar o coeficiente aplicado a cada fluxo, distinto do valor corrente da biblioteca	Alterações posteriores na biblioteca não modificam retrospectivamente um Flow já persistido	Verificação funcional (Capítulo 4) sobre a imutabilidade do valor congelado	Não implica snapshot bibliográfico integral, versionamento completo dos metadados ou prova de adequação do coeficiente selecionado
2. Rastreabilidade da cadeia de cálculo	Cadeia reconstruível entre quantidade, UEV, classe, emergia do fluxo, agregados, indicadores e coordenadas	É possível localizar a origem de um resultado e refazer as operações que o produziram	Reconstrução da cadeia quantidade-UEV-emergia-indicador (Capítulos 3 e 4)	Rastreabilidade numérica não valida fronteira, classificação, independência dos fluxos ou adequação contextual do UEV
3. Separação entre dados persistidos e derivações	Quantidades, classificações e UEVs como entradas; emergia dos fluxos, R, N, F, Y, indicadores e coordenadas como resultados recalculados	Resultados derivados podem ser refeitos a partir da base persistida, sem cópias divergentes	Recálculo a partir da base persistida (Capítulo 3); unicidade do inventário como fonte única dos cálculos derivados (Capítulo 4, Seção 4.4.3)	As decisões concretas sobre quais módulos executam cada derivação pertencem ao Capítulo 3
4. Integridade das relações entre entidades	Restrições referenciais e transações entre	Ausência de referências órfãs e de atualizações parciais	Testes de relações válidas e rejeição	Integridade estrutural é condição de consistência, não

	estudos, sistemas, fluxos e UEVs		de estados órfãos (Capítulo 4)	prova de confiabilidade científica do conteúdo armazenado
5. Comunicação estruturada entre módulos	Indicadores, exportações e diagrama consomem as mesmas grandezas derivadas	Ausência de cópias divergentes entre componentes que exibem o mesmo estudo	Inspeção dos contratos de dados entre módulos (Capítulo 3); ausência de divergência entre inventário, indicadores e diagrama nos estudos avaliados (Capítulo 4, Seção 4.4.3)	Interoperabilidade técnica não assegura equivalência de fronteira, baseline ou método entre estudos

Fonte: elaborado pelo autor com base em Sandve *et al*. (2013), Wilson *et al*. (2014), Wilkinson *et al*. (2016) e nos requisitos do domínio sistematizados nesta tese.

2.8 Síntese do referencial teórico

O primeiro pilar é a contabilidade clássica em emergia. Quantidades físicas e UEVs de entrada compõem o inventário, do qual são derivados a emergia de cada fluxo, os agregados R, N, F e Y, os indicadores e, quando aplicável, a UEV de uma saída declarada. Esse pilar fundamenta o fechamento aritmético, a classificação explícita e a distinção entre entradas e derivações, sem propagação em redes, identificação automática de dupla contagem ou substituição do julgamento do analista sobre fronteira e classificação.

O segundo pilar é o diagrama ternário *Traditional*. A condição de normalização sustenta a projeção baricêntrica, as linhas de recursos, as curvas de ESI, as linhas de sensibilidade e o ponto agregado ponderado por Y. As equações cartesianas permitem verificar a correspondência entre composição e posição gráfica, fundamentam os requisitos de cálculo, a orientação dos vértices e a coerência geométrica avaliados no Capítulo 4. O diagrama integra composição e indicadores, sem certificar sustentabilidade ou validar o inventário.

O terceiro pilar é a governança de UEVs. Referência, unidade, baseline, contexto e valor utilizado condicionam a auditabilidade e a reutilização dos dados. Harmonização de baseline, atualização tecnológica, derivação de coeficientes, seleção contextual, armazenamento e curadoria são operações distintas. A EmCFdb de De Vilbiss *et al*. (2024) representa avanço institucional para fluxos elementares, enquanto o *TRIGES* atua na aplicação operacional de coeficientes selecionados. O requisito é preservar a base numérica e os metadados disponíveis,

tornar alternativas examináveis, sem alegar curadoria comunitária, versionamento integral, adequação automática ou conversão silenciosa entre baselines.

O quarto pilar distingue precisão computacional, incerteza, sensibilidade e variabilidade. A convergência com uma fonte demonstra fidelidade às entradas e às fórmulas, mas não a exatidão epistemológica do inventário. Incertezas de cenário, modelo e parâmetro devem ser diferenciadas de alterações temporais em um coeficiente. O RF14 permanece uma alteração determinística pontual de uma UEV; propagação probabilística, intervalos de confiança, análise multivariada e prova geral de robustez estão fora do escopo.

O quinto pilar é a arquitetura de software científico rastreável. Preservação do valor empregado, reconstrução da cadeia de cálculo, separação entre entradas e derivações, integridade referencial e comunicação estruturada são condições de projeto avaliadas nesta tese. Cada uma responde a riscos específicos, como alteração retrospectiva, perda de proveniência, duplicação de resultados, referência órfã ou divergência entre módulos. Essas condições favorecem auditoria e repetição determinística, sem eliminar a responsabilidade do analista ou demonstrar, isoladamente, reprodutibilidade científica completa.

Os pilares são interdependentes: a geometria ternária depende do inventário que produz os indicadores; o inventário é auditável quando as UEVs utilizadas permanecem identificáveis; a arquitetura possui valor científico quando preserva essas relações e permite confrontá-las com evidências. Cada construto exige, portanto, evidência correspondente: a governança de UEVs requer verificar a preservação dos valores e metadados; a rastreabilidade exige reconstruir a sequência de cálculo; a coerência matemática requer testar identidades, domínios e indicadores; a coerência geométrica requer confrontar composições e coordenadas; e a delimitação científica exige separar execução real, recálculo independente e possibilidade futura, o que impede que uma captura de interface seja tratada como prova de correção numérica ou que uma coincidência aritmética seja apresentada como validação arquitetural. O desenho do Capítulo 4 deriva dessa diferenciação entre tipos de evidência.

A lacuna remanescente é a insuficiente formalização e avaliação da cadeia que conecta UEVs, inventário, derivações, indicadores e geometria ternária por mecanismos explícitos de auditabilidade. O recorte do *TRIGES* limita-se ao modo *Traditional*, com os componentes *R*, *N* e *F*, e a valores pontuais previamente selecionados. Sua contribuição deve ser julgada pela capacidade de materializar os cinco princípios e produzir evidências verificáveis, não pela mera

reunião de funções *web*. O Capítulo 3 converte esses princípios em requisitos, modelo de dados, arquitetura e procedimentos; o Capítulo 4 examina evidências funcionais, numéricas e geométricas; distingue resultados executados de candidatos futuros. Permanecem fora do escopo a propagação algébrica em grafos, a seleção automática de UEVs, a curadoria comunitária, a incerteza probabilística, a comparação de arquiteturas alternativas e a validação com usuários.

3 MÉTODO

Diante da lacuna identificada no Capítulo 2, esta pesquisa adota *Design Science Research* (DSR) para construir e avaliar a plataforma *TRIGES*. Essa abordagem permite converter o problema teórico em requisitos, modelagem, arquitetura e procedimentos de avaliação estruturados.

Essa conversão organiza o capítulo em cinco etapas sequenciais: o delineamento da pesquisa e o vocabulário do domínio em emergia implementado na plataforma; os requisitos funcionais e não funcionais que orientaram o desenvolvimento; as decisões de modelagem de dados e de arquitetura; os módulos efetivamente implementados e os procedimentos adotados para avaliá-los. No contexto do paradigma DSR, a especificação funcional e a documentação técnica do sistema *TRIGES* cumprem papel de instrumento metodológico de construção e de verificação do artefato, sem constituírem fonte isolada de validade científica, o que garante correspondência entre o método descrito neste capítulo e o artefato efetivamente desenvolvido.

3.1 Delineamento da pesquisa

Esta pesquisa é classificada como aplicada, de natureza tecnológica, orientada ao desenvolvimento de artefato de software científico. Seu paradigma metodológico é o *Design Science Research* (DSR), abordagem consolidada em ciências da computação e em engenharia de software para produção de conhecimento por meio da construção e de avaliação de artefatos que resolvem problemas práticos relevantes (Wieringa, 2014). No DSR, a validade da avaliação do artefato decorre da demonstração de sua adequação aos critérios definidos para o problema investigado e de sua coerência com o conhecimento disponível no domínio. Nesta tese, eficiência computacional, produtividade e desempenho comparativo não foram avaliados sistematicamente.

O problema investigado é a insuficiente formalização e integração computacional da síntese em emergia clássica, conforme evidenciado no *corpus* examinado no Capítulo 2. O artefato é a plataforma *web TRIGES*, sistema que combina biblioteca pública de UEVs com rastreabilidade bibliográfica, módulo de síntese em emergia com cálculo automático dos quatro índices clássicos e da renovabilidade percentual (%R) e módulo de diagrama ternário interativo, todos integrados em ambiente *web* acessível sem instalação local. O caráter multiusuário da plataforma manifesta-se por meio de acesso independente por autenticação individual e

compartilhamento indireto de estudos via exportação e importação estruturada de dados - não por edição concorrente em tempo real. A Tabela 8 sintetiza o delineamento da pesquisa.

Tabela 8 - Delineamento da pesquisa

Dimensão	**Caracterização**
Natureza	Pesquisa aplicada; desenvolvimento de artefato tecnológico de software científico.
Paradigma metodológico	Design Science Research (DSR): construção e avaliação de artefato que resolve problema prático relevante em domínio científico (Wieringa, 2014).
Produto central	Plataforma web SPA (Single Page Application) para contabilidade em emergia clássica R, N e F: biblioteca de UEVs com rastreabilidade, cálculo automático dos quatro índices clássicos e da renovabilidade percentual (%R), e diagrama ternário interativo.
Fases sequenciais	(a) levantamento e especificação de requisitos; (b) modelagem de dados e arquitetura; (c) implementação dos módulos; (d) avaliação por estudos de caso publicados.
Critério de sucesso	Atendimento funcional dos requisitos RF01–RF10 e RF12–RF15 segundo seus critérios de aceitação; convergência numérica avaliada segundo o protocolo definido na Seção 3.7, com distinção de convergência estrita (desvio ≤ 0,1%, quando compatível com a resolução da fonte), divergência explicada, divergência não conclusiva e inconsistência estrutural da fonte; coerência geométrica do diagrama ternário em relação às equações do Capítulo 2.
Delimitação de escopo	Abordagem tabular clássica *R*, N e F (modo *Traditional*), única classificação implementada e avaliada nesta tese.

Fonte: Autor (2026).

O Quadro 4 relaciona, para cada macroetapa efetivamente documentada nesta tese, a entrada que a orientou, a atividade realizada, a saída produzida e a seção em que a evidência correspondente é apresentada.

Quadro 4 - Percurso da *Design Science Research*: etapas, entradas, atividades, saídas e evidências

Etapa da pesquisa	**Entrada documentada**	**Atividade realizada**	**Saída produzida**	**Evidência na tese**
1. Identificação e delimitação do problema	Lacuna diagnosticada no referencial teórico (Capítulo 2)	Formulação da questão de pesquisa e delimitação ao modo *Traditional R*, *N* e *F*	Questão de pesquisa e objetivo geral	Capítulo 1
2. Derivação dos requisitos	Lacuna do Capítulo 2, objetivos específicos do Capítulo 1 e lógica interna do domínio (Seção 2.7)	Especificação dos requisitos RF01–RF10, RF12–RF15 e RNF01–RNF11 com critérios de aceitação mensuráveis	Matriz de rastreabilidade lacuna–requisito–componente–evidência	Seção 3.3
3. Modelagem de dados e definição da arquitetura	Requisitos funcionais e não funcionais especificados	Definição das entidades do modelo de dados, das relações entre elas e da arquitetura cliente-servidor	Modelo de dados com seis entidades; arquitetura em camadas	Seções 3.4 e 3.5
4. Implementação do artefato	Modelo de dados e arquitetura definidos	Desenvolvimento dos módulos funcionais da plataforma; correção de	Plataforma *TRIGES* operacional, com	Seção 3.6

		problemas identificados durante o desenvolvimento	dez módulos funcionais	
5. Verificação funcional	Requisitos RF01–RF10 e RF12–RF15 com critérios de aceitação	Execução de procedimento de teste estruturado por requisito, com a comparação entre o resultado obtido e o esperado	Tabela de verificação de requisitos	Capítulo 4, Seção 4.2
6. Comparação numérica	Dados publicados dos sete estudos de caso selecionados (EC1–EC7)	Cadastro dos dados na plataforma, cálculo pelo *TRIGES* e comparação segundo o protocolo de tolerância definido na Seção 3.7	Desvios classificados por categoria de convergência ou divergência	Capítulo 4, Seção 4.3
7. Verificação geométrica	Pontos de referência com composições e valores de ESI conhecidos	Verificação do posicionamento de pontos, das curvas ESI = 1 e ESI = 5 e do ponto de composição em emergia agregada	Erro posicional medido em relação às equações do Capítulo 2	Capítulo 4, Seção 4.5
8. Análise das contribuições, limitações e ameaças à validade	Resultados da verificação funcional, da comparação numérica e da verificação geométrica	Exame das ameaças à validade de construto, interna, externa e de conclusão	Delimitação do alcance das conclusões da tese	Seção 3.7 e Capítulo 5

Fonte: Autor (2026).

O encadeamento problema → requisito → construção → avaliação materializa a DSR adotada nesta pesquisa: o problema delimitado no Capítulo 1 origina os requisitos especificados na Seção 3.3, os requisitos orientam a modelagem, a arquitetura e a implementação descritas entre as Seções 3.4 e 3.6, e o artefato resultante é avaliado pelos três procedimentos apresentados na Seção 3.7 e no Capítulo 4. O desenvolvimento do artefato foi incremental: funcionalidades identificadas como relevantes ao longo da construção foram incorporadas à especificação consolidada antes da verificação funcional final, sem que o número de ciclos executados ou a cronologia interna de cada refinamento estejam documentados de forma passível de quantificação nesta tese.

3.2 Vocabulário do domínio: correspondência entre terminologia do sistema e conceitos em emergia

O artefato desenvolvido emprega terminologia técnica específica para nomear suas entidades centrais. A Tabela 9 estabelece a correspondência formal entre esses termos e os conceitos em emergia definidos no Capítulo 2, o que torna a leitura dos capítulos subsequentes independente de consulta à documentação interna do sistema.

Tabela 9 - Correspondência entre terminologia da plataforma e conceitos em emergia

Termo técnico	**Definição operacional**	**Correspondência metodológica**
Chart	Container de análise em emergia que agrupa múltiplos subsistemas (Points) e seus fluxos. Equivale a um projeto ou estudo no vocabulário em emergia.	Estudo em emergia: conjunto de sistemas avaliados sob uma mesma unidade funcional e sob as mesmas fronteiras de sistema.
Point	Subsistema dentro de um Chart; possui fluxos de recurso associados e valores agregados *R*, *N* e *F* calculados.	Subsistema componente do sistema avaliado com composição em emergia própria, representado como ponto no diagrama ternário.
Flow	Fluxo de recurso associado a um Point; contém descrição, unidade, classe (*R*/*N*/*F*), valor numérico, UEV e emergia calculada (sej = valor × UEV).	Linha da tabela de emergia: entrada do inventário que, multiplicada pelo UEV, produz a emergia do fluxo em sej.
UEV	Unit Emergy Value, valor unitário de emergia armazenado na biblioteca pública da plataforma, com a inclusão de metadados de rastreabilidade, referência bibliográfica e baseline.	Transformidade ou emergia específica: coeficiente de conversão de grandeza física para sej.
Simergy Point	Funcionalidade da interface correspondente ao ponto de composição em emergia agregada, calculado como média ponderada das coordenadas baricêntricas dos Points visíveis, com pesos iguais aos valores de Y de cada Point.	Ponto de composição em emergia agregada equação (14) do Capítulo 2.
Output	Saída declarada associada a um Point, com descrição, quantidade física e unidade. Um Point pode possuir zero ou múltiplos Outputs. O UEV de cada Output é derivado, não persistido.	Saída quantitativa declarada pelo analista. O sistema deriva UEVout = Y/Q e utiliza a emergia integral do Point. Quando a saída é tratada metodologicamente como coproduto segundo a convenção clássica da emergia, essa atribuição integral é compatível com a regra de coprodutos; o *TRIGES* não classifica automaticamente produtos, coprodutos, subprodutos ou splits, nem implementa regras alternativas de alocação (Seção 2.2). Output ≠ Flow: o Flow contribui para formar Y; o Output utiliza Y já consolidado para derivar um valor unitário de emergia.

Fonte: Autor (2026).

Ao longo deste capítulo e nos capítulos de resultados, os termos técnicos da plataforma (*Chart, Point, Flow, Simergy Point*) designam entidades ou funcionalidades do sistema; os termos metodológicos correspondentes (estudo em emergia, subsistema, fluxo da tabela de emergia, ponto de composição em emergia agregada) designam conceitos em emergia conforme definidos no Capítulo 2. Nesta tese, emprega-se ponto de composição em emergia agregada como denominação metodológica, com a preservação de *Simergy Point* apenas quando houver referência direta à interface ou à implementação da plataforma.

3.3 Requisitos da plataforma

As lacunas identificadas no referencial teórico e os objetivos específicos definidos para esta pesquisa constituíram a base para a especificação dos requisitos da plataforma *TRIGES*, com critérios de aceitação mensuráveis para cada requisito funcional e não funcional derivado.

Os requisitos da plataforma foram derivados de três fontes complementares. A primeira é o diagnóstico da literatura, sintetizado no Capítulo 2: as limitações documentadas das ferramentas existentes - ausência de acesso independente por múltiplos usuários, ausência, nas ferramentas diretamente relacionadas ao *workflow R*, N e F e ao diagrama ternário examinadas nesta tese, de biblioteca de UEVs integrada ao mesmo ambiente analítico com os mecanismos de rastreabilidade requeridos pelo artefato, dependência de licença proprietária e ausência de ambiente *web* - traduzem-se diretamente em requisitos funcionais verificáveis. A segunda fonte é a estrutura dos objetivos específicos da tese, enunciados no Capítulo 1: os objetivos 1 a 4 implicam diretamente requisitos funcionais com critério de aceitação mensurável, enquanto os objetivos 5 a 7 orientam os procedimentos de comparação numérica, verificação funcional e geométrica, e análise de contribuições e limitações, descritos nas seções seguintes deste capítulo e no Capítulo 4. A terceira fonte é a lógica interna do domínio em emergia: os requisitos de proveniência operacional do valor utilizado (RNF02) e rastreabilidade bibliográfica de UEVs (RNF01) não decorrem de preferências de *design*, mas das propriedades que um resultado em emergia precisa ter para ser cientificamente reprodutível - conforme fundamentado na seção 2.7 do Capítulo 2. O conjunto de requisitos foi refinado ao longo dos ciclos iterativos de construção e avaliação do artefato, compatível com o paradigma *Design Science Research*: funcionalidades identificadas como relevantes durante o desenvolvimento foram incorporadas à especificação consolidada antes da verificação funcional final. Entre elas, o RF14 formaliza

a análise comparativa de UEVs, associada ao problema de dispersão bibliográfica e de influência da escolha do coeficiente sobre os resultados calculados, discutido na Seção 2.6. A sequência operacional implementada no artefato guarda correspondência conceitual com *workflows* recentes descritos na literatura, nos quais representação sistêmica, inventário, parametrização, conversão e indicadores constituem etapas encadeadas (Zhang *et al*., 2024).

A Tabela a seguir consolida essa origem tríplice, articula cada lacuna identificada no Capítulo 2 ao requisito correspondente, ao mecanismo ou ao componente que o implementa e à evidência empírica utilizada nesta tese para sustentar seu atendimento. Isto fecha explicitamente o ciclo problema → requisito → construção → avaliação, característico do DSR.

Tabela 10 - Matriz de rastreabilidade: lacuna, requisito, componente e evidência

Lacuna científica/tecnológica	**Requisito associado**	**Mecanismo/componente implementado**	**Evidência utilizada nesta tese**
Fragmentação entre inventário, cálculo e representação	RF05–RF10	Chart, Point, Flow, indicadores e diagrama ternário	Verificação funcional (Seção 4.2) e estudos de caso (Seção 4.3)
Dispersão e baixa rastreabilidade bibliográfica de UEVs	RF08, RF14, RNF01, RNF02	Biblioteca de UEVs; campos id_uev_ptpd e transformidade_ptpd	Inspeção do modelo de dados (Seção 3.4) e comparação dos resultados reconstruíveis dos estudos de caso
Dependência de planilhas locais e fluxos fragmentados de trabalho	RF01, RF05–RF10, RF12–RF13, RNF08	SPA + API REST + banco relacional + exportação/importação JSON	Verificação funcional (Seção 4.2)
Risco de dessincronia entre inventário e indicadores calculados	RF07, RF10, RNF04	Agregação *R*, *N* e *F* por Point e cálculo determinístico dos indicadores	Comparação numérica (Seção 4.3)
Necessidade de coerência geométrica na representação ternária	RF09, RNF05	Renderização em Canvas 2D e projeção baricêntrica	Verificação geométrica (Seção 4.5)
Necessidade de reprodução estruturada de estudos	RF12, RF13, RNF01, RNF02	Exportação/importação estruturada (JSON) e preservação do valor do UEV no Flow	Verificação funcional e análise arquitetural (Seções 3.4–3.5)
Necessidade de representar resultados físicos de um sistema e derivar valores unitários de emergia sem cálculo manual, na continuidade da integração entre inventário, cálculo e representação já estabelecida	RF15, RNF04	Entidade SystemOutput e cálculo UEVout = Y/Q	Verificação funcional da Seção 4.2

Fonte: Autor (2026).

O conjunto central de requisitos funcionais desta tese compreende quatorze itens, identificados como RF01–RF10 e RF12–RF15 e organizados em quatro grupos. O RF11, originalmente relacionado ao Editor ESL, foi retirado do escopo da versão do artefato avaliada e não integrou a verificação funcional. O primeiro grupo - RF01 a RF10, núcleo analítico - cobre autenticação, gerenciamento de dados em emergia (*Charts, Points e Flows*), biblioteca de UEVs, diagrama ternário e indicadores e constitui o núcleo operacional diretamente vinculado ao problema científico. O segundo grupo - RF12 e RF13, apoio ao artefato - cobre as funções de exportação e de importação de dados, cujo nível de evidência é proporcional à sua participação direta na análise em emergia clássica. O terceiro grupo - RF14, análise comparativa - cobre a comparação determinística de registros alternativos de UEV e a comparação entre registros bibliográficos e baselines emergéticas globais, o que amplia o núcleo analítico com uma camada exploratória que não altera o inventário persistido (RNF11). O quarto grupo - RF15, gestão de saídas do sistema - cobre o cadastro de múltiplas saídas (*Outputs*) declaradas por *Point* e a derivação automática do UEV de cada saída a partir da emergia total Y já consolidada do inventário, fato que estende a cadeia de cálculo descrita na Seção 3.6 sem alterar *R*, *N*, *F* ou *Y*. Além dos quatorze requisitos avaliados, o artefato contém funcionalidades complementares previamente identificadas na especificação do sistema como RF16, navegação, RF17, contato e RF18, páginas institucionais. Esses três requisitos são registrados apenas para caracterização do artefato, pois não integram o núcleo científico avaliado nesta tese e não foram submetidos ao protocolo de verificação funcional apresentado no Capítulo 4. A Tabela 11 apresenta os requisitos com descrição do fluxo principal e critério de aceitação.

Tabela 11 - Requisitos funcionais da plataforma *TRIGES*

ID	Requisito	Descrição e fluxo principal	Critério de aceitação
RF01	Login e autenticação	Usuário acessa a plataforma com e-mail e senha, recebe tokens JWT em cookies HttpOnly, mantém sessão restaurada automaticamente por cookie válido, e encerra a sessão por logout.	Access token e refresh token armazenados; guard de rotas bloqueia acesso não autenticado; auto-login funcional em reacesso.
RF02	Registro de usuário	Novo usuário cadastra nome, instituição, país, telefone, e-mail e senha, com validação campo a campo antes do envio.	Validações client-side de e-mail, senha mínima de 8 caracteres e confirmação de e-mail e senha; erro 409 exibido em caso de e-mail duplicado.
RF03	Recuperação de senha	Usuário solicita reset por e-mail, tem o token validado pelo backend e define nova senha.	Fluxo completo de recuperação executado; token inválido bloqueia o formulário.

RF04	Gerenciamento de perfil	Usuário edita nome e telefone e altera a senha por modais dedicados.	Endpoints de atualização funcionais; logout automático quando a consulta de informações do usuário falha por expiração do token.
RF05	Gerenciamento de Charts	Criar, renomear, excluir e selecionar Charts; a seleção dispara o carregamento automático de Points e Flows associados.	Endpoints de criação, atualização e exclusão funcionais; seleção do Chart dispara busca paralela dos Points.
RF06	Gerenciamento de Points	Criar, editar e excluir Points dentro de um Chart; configurar visibilidade, simetria e cor de cada Point no diagrama.	Operações CRUD funcionais; totais R/N/F recalculados após cada operação; alterações refletidas em tempo real no diagrama.
RF07	Gerenciamento de Flows	Criar, editar inline e excluir Flows com classe R/N/F, valor numérico e UEV; input numérico flexível aceita notação brasileira, americana e científica.	Operações CRUD funcionais; rotina de parse converte 1.234,56, 1234.56 e 4.8e12; emergia calculada como valor × UEV.
RF08	Biblioteca de UEVs	Consultar e cadastrar UEVs públicos com busca debounced; cada UEV inclui referência bibliográfica obrigatória e baseline.	Listagem com filtros e cadastro funcional; validação de campos obrigatórios, incluindo referência científica com mínimo de dois caracteres.
RF09	Diagrama ternário	Renderizar diagrama ternário equilátero em Canvas 2D com pontos, linhas de recurso, curvas de sustentabilidade, ponto de composição em emergia agregada, zoom, pan e exportação PNG.	Triângulo sempre equilátero; pontos plotados por fórmula correta; curvas ESI geradas algebricamente; composição agregada calculada pela equação (14); exportação funcional.
RF10	Indicadores em emergia	Calcular e exibir EYR, EIR, ELR, ESI e %R por Point, com fórmulas exibidas em tooltips e paginação de cinco por página.	Valores corretos com desvio inferior a 0,1% em relação ao cálculo manual; divisões por zero tratadas como N/A; tooltips operacionais.
RF12	Exportação de dados	Exportar Chart completo (JSON v2.0), Point individual (JSON v1.0) e diagrama ternário (PNG).	Arquivos baixados automaticamente; JSON v2.0 reimportável na plataforma; PNG com resolução adequada para publicação.
RF13	Importação de dados	Importar JSON v1.0 (Point individual) ou v2.0 (Chart completo), com validação de formato e rate limiting.	Importação cria corretamente Chart, Points e Flows; controle de taxa previne erro 429; JSON inválido gera mensagem descritiva.
RF14	Análise comparativa de UEVs	Simular substituição de UEV em um Flow selecionado (Variation Scenarios); comparar registros alternativos do mesmo elemento e unidade na biblioteca (UEV Reference Comparison); comparar o UEV selecionado sob diferentes baselines globais (Global Baseline Comparison).	Cálculo habilitado somente com UEV simulado maior que zero; coeficiente de sensibilidade do sistema calculado corretamente; fator relativo e variação percentual calculados em relação ao registro ou baseline de referência; nenhuma alteração é persistida no Flow, no UEV ou na biblioteca.
RF15	Gestão de Outputs e derivação de UEV de saída	Permitir cadastrar, consultar, editar e excluir zero ou múltiplas saídas (Outputs) associadas a cada Point, registrando descrição, quantidade e unidade e derivando automaticamente o UEV de cada saída a partir da emergia total integral do Point (UEVout = Y/Q).	CRUD persistente de Outputs; suporte a zero ou múltiplos Outputs por Point; cada Output pertence ao Point correto; quantidade finita e maior que zero; unidade obrigatória; UEV calculado como Y/Q e não persistido; alteração de Q recalcula imediatamente o UEV; refresh preserva os dados primários (description, value, unit);

			filtros R/N/F não alteram Y científico nem os UEVs de saída; alternância entre Points não mistura Outputs; exclusão de um Output não altera os demais; exclusão do Point remove seus Outputs subordinados por integridade referencial (ON DELETE CASCADE).

Fonte: Autor (2026).

O Quadro 5 diferencia, para cada requisito funcional, o nível de evidência efetivamente demonstrado: verificado integralmente, quando o requisito foi testado e aprofundado pela comparação numérica ou pela verificação geométrica do Capítulo 4, verificado parcialmente, quando o teste funcional cobriu apenas o comportamento da interface, sem integrar a comparação numérica ou a verificação geométrica; ou fora do núcleo científico avaliado, para os requisitos complementares RF16 a RF18.

Quadro 5 - Nível de evidência dos requisitos funcionais (RF01–RF18)

ID	**Justificativa (evidência documentada)**	**Nível de evidência**
RF01	Testado em ambiente de teste; critérios de aceitação confirmados na Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF02	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF03	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF04	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF05	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF06	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF07	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF08	Idem, Seção 4.2 (Tabela 19).	Verificado integralmente
RF09	Testado na Seção 4.2; aprofundado pela verificação geométrica da Seção 4.5.	Verificado integralmente
RF10	Testado na Seção 4.2; aprofundado pela comparação numérica da Seção 4.3 (EC1–EC7).	Verificado integralmente
RF12	Testado na Seção 4.2 quanto ao comportamento da interface; não integra a comparação numérica ou verificação geométrica.	Verificado parcialmente
RF13	Testado na Seção 4.2 quanto ao comportamento da interface; não integra a comparação numérica ou verificação geométrica.	Verificado parcialmente
RF14	Testado na Seção 4.2, incluindo confirmação de que nenhuma escrita é persistida.	Verificado integralmente

RF15	Testado na Seção 4.2 mediante protocolo de doze etapas (Seção 3.7); evidência funcional adicional apresentada na Seção 4.3.11, baseada no EC4 e em agregados cuja consistência foi previamente confirmada na comparação numérica oficial.	Verificado parcialmente
RF16	Funcionalidade complementar de navegação; não submetida ao protocolo de verificação funcional.	Fora do núcleo científico avaliado
RF17	Funcionalidade complementar de contato; não submetida ao protocolo de verificação funcional.	Fora do núcleo científico avaliado
RF18	Funcionalidade complementar institucional; não submetida ao protocolo de verificação funcional.	Fora do núcleo científico avaliado

Fonte: elaborado pelo autor a partir da Tabela 11, da Tabela 19 (Seção 4.2) e das Seções 4.3 e 4.6.

Onze requisitos não funcionais estruturam as propriedades de qualidade da plataforma, com ênfase nas dimensões de maior relevância científica e técnica. A Tabela 12 apresenta os requisitos com descrição e critério de aceitação ou evidência associada.

Tabela 12 - Requisitos não funcionais da plataforma

ID	Requisito	Descrição	Critério de aceitação / evidência
RNF01	Rastreabilidade de UEVs	Cada Flow armazena o identificador do UEV utilizado no cálculo; cada UEV registra referência bibliográfica e baseline de origem.	Campo id_uev_ptpd persistido em cada Flow; referência bibliográfica obrigatória no cadastro de UEV (mínimo de dois caracteres).
RNF02	Preservação do valor efetivamente empregado	Alterações no UEV da biblioteca não recalculam automaticamente Flows existentes.	Edição de UEV não recalcula emergias de Flows já persistidos; o valor transformidade_ptpd permanece preservado até que o próprio Flow seja explicitamente editado.
RNF03	Desempenho do diagrama	Estratégia de renderização adequada ao processamento interativo de múltiplos pontos, evitando recálculos redundantes; meta de engenharia de 500 ou mais pontos a 60 FPS.	Evidência verificável nesta tese: uso de Canvas 2D nativo, consolidação memorizada dos dados e projeção das coordenadas por percurso linear (O(n)) sobre o conjunto de pontos, sem recalculações redundantes. Delimitação: a meta de 500 ou mais pontos a 60 FPS foi adotada como objetivo de engenharia, não submetido a benchmark controlado nesta etapa da pesquisa (protocolo, equipamento, navegador e distribuição de tempos de quadro não mensurados); não é apresentada como desempenho empiricamente validado.
RNF04	Exatidão dos cálculos	Indicadores calculados deterministicamente pelas fórmulas canônicas; divisões por zero tratadas explicitamente.	EYR, EIR, ELR, ESI e %R calculados na camada de apresentação com fórmulas fixas; divisões por zero tratadas explicitamente: F = 0 torna EYR indefinido (EIR permanece definido, igual a 0, se R + N > 0); R = 0 torna ELR e ESI indefinidos; R + N = 0 torna EIR indefinido. Resultados matematicamente indefinidos são exibidos como N/A, sem propagação de Infinity ou NaN. Estende-se a

			essa exatidão o cálculo de $UEV_{out,j}$ = Y/Qj (equação (3c)): Qj > 0 é condição de habilitação do cálculo; Y é sempre o valor integral do inventário do Point, independente do filtro de visualização R/N/F aplicado à interface; o resultado é determinístico; e valores inválidos ou não numéricos de Qj são tratados explicitamente, sem propagação de Infinity ou NaN para a interface.
RNF05	Consistência geométrica	Triângulo ternário sempre equilátero; coordenadas derivadas da fórmula de projeção correta.	Fórmula de projeção consistente; equilateralidade mantida em todas as resoluções.
RNF06	Segurança de sessão	JWT em cookies HttpOnly, Secure e SameSite=Strict; guard de rotas; interceptador Axios trata renovação automática de token em resposta a 401; logout automático por token expirado; credenciais não registradas em console.	Tokens inacessíveis via JavaScript (HttpOnly impede leitura por sessionStorage, localStorage ou XSS); requisições autenticadas usam withCredentials para envio automático do cookie pelo navegador; interceptador renova a sessão via POST /refreshtoken em resposta a 401; falha em GET /session aciona logout automático.
RNF07	Segurança de infraestrutura	Backend protegido por headers de segurança, CORS restrito por ambiente, rate limiting em endpoints críticos e validação estrutural de inputs.	Headers de proteção ativos; origem restrita em produção; perfis de rate limiting definidos; validação de schema em endpoints críticos.
RNF08	Portabilidade	Sistema acessível por navegador sem instalação local; compatível com Chrome, Firefox e Edge atuais.	SPA implantada em ambiente web via CDN; backend acessível por HTTPS; ausência de dependências de plugins.
RNF09	Input numérico flexível	Campos de valor de Flow aceitam notações numéricas distintas sem exigir formato único.	Rotina de parse aceita padrões brasileiro, americano e científico; conversão apenas em onBlur; texto digitado mantido temporariamente na interface até a conversão, sem persistência da representação textual original.
RNF10	Acessibilidade mínima	Componentes globais da interface passam por verificação automatizada parcial de critérios selecionados de acessibilidade (WCAG AA); controles interativos têm foco visível, labels e contraste adequado.	Auditoria automatizada com axe/Vitest para componentes globais; contraste verificado; foco em modais e atributos ARIA implementados.
RNF11	Isolamento de simulações exploratórias	Os cálculos exploratórios do módulo de análise comparativa de UEVs (RF14) são executados sem gravação em banco de dados, não alterando o inventário persistido, o Flow de origem, o UEV consultado ou a biblioteca.	Nenhuma requisição de escrita é disparada pelas rotas de simulação e comparação; o valor simulado e os resultados derivados existem apenas no estado local do cliente, sem persistência até nova consulta.

Fonte: Autor (2026).

O Quadro 6 aplica a mesma diferenciação aos requisitos não funcionais, distingue requisitos verificados integralmente por evidência do Capítulo 4, requisitos verificados apenas parcialmente por ausência de protocolo de teste dedicado, e metas de engenharia explicitamente não submetidas a protocolo completo, como já reconhecido para o RNF03 na Seção 3.3.

Quadro 6 - Nível de evidência dos requisitos não funcionais (RNF01–RNF11)

ID	Justificativa (evidência documentada)	Nível de evidência
RNF01	Mecanismo implementado no modelo de dados (campo id_uev_ptpd, Seção 3.4); não submetido a protocolo de teste funcional dedicado no Capítulo 4, distinto do uso do UEV nos estudos de caso.	Verificado parcialmente
RNF02	Mecanismo implementado no modelo de dados (campo transformidade_ptpd fixado no cadastro do Flow, Seção 3.4); não submetido a protocolo de teste funcional dedicado no Capítulo 4.	Verificado parcialmente
RNF03	Estratégia de renderização descrita na Seção 3.5; meta de 500 ou mais pontos a 60 FPS explicitamente não submetida a benchmark controlado (protocolo, equipamento e navegador não mensurados).	Meta de engenharia não submetida a protocolo completo
RNF04	Tratamento de divisão por zero testado na Seção 4.2 (RF10, RF15); exatidão dos indicadores confirmada pela comparação numérica da Seção 4.3.	Verificado integralmente
RNF05	Equilateralidade e projeção testadas na verificação geométrica da Seção 4.5.	Verificado integralmente
RNF06	Critérios de HttpOnly, guard de rotas, renovação de token e logout automático testados na verificação funcional do RF01 (Seção 4.2).	Verificado integralmente
RNF07	Mecanismos de segurança de infraestrutura (headers, CORS, rate limiting, validação de schema) descritos na Seção 3.5; não submetidos a protocolo de teste dedicado no Capítulo 4.	Verificado parcialmente
RNF08	Portabilidade descrita na Seção 3.5 (SPA via CDN, backend via HTTPS); compatibilidade entre navegadores não submetida a protocolo de teste cruzado documentado.	Meta de engenharia não submetida a protocolo completo
RNF09	Notações numéricas testadas explicitamente na verificação funcional do RF07 (Seção 4.2).	Verificado integralmente
RNF10	Verificação automatizada parcial de critérios selecionados de acessibilidade (WCAG AA), sem avaliação com usuários (Seção 3.5).	Verificado parcialmente
RNF11	Ausência de escrita em banco confirmada explicitamente na verificação funcional do RF14 (Seção 4.2).	Verificado integralmente

Fonte: elaborado pelo autor a partir da Tabela 12 e da Seção 4.2 (Tabela 19).

Os requisitos RNF01 e RNF02 materializam mecanismos relevantes para a rastreabilidade operacional e para a reexecução aritmética dos resultados produzidos pela plataforma, sem que isso configure preservação histórica integral da proveniência ou reprodutibilidade científica completa por terceiros. Sem RNF01, não é possível auditar a origem dos coeficientes utilizados em um resultado publicado. Sem RNF02, a atualização de um UEV poderia retroativamente alterar resultados já citados em artigos, o que comprometeria a auditabilidade e a reexecução aritmética dos cálculos já publicados. O requisito RNF05, na sua vez, é condição necessária para a correção geométrica do diagrama ternário: a equilateralidade do triângulo é invariante arquitetural da plataforma, e qualquer desvio dessa premissa invalidaria a leitura visual dos indicadores pelas linhas de recurso e pelas curvas de sustentabilidade.

3.4 Modelagem de dados

A satisfação de RNF01 e RNF02 depende diretamente de como as entidades do domínio são estruturadas e relacionadas no banco de dados. O modelo de dados relacional que sustenta a plataforma parte dessas entidades e, na sequência, formaliza as relações e a hierarquia que as articulam.

O modelo de dados da plataforma foi projetado a partir das entidades fundamentais do domínio em emergia e das relações entre elas. O modelo de dados da versão avaliada é constituído por seis entidades operacionais (*Chart, Usuário, Point, Flow, UEV* e *SystemOutput*) relacionadas ao cadastro, à organização e ao processamento das análises em emergia. A integridade dos dados em emergia depende dos mecanismos de integridade referencial, das transações e das regras de derivação sob demanda descritas nas Seções que vão de 3.4 a 3.6. *SystemOutput* é entidade irmã de *Flow* sob *Point*: enquanto o *Flow* contribui para formar Y, o *SystemOutput* utiliza Y já consolidado para derivar um valor unitário de emergia, sem alterá-lo. A Tabela 13 descreve cada entidade com seus atributos principais e a justificativa das decisões de modelagem.

Tabela 13 - Entidades do modelo de dados e justificativas de modelagem

Entidade	**Atributos principais**	**Decisão de modelagem e justificativa**
Usuário	id, nome, e-mail, hash_senha, instituição, país, telefone, data_cadastro.	Isolamento de Charts por usuário; autenticação JWT stateless; dados de país e instituição relevantes para a rastreabilidade científica.
Chart (private_transformity_chart)	id_ptc, nm_ptc, id_usuario_ptc.	Entidade que representa o estudo em emergia e agrega múltiplos Points; relação N:1 com Usuário e 1:N com Point. O campo renewability_mode_ptc é mantido no esquema físico por evolução do banco, mas não é atributo relevante ao escopo Traditional avaliado nesta tese.
Point (private_transformity_points)	id_ptp, id_usuario_ptp, id_chart_ptp, nm_ptp, r_ptp, n_ptp e f_ptp.	r_ptp, n_ptp e f_ptp são campos legados do esquema físico (FLOAT); os totais R, N e F efetivamente utilizados pela aplicação são obtidos sob demanda por agregação SQL sobre os Flows, e não a partir desses campos.
Flow (private_transformity_points_data)	id_ptpd, id_point_ptpd, desc_ptpd, unidade_ptpd, classe_ptpd, valor_ptpd, transformidade_ptpd, id_uev_ptpd e id_chart salvos no momento do cadastro do Flow.	Os valores não são recalculados automaticamente, garantindo RNF02; id_chart permite busca direta por Chart sem percorrer a hierarquia Point.
SystemOutput	id, systemId, description, value, unit.	value armazenado como DOUBLE; systemId é FK para private_transformity_points.id_ptp com ON DELETE CASCADE; o UEV da saída (Y/Q) é calculado, não persistido, evitando duplicar como estado o que é deterministicamente reconstruível a partir de Y e de Q.
UEV (emergia)	item, descrição, classe, unidade, quantidade, uev, referência obrigatória e baseline.	A referência é obrigatória, implementando RNF01; a baseline fica explicitamente registrada por UEV, permitindo sua verificação pelo analista.

Fonte: Autor (2026).

As relações entre as entidades seguem a hierarquia lógica da síntese em emergia clássica. Um Usuário pode possuir múltiplos *Charts* (1:N). Cada *Chart* contém múltiplos *Points* (1:N). Cada *Point* contém múltiplos *Flows* (1:N), cada um vinculado a um UEV com valor e referência registrados. Cada *Point* agrega os totais *R*, *N* e F de seus *Flows* por agregação sob demanda no *backend*, calculada a partir dos *Flows* persistidos no momento da consulta; os

campos r_ptp, n_ptp e f_ptp permanecem no esquema físico da entidade *Point* como campos legados, mas não constituem a fonte operacional desses totais na versão avaliada da plataforma. Cada *Point* é posteriormente convertido em uma representação gráfica no Canvas a partir de seus totais normalizados *R*, *N* e F, o que mantém separadas a persistência dos dados em emergia e a lógica de renderização. Cada *Point* contém ainda, como entidade irmã de *Flow*, zero ou múltiplos *SystemOutput* (1:N), cada um com dados primários persistidos (*description*, *value*, *unit*) e UEV derivado sob demanda como Y/Q, sem alterar *R*, *N*, *F* ou *Y* do *Point*.

Uma decisão de modelagem merece justificativa explícita por seu impacto na validade científica: o atributo transformidade_ptpd na entidade *Flow* registra o valor do UEV no momento do cadastro do *Flow* - não uma referência dinâmica ao UEV atual. Isso implementa o requisito RNF02: mesmo que o UEV seja posteriormente revisado na biblioteca pública, o *Flow* permanece associado ao valor original utilizado no cálculo. O campo id_uev_ptpd registra a rastreabilidade bibliográfica sem criar dependência de recálculo automático. Decisão análoga orienta o *SystemOutput*: o *Total Emergy* do Point não é duplicado como campo persistido no *Output*, e o UEV de cada saída não é persistido, pois ambos são deterministicamente reconstruíveis a partir dos dados primários já armazenados (*Flows* do *Point* e *Q* informado pelo analista).

3.5 Arquitetura de software

Esta seção detalha as decisões arquiteturais da plataforma e, para isto, cobre o padrão cliente-servidor adotado, o gerenciamento de estado no *frontend*, o *Design System* que garante coerência visual e, por fim, as escolhas tecnológicas de cada camada com suas justificativas.

A plataforma adota arquitetura cliente-servidor organizada em três camadas lógicas: apresentação, serviços e persistência. A camada de apresentação (*frontend*) é implementada como SPA (*Single Page Application*) em *React 18* com *TypeScript*, responsável por toda a interface com o usuário, renderização do diagrama ternário via Canvas 2D, cálculo dos indicadores em emergia e lógica de interação. A camada de serviços (*backend*) é implementada em *Node.js* com *Express*, fator responsável pela autenticação, pelas regras de aplicação e pela exposição de uma *API REST*, cujas rotas são centralizadas em uma única camada de configuração – o que elimina *endpoints* dispersos pelos componentes e mantém a superfície de comunicação entre as camadas auditáveis em um só lugar. A camada de persistência utiliza

Prisma ORM sobre o banco relacional MySQL, isola as demais camadas do acesso direto a dados e garante integridade referencial. A comunicação entre apresentação e serviços ocorre exclusivamente via *HTTPS* e utiliza JSON como formato de troca de dados e *JWT* para controle de sessão. Internamente, a camada de serviços adota organização inspirada nos princípios de *Clean Architecture* (Martin, 2017), com separação entre regras de negócio de domínio, casos de uso, adaptadores de interface (controladores e repositórios) e camada de *frameworks*/*drivers* (*Express*, Prisma, configuração de ambiente) decisão arquitetural registrada e mantida ao longo do desenvolvimento. O detalhamento dessas camadas internas do *backend* não é aprofundado nesta tese, cujo escopo se concentra na modelagem científica em emergia, no cálculo dos indicadores e na representação ternária. A arquitetura de *backend* é caracterizada aqui apenas na medida suficiente para situar a plataforma como instrumento de pesquisa.

Uma distinção arquitetural que merece explicitação diz respeito ao cálculo dos indicadores em emergia (equações (4) a (8) do Capítulo 2). Eles são calculados na camada de apresentação, a partir dos totais *R*, *N* e *F* de cada *Point* obtidos pelo *backend* (Seção 3.4), coerente com os princípios arquiteturais da Seção 2.7. Por não possuírem estado próprio que requeira persistência independente, tanto os totais quanto os indicadores derivados são calculados sob demanda - os primeiros no *backend*, os segundos na camada de apresentação – o que garante resposta imediata sem comprometer a rastreabilidade: os valores de base (valor e UEV de cada *Flow*) podem ser reexecutados aritmeticamente a partir dos dados efetivamente armazenados no servidor.

O mesmo princípio - dados primários persistidos, resultados recalculados a partir da fonte de verdade - orienta a gestão de *Outputs* (RF15): os dados primários de cada saída são persistidos, enquanto o *Total Emergy do Point* e o UEV de cada saída são derivados sob demanda, sem persistência própria. Essa separação preserva a distinção entre estado científico, todos os *Flows do Point*, do qual deriva *Y*, o estado de apresentação, as linhas do inventário filtradas por classe (*R*, *N*, *F* ou *All*) na interface: o filtro visual altera apenas quais linhas são exibidas, sem interferir no Y integral empregado no cálculo de *UEVout* nem nos totais *R*, *N* e *F* do *Point*.

O gerenciamento de estado no *frontend* combina *React Query* para o estado de servidor (dados de *Charts*, *Points* e *Flows* sincronizados com o *backend*), *React Context API* para os contextos de domínio (autenticação, perfil de usuário) e *um store Zustand* dedicado ao estado de interface global de alta frequência de atualização. A hierarquia de *providers* acompanha a

ordem de dependência entre os contextos, assegura que autenticação, perfil de usuário e dados de domínio permaneçam disponíveis de forma consistente ao longo da navegação. Sustentando essa camada de estado está a *comunicação HTTP* propriamente dita: as requisições ao *backend* são realizadas via *Axios* configurado com *withCredentials* e um interceptador de resposta dedicado trata os erros 401 associados à expiração do *token*, o que dispara renovação via *POST /refreshtoken* ou *logout* automático via *AuthContext* quando a renovação falha. Como a sessão é mantida por *cookies HttpOnly*, o navegador anexa o *cookie* automaticamente a cada requisição autenticada, sem injeção manual de cabeçalho - o que garante que o estado de servidor, gerenciado pelo *React Query*, nunca opere sobre uma sessão expirada de forma silenciosa.

A plataforma adota um *Design System*, atualizado progressivamente até a versão 1.2, que centraliza *tokens* de cor, tipografia e espaçamento em uma camada dedicada. A paleta principal utiliza tons neutros para elementos estruturais e roxo como cor de acento para ações primárias. A semântica de renovabilidade (*R*/*N*/*F*) é mapeada em *tokens* visuais específicos, o que garante consistência cromática e semântica em todos os contextos da interface.

A versão 1.2 do sistema de *design* incorporou verificação automatizada parcial de critérios selecionados de acessibilidade, alinhados às diretrizes WCAG 2.1 nível AA (W3C, 2018), integrada ao conjunto de testes do projeto, o que atende parcialmente ao requisito não funcional RNF10. Também foram introduzidos utilitários de acessibilidade para controle de foco em modais, atraso de disparo em campos de busca e exposição de texto para leitores de tela. O padrão de tabela dinâmica com cabeçalho fixo e regiões acessíveis foi adotado como referência para todos os componentes de listagem paginada da plataforma.

As decisões descritas acima - divisão em camadas, gerenciamento de estado, autenticação por *cookie* e governança visual - foram orientadas por três critérios recorrentes: adequação funcional ao domínio da contabilidade em emergia, maturidade do ecossistema de cada tecnologia e coerência entre camadas. A Tabela 14 consolida essas escolhas por camada, com as alternativas consideradas e a justificativa de cada decisão.

Tabela 14 - Escolhas tecnológicas da plataforma e justificativas

Camada	**Tecnologia adotada**	**Alternativas consideradas**	**Justificativa da escolha**
Backend runtime	Node.js	Python/Django; Java/Spring Boot	Coerência de ecossistema com o frontend em TypeScript; modelo de I/O não bloqueante adequado a múltiplos usuários simultâneos; compartilhamento de ecossistema npm entre as camadas.
Backend framework	Express.js	Fastify; NestJS	Minimalismo e flexibilidade; configuração direta de middleware JWT e CORS; maturidade documental adequada ao perfil do projeto.
Banco de dados	MySQL 8 via Prisma ORM v7	PostgreSQL; MongoDB	Natureza relacional dos dados em emergia (UEV → Flow → Point → Chart); garantias ACID para integridade referencial; migrações versionadas e auditáveis.
Segurança HTTP	Helmet + CORS restrito + express-rate-limit + Zod	Implementação manual; outras combinações de middleware	Conjunto suficiente para headers de segurança, restrição de origens, limitação de taxa e validação estrutural dos dados de entrada.
Frontend framework	React 18 + TypeScript	Vue 3; Angular 16	Tipagem estática das entidades do domínio; ecossistema maduro para SPA científica; compatibilidade com a interface adotada.
Empacotador	Vite	Webpack; Parcel	Hot Module Replacement rápido no desenvolvimento; build de produção otimizado; suporte nativo a TypeScript strict.
Gerenciamento de estado	React Context API + Zustand	Redux; Recoil	Context API suficiente para a hierarquia de providers do domínio; Zustand adequado a stores de alta frequência; separação clara de responsabilidades.
Renderização do diagrama	Canvas 2D API (HTML5) nativo	D3.js; Plotly; Three.js	Controle total sobre a geometria equilátera; independência de bibliotecas externas para lógica geométrica crítica; meta de engenharia de 500 ou mais pontos a 60 FPS, não aferida experimentalmente nesta tese.
Autenticação	JWT (access + refresh token)	Sessões server-side	Estratégia stateless coerente com arquitetura SPA + API REST; interceptação automática do token em requisições autenticadas; coexiste com OAuth como mecanismo de autenticação federada (Google e GitHub) na camada de identidade, conforme a Figura 8.

Deploy frontend	Azure Static Web Apps	Vercel; Netlify	Distribuição global via CDN; configuração nativa de roteamento SPA; integração com pipeline de CI/CD.

Fonte: Autor (2026).

3.6 Implementação dos módulos

A plataforma é estruturada em nove módulos funcionais interdependentes. A Tabela 15 sintetiza a responsabilidade de cada módulo e seus principais recursos de implementação, conforme a versão atual do sistema.

Tabela 15 - Módulos da plataforma, responsabilidades e componentes principais

Módulo	**Responsabilidade**	**Recursos principais de implementação**
Autenticação	Registro, login, refresh, recuperação de senha, perfil e proteção de rotas.	Endpoints de autenticação e recuperação; AuthContext e UserContext; interceptador Axios com renovação automática de sessão via cookie HttpOnly em resposta a erros 401.
Gestão de Charts	CRUD de Charts; seleção e carregamento automático de dados associados.	Endpoints de Chart; ChartContext; barra lateral com lista de estudos e ações.
Gestão de Points e Flows	CRUD de Points e Flows; cálculo de emergia por Flow; atualização de totais R/N/F por Point.	Endpoints de Points e Flows; PointContext e PointDataContext; busca paralela dos dados associados.
Gestão de Outputs	CRUD de saídas (Outputs) associadas ao Point e derivação automática do UEV por saída.	Entidade SystemOutput; API REST dedicada; estado de Outputs isolado por Point; interface de múltiplas saídas; parser numérico compatível com a entrada da aplicação; função calculateUev(); tratamento de quantidade inválida; resposta imediata na interface.
Biblioteca de UEVs	Listagem paginada com busca debounced; cadastro de novos UEVs com validação de rastreabilidade.	Endpoint de biblioteca pública; PublicUevContext; formulário de cadastro com validação obrigatória.
Análise comparativa de UEVs	Simulação determinística de substituição de UEV; comparação entre registros bibliográficos alternativos; comparação entre baselines emergéticas globais; execução local, sem persistência.	Cálculo client-side do coeficiente de sensibilidade e dos fatores relativos; reuso do PublicUevContext; nenhuma rota de escrita é acionada.

Diagrama ternário	Renderização do triângulo equilátero, linhas de recurso, curvas de sustentabilidade, pontos, composição agregada, navegação e exportação.	Canvas 2D nativo; submódulos especializados de desenho; gestão de linhas por contexto dedicado.
Indicadores em emergia	Cálculo e exibição de EYR, EIR, ELR, ESI e %R por Point, com apoio contextual de fórmulas.	Cálculo na camada de apresentação; tratamento explícito de divisões por zero; visualização gráfica integrada.
Exportação/Importação	Exportação em JSON e PNG; importação com detecção de versão e controle de taxa.	Rotinas dedicadas de exportação/importação; geração de PNG; esquema JSON versionado.

Fonte: Autor (2026).

Módulo de cálculo em emergia: operações e tratamento de casos limite. O cálculo em emergia na plataforma opera em três níveis: *Flow* (NÍVEL 1), *Point* (NÍVEL 2) e *Output* (NÍVEL 3). O NÍVEL 3 implementa exclusivamente a derivação matemática *Y*/*Qj* sobre a emergia integral do *Point*; não constitui mecanismo de alocação *multi-output*. Consequentemente, regras de alocação econômica, mássica ou energética, bem como a distinção algébrica entre coprodutos e *splits*, cuja relevância prática Ingwersen (2011) demonstrou em um caso real de mineração, não são inferidas nem executadas pelo módulo de *Outputs*. Em redes de processos interconectados, coprodutos, divisões e retroalimentações exigem regras dependentes da topologia e dos caminhos emergéticos; Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018) implementaram computacionalmente essas regras por meio de busca de caminhos e Track-Summing Method, operações que não são inferidas nem executadas pelo módulo de *Outputs* do *TRIGES*.

No nível do *Flow* (NÍVEL 1), a emergia individual é calculada no momento do cadastro: $Emergia_i = valor_i \times UEV_i$ (equação (3a) do Capítulo 2), onde $valor_i$ é a quantidade do fluxo na unidade de referência, e UEV_i é a transformidade registrada no cadastro do *Flow* (campo *transformidade_ptpd*). Os dados primários do *Flow*, *valor_ptpd e transformidade_ptpd*, são persistidos imediatamente no banco de dados; a emergia individual não constitui um campo persistido independente; deriva deterministicamente pelo produto entre esses dois valores. No nível do *Point* (NÍVEL 2), os totais *R*, *N* e *F* são obtidos pelo *backend* por *agregação SQL* sob demanda, como somas das emergias dos *Flows* classificados em cada categoria – *SUM* (*valor_ptpd* × *transformidade_ptpd*) agrupado por *Point* e classe *R*/*N*/*F* -, calculada no momento da consulta dos dados do *Point*, com $Y = R + N + F$ (equação (3b)).

Os campos *r_ptp, n_ptp e f_ptp* permanecem no esquema físico da entidade *Point* como campos legados, mas não constituem a fonte operacional desses totais na versão avaliada da plataforma. Assim, no *backend* persistem os dados primários do *Flow* (NÍVEL 1), deriva deterministicamente a emergia individual pelo produto entre esses dados e derivam por agregação, a cada consulta, os totais por *Point* (NÍVEL 2), o que preserva a auditabilidade do inventário que sustenta os indicadores a partir de uma única fonte de verdade - os *Flows* persistidos - sem duplicação de estado nos totais agregados. No nível do *Output* (NÍVEL 3), para cada saída j declarada pelo analista, o UEV da saída é derivado como $UEV_{out,j} = \frac{Y}{Qj}$ (equação (3c)), em que Y é o total do *Point* definido no NÍVEL 2 e Q_j é a quantidade física informada para a saída. O NÍVEL 3 depende dos níveis anteriores, mas não os altera: alterar um *Output* não modifica *R*, *N*, *F* ou *Y* do *Point*; alterar um *Flow* pode alterar *Y* e, por decorrência da relação matemática, recalcular as UEVs de todos os *Outputs* daquele *Point* - sem que isso implique duplicação de estado persistido, pois o UEV de *Output* não é armazenado.

No nível dos indicadores, o módulo de indicadores executa na camada de apresentação as equações (4) a (8) sobre os totais *R*, *N* e *F* de cada *Point*: $ELR = \frac{N+F}{R}$; $EYR = \frac{Y}{F}$; $EIR = \frac{F}{R+N}$; $ESI = \frac{EYR}{ELR}$; $\%R = \left(\frac{R}{Y}\right) \times 100$. Os casos-limite de divisão por zero são tratados explicitamente: F = 0 produz EYR = N/A ($\frac{Y}{F}$ indefinido); nesse caso, $EIR = \frac{F}{R+N}$ permanece bem definido e igual a 0, desde que R + N > 0, e não é tratado como N/A. R = 0 produz ELR = N/A e ESI = N/A; R+N = 0 produz EIR = N/A. Nesses casos, o módulo exibe o texto N/A na célula correspondente, em vez de propagar *Infinity* ou NaN para a interface. Em termos arquiteturais, isso significa que o *frontend* deriva e exibe indicadores e projeções gráficas a partir dos totais agregados pelo *backend* a partir dos *Flows* persistidos, sem alterar os dados de base.

O campo de valor do *Flow* mantém temporariamente a representação textual informada pelo usuário durante a edição, admite as notações 1.234,56 (padrão brasileiro), 1234.56 (padrão americano) e 4.8e12 (notação científica) sem exigir formato único. A conversão é realizada no evento *onBlur* pela função *parseFlexibleNumber*(), que normaliza essas notações para um valor numérico. A representação textual original não é tratada nesta tese como dado persistente: para fins de cálculo e armazenamento, utiliza-se exclusivamente o valor numérico resultante do *parsing*, posteriormente persistido no campo *valor_ptpd*, do tipo *FLOAT* (Seção 3.6 detalha a

distinção de precisão entre os campos legados de *Flow*/*Point* e a biblioteca de UEVs). Essa opção de projeto evita interrupções no fluxo de entrada de dados numéricos de grande magnitude, como os valores de emergia típicos (ordem de 10^{12} a 10^{24} sej), e é suficiente para a reprodução da contabilidade em emergia, cujo interesse recai sobre o número efetivamente utilizado no cálculo; a preservação da *string* originalmente digitada seria necessária apenas para fins de auditoria do processo de entrada ou de proveniência da representação lexical, o que não integra o escopo desta tese.

Os campos *valor_ptpd* e *transformidade_ptpd* da entidade *Flow*, e os campos *r_ptp, n_ptp e f_ptp* da entidade *Point* são armazenados no *schema MySQL* como *FLOAT* (precisão simples, definidos no *schema Prisma* como *Float? @db.Float*, não como *DOUBLE*). Esses cinco campos constituem, portanto, uma camada legada de precisão simples do esquema físico. Já o campo *uev* da entidade UEV (biblioteca pública) e o campo *value* da entidade *SystemOutput* são armazenados como *DOUBLE* (precisão dupla, IEEE 754), definidos sem o modificador *@db.Float* no *schema Prisma*. Essa distinção precisa ser explicitada, porque ela compromete a homogeneidade de precisão que uma leitura apressada do pipeline de cálculo poderia supor: *FLOAT* oferece aproximadamente de 6 a 7 dígitos decimais significativos, contra 15 a 16 dígitos do *DOUBLE*. Para a faixa dinâmica de 10^{12} *a* 10^{24} *sej* observada nesta tese, essa diferença de precisão é relevante e deve ser registrada como propriedade real da implementação, não idealizada. O *parsing* de entrada (função *parseFlexibleNumber()*) e o cálculo das equações (4) a (8) operam em *JavaScript/Node.js* sob IEEE 754 de precisão dupla nativamente, independentemente do tipo de armazenamento no banco; entretanto, o valor efetivamente persistido em valor*_ptpd, transformidade_ptpd, r_ptp, n_ptp e f_ptp* sofre o truncamento de precisão do *FLOAT* no momento da gravação e da releitura desses campos, ainda que os cálculos em memória ocorram em precisão dupla antes da persistência. A agregação sob demanda por *SQL* diretamente sobre os *Flows* (Seção 3.5) evita que os totais *R*, *N* e *F* efetivamente utilizados no cálculo dos indicadores e na renderização dependam dos campos legados *r_ptp, n_ptp e f_ptp*, e os cálculos subsequentes são executados pela aplicação em precisão dupla; no entanto, essa agregação sob demanda não recupera os dígitos já truncados no momento da persistência de valor*_ptpd e transformidade_ptpd*, de modo que a precisão dos dados de *Flow* permanece limitada pela representação FLOAT, utilizada em seu armazenamento. A biblioteca de UEVs (campo *uev*) e a nova entidade *SystemOutput* (campo value), por não sofrerem essa limitação, foram deliberadamente especificadas como *DOUBLE*.

Dois problemas funcionais foram identificados e corrigidos durante o desenvolvimento, e seu registro é metodologicamente relevante no contexto do *DSR*, pois evidencia que o processo de construção do artefato foi iterativo e reflexivo, com diagnóstico de causa raiz e correção documentada.

O primeiro problema foi um erro *HTTP 500* no *endpoint* de criação de *Chart*. A causa raiz foi identificada como perda de contexto do controlador na vinculação do *handler* de rota, o que faz com que o método perca a referência ao objeto ao ser invocado pelo servidor. A correção adotada consistiu em instanciar um único objeto por controlador e vincular explicitamente os *handlers* às rotas. O *endpoint* foi validado *end-to-end* após a correção, com retorno 201 e confirmação da criação no banco de dados.

O segundo problema foi a ausência de pontos no diagrama ternário: durante a renderização, todos os pontos apareciam no centro do triângulo. A investigação revelou que os campos *r_ptp, n_ptp* e *f_ptp* chegavam zerados ao componente de renderização, porque o merge entre os *endpoints* de carregamento, um responsável pelos metadados e outro pelos totais em emergia, não estava implementado. A correção consistiu na introdução de uma etapa de consolidação memorizada dos dois conjuntos de dados antes da projeção gráfica.

O diagrama ternário é renderizado inteiramente no *frontend* sobre um elemento Canvas 2D nativo, pelo componente gráfico principal e seus submódulos especializados. A escolha pelo Canvas 2D, em vez de bibliotecas de visualização de propósito geral, é deliberada: garante controle total sobre a geometria equilátera e sobre a geração algébrica dos elementos analíticos, com meta de engenharia de 500 ou mais pontos a 60 FPS, não aferida experimentalmente nesta tese. Como o elemento <*canvas*> não expõe estrutura semântica ao *DOM*, a acessibilidade do diagrama é assegurada por três mecanismos complementares: atributo *role =“img”* e *aria-label* descritivo no elemento, e uma tabela visualmente oculta (mas acessível a leitores de tela) que espelha todos os dados plotados, o que constitui mecanismos de acessibilidade do componente gráfico e contribui para o atendimento parcial ao RNF10 mesmo em um componente gráfico não nativamente semântico.

O primeiro passo da renderização é a consolidação dos dados, realizada por memorização no componente gráfico principal, que combina os dados de *Points* identificador, nome, cor e visibilidade com os totais em emergia (*r_ptp, n_ptp, f_ptp*) provenientes da *API*. Esse merge é necessário, uma vez que requisições distintas retornam conjuntos de dados

complementares: uma fornece metadados dos *Points* e outra fornece os totais *R*, *N* e *F* agregados. A ausência dessa consolidação resultava em *r_ptp, n_ptp* e *f_ptp* zerados na renderização, problema posteriormente corrigido.

As coordenadas cartesianas de cada ponto no plano do Canvas são calculadas a partir das coordenadas baricêntricas normalizadas $(\bar{r}, \bar{n}, \bar{f})$ definidas na equação (9) do Capítulo 2. Na implementação, o módulo *DesenhaPontos.ts* transforma as composições normalizadas em coordenadas lógicas por $x_l = \frac{\bar{F}-\bar{N}}{\sqrt{3}}$ e $y_l = \bar{R}$. Em seguida, a função *convertToPixel()*, definida em *GraficoUtils.ts*, converte essas coordenadas em posições no Canvas. Como o eixo vertical do Canvas cresce de cima para baixo, a transformação realiza uma inversão vertical. Considerando *center_x* e *center_y* como a posição, em *pixels*, do centróide do triângulo renderizado e *scale* como a escala vertical utilizada na conversão, a fórmula de projeção resultante é:

$$x = center_x + \frac{\bar{F} - \bar{N}}{\sqrt{3}} \cdot scale \qquad (11a)$$

projeção horizontal

$$y = center_y + \left(\frac{1}{3} - \bar{R}\right) \cdot scale \qquad (11b)$$

projeção vertical onde $center_x$ e $center_y$ são as coordenadas do centróide do triângulo no Canvas e *scale* é o fator de escala derivado das dimensões do Canvas, relacionado ao lado L do triângulo por $scale = \frac{L\sqrt{3}}{2}$. Essa fórmula corresponde às equações (11a) e (11b) do Capítulo 2, já centradas no centróide do triângulo, após a mudança de origem, a aplicação da escala e a inversão do eixo vertical do Canvas em relação ao plano cartesiano convencional; sua equivalência com a forma baricêntrica não centrada (equações 10a e 10b), expressa em termos do lado L do triângulo a partir do vértice inferior esquerdo, foi estabelecida algebricamente na Seção 2.4. A correspondência numérica entre a implementação e essas equações é verificada no Capítulo 4, seção de verificação geométrica.

As curvas de sustentabilidade (ESI = k) são geradas por avaliação direta da equação algébrica (13) do Capítulo 2 - $ESI = \frac{\bar{R}}{\bar{F}(1-\bar{R})} = k$ em uma grade densa de valores de $\bar{R} \in (0, 1)$ com incremento de 0,001. Para cada valor de $\bar{r}$, o valor de $\bar{f}$ que satisfaz a condição $ESI = k$

é calculado algebricamente como $\bar{f} = \frac{\bar{R}}{k(1-\bar{R})}$; o valor de n é obtido por $\bar{N} = 1 - \bar{R} - \bar{F}$. Os pares $(\bar{R}, \bar{F})$ válidos (onde $n \geq 0 \, e \, f \geq 0$) são convertidos para coordenadas de Canvas e unidos por segmentos de reta, o que produz curvas visualmente suaves sem uso de funções trigonométricas aproximadas. O ponto de composição em emergia agregada, denominado *Simergy Point* na interface da plataforma, é calculado pela equação (14) do Capítulo 2, como média ponderada das coordenadas baricêntricas dos *Points* visíveis com pesos iguais aos valores de *Y* de cada *Point*.

3.7 Procedimentos de avaliação

Essa correspondência com as equações do Capítulo 2, assim como a implementação dos módulos de UEV, *Flow* e indicadores descrita nas seções anteriores, precisa ser verificada empiricamente antes de sustentar qualquer conclusão sobre a plataforma. Os procedimentos adotados compreendem duas partes: a definição das dimensões de avaliação e a seleção dos estudos de caso utilizados na comparação numérica e na verificação geométrica, detalhadas no Capítulo 4.

Três procedimentos foram adotados para avaliar a plataforma desenvolvida, cada um com escopo e critérios de aceitação distintos.

A comparação numérica verifica se os valores de R, N, F, Y, EYR, EIR, ELR, ESI e %R calculados pela plataforma coincidem com os valores publicados na literatura para os mesmos sistemas e os mesmos dados de entrada. O limiar de 0,1% foi adotado como critério operacional de convergência estrita quando a precisão dos dados publicados permite sua aplicação. Esse valor foi calibrado para ser compatível com a resolução decimal predominante nas tabelas de indicadores publicadas na literatura em emergia, tipicamente entre duas e quatro casas decimais ou algarismos significativos, de modo que desvios de até 0,1% permaneçam, em geral, dentro do ruído de arredondamento esperado da própria fonte e não representem tolerância arbitrária desvinculada da precisão dos dados comparados. Esse rigor contrasta com tolerâncias adotadas em outras formas de validação de modelos em emergia, como o critério de até 5% de desvio empregado por Wu, Fan e Lu (2021) na validação de um modelo de *System Dynamics* acoplado a indicadores emergéticos, ainda que se trate de comparação entre naturezas distintas, reprodução aritmética determinística nesta tese e ajuste de modelo preditivo naquele estudo. Antes da classificação do resultado, contudo, foi examinada a resolução numérica da

fonte de referência, com a inclusão do número de algarismos significativos, dos arredondamentos e da consistência entre valores absolutos, percentuais e indicadores publicados. Quando essa resolução não permite reprodução dentro de 0,1%, desvios superiores ao limiar não são automaticamente classificados como falha do artefato: são analisados quanto à sua origem antes da classificação, conforme os graus de aderência definidos a seguir. Essa distinção é necessária para interpretar a comparação numérica sem atribuir ao artefato divergências decorrentes exclusivamente da resolução ou da consistência da fonte de referência. O desvio relativo e o desvio absoluto entre um valor calculado pela plataforma (*xTRIGES*) e o correspondente valor publicado (*xfonte*) são definidos, respectivamente, por drel = |xTRIGES − xfonte| / |xfonte| × 100, com xfonte ≠ 0, expresso em porcentagem, e por dabs = |xTRIGES − xfonte|, utilizado quando xfonte = 0 ou quando a grandeza publicada não admite razão interpretável.

Dentro da comparação numérica, distinguem-se quatro categorias de aderência, definidas a priori e aplicadas de forma consistente a todos os estudos de caso, que separam a manifestação observada do desvio da causa a ele atribuída. Considera-se convergência estrita o atendimento ao limiar de até 0,1% de desvio relativo, quando compatível com a resolução da fonte. Quando o desvio relativo supera esse limiar, três desfechos são possíveis. Classifica-se como divergência explicada o desvio cuja manifestação e origem possam ser demonstradas por arredondamento, truncamento, resolução limitada dos valores publicados, uso de UEV distinto ou divergência de modelagem, mediante análise documentada da fonte, sem alteração da interpretação ou da posição espacial dos sistemas no diagrama ternário. Classifica-se como divergência não conclusiva o desvio cuja origem não possa ser demonstrada com os dados publicados disponíveis, hipótese não descartada, mas também não comprovável a partir do material examinado. Classifica-se como inconsistência estrutural da fonte a violação demonstrável de uma identidade matemática, como $Y = R + N + F$, ou a incompatibilidade interna entre dados, fórmulas e resultados publicados na própria fonte de referência, independentemente do algoritmo da plataforma; esses casos são analisados separadamente, conforme detalhado nas Seções 4.3.4 (EC2) e 4.3.9 (EC7). Nenhuma divergência explicada é reclassificada automaticamente como convergência, e nenhuma causa é atribuída aos autores originais sem demonstração documental; não se utiliza um segundo limiar numérico universal.

A verificação funcional examina se cada requisito funcional (RF01 a RF10 e RF12 a RF15) está implementado e operacional segundo os critérios de aceitação da Tabela 11. Para

cada requisito, o critério de aceitação é verificado por procedimento de teste estruturado: os dados de entrada são definidos explicitamente, a operação é executada na plataforma e o resultado obtido é comparado com o resultado esperado. Essa verificação é apresentada no Capítulo 4, na Seção 4.2, sob a forma de tabela de verificação de requisitos. Um requisito é classificado como integralmente verificado quando todos os seus critérios de aceitação aplicáveis foram diretamente testados, com a inclusão de comparação numérica ou de verificação geométrica quando pertinente; quando apenas parte dos critérios aplicáveis foi testada, ou quando a evidência disponível corresponde a um teste funcional isolado, o requisito é classificado como parcialmente verificado. Especificamente para o RF15, o protocolo de verificação funcional compreende doze etapas: (i) confirmação de que um *Point* sem *Output* algum retorna lista vazia; (ii) criação de um *Output*; (iii) persistência do *Output* após *reload* completo da interface; (iv) criação de múltiplos *Outputs* no mesmo *Point*; (v) cálculo correto do UEV de cada *Output* como *Y*/*Q*; (vi) independência entre as UEVs de *Outputs* distintos do mesmo *Point*; (vii) invariância dos UEVs e do *Total Emergy* sob alternância dos filtros de visualização *R*, *N*, *F* e *All*; (viii) edição da quantidade *Q* de um *Output*; (ix) recálculo imediato do UEV correspondente após a edição; (x) exclusão de um *Output*; (xi) isolamento de *Outputs* entre *Points* distintos; e (xii) integridade referencial na exclusão do *Point*, com remoção em cascata de seus *Outputs* subordinados.

A verificação da coerência geométrica examina se os elementos analíticos do diagrama ternário são geometricamente corretos em relação às equações do Capítulo 2. Especificamente: (a) para dez pontos de referência com composições ($\bar{N}, \bar{R} e \bar{F}$) e valores de *ESI* conhecidos, verifica-se que os pontos estão posicionados na região correta do diagrama; (b) para cinco pontos sobre as curvas *ESI = 1 e ESI = 5*, verifica-se que as curvas geradas pela equação (13) passam sobre esses pontos com erro posicional máximo de 1 *pixel* em resolução de 560×560; (c) para três conjuntos de dois ou mais *Points* com composições conhecidas, verifica-se que o ponto de composição em emergia agregada calculado pela equação (14) coincide com a posição esperada.

Sete estudos de caso foram selecionados para a comparação numérica, segundo os critérios de disponibilidade de dados publicados suficientes para reconstruir, total ou parcialmente, as grandezas avaliadas, publicação explícita dos indicadores, cobertura de domínios distintos e inclusão de ao menos um caso com diagrama ternário publicado. A Tabela 16 descreve os estudos selecionados.

Tabela 16 - Estudos de caso selecionados para a avaliação

Caso	**Sistema avaliado**	**Referência**	**Domínio**	**Nível de reconstrução**
EC1	Sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália	Lefroy e Rydberg (2003); Giannetti *et al*. (2007)	Agricultura	Inventário item a item reconstruído
EC2	Cotratamento de águas residuárias urbanas e águas ácidas	Bravo Toledo *et al*. (2024)	Saneamento ambiental	Agregados *R*, N, *F* publicados; cadastro granular auditado
EC3	Produção de bambu gigante, Brasil/Austrália/China	Bonilla *et al*. (2010)	Agricultura/silvicultura	Inventário item a item reconstruído
EC4	Embalagens de bebida, PET e alumínio, virgens e recicladas	Almeida *et al*. (2010)	Ecodesign/seleção de materiais	Inventário item a item reconstruído
EC5	Nove províncias do Pan-Pearl River Delta	Li *et al*. (2014)	Avaliação territorial	Agregados *R*, *N*, *F* publicados por província
EC6	Sistema milpa familiar	Avalos-Rangel *et al*. (2021)	Agricultura	Inventário item a item reconstruído
EC7	Planta de produção de bio-hidrogênio (auditoria documental)	Ma *et al*. (2013)	Auditoria documental	Três camadas documentais alternativas

Fonte: Autor (2026).

Os sete estudos possuem níveis distintos de granularidade documental e variam entre inventário reconstruído item a item e agregados *R*, *N* e *F* publicados diretamente. Em todos os casos, a comparação numérica é realizada no nível de grandeza que pôde ser reconstruído a partir da fonte, sem inferir ou completar dados físicos de entrada não publicados.

O Quadro 7 explicita, para cada estudo de caso, a cobertura efetiva por componente da cadeia de cálculo, evita presumir que a disponibilidade de agregados *R*, *N* e *F* publicados valide, por si só, a seleção de UEV ou a agregação item a item do inventário físico original.

Quadro 7 - Cobertura dos estudos de caso por componente da cadeia de cálculo

Estudo	Transcr. de fluxos	Aplic. de UEV	Agregação R/N/F	Cálculo de Y	Indicadores	Coordenadas	Limitação documental
EC1	Reconstruído item a item	Avaliado	Avaliado indiretamente (agregados corrigidos externamente)	Avaliado	Avaliado (0,63%)	Avaliado	Execução exploratória sem a regra; execução oficial com agregados corrigidos externamente
EC2	Agregados publicados	Não avaliado	Avaliado a partir de agregados publicados	Avaliado	Avaliado: 12 comparações com convergência estrita e 4 inconsistências estruturais da fonte	Avaliado	Inconsistência interna do artigo (Tabela 5)
EC3	Reconstruído item a item	Avaliado	Avaliado, incluindo cenário 4b (classificação externa)	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Duas inconsistências numéricas do artigo
EC4	Reconstruído item a item	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Recalculado externamente (sem captura de Indicators)	Avaliado	Quatro divergências documentais do artigo
EC5	Agregados publicados	Não avaliado	Avaliado por província	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Ponto agregado regional não executado
EC6	Reconstruído item a item	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Avaliado	Regras de coprodutos e splits não testadas no EC6; o RF15 foi avaliado separadamente conforme o protocolo funcional definido para o requisito.
EC7	Camadas documentais alternativas	Avaliado	Avaliado em três camadas	Avaliado	Avaliado (divergência do artigo em EYR/ESI)	Avaliado	Fechamento de F não coincide com a Tabela 3

Fonte: elaborado pelo autor a partir das descrições dos estudos de caso apresentadas nesta seção e dos resultados do Capítulo 4.

Entre os sete estudos, a transcrição item a item do inventário físico e a aplicação de UEV foram avaliadas em cinco casos – EC1, EC3, EC4, EC6 e, em três camadas documentais alternativas, EC7). Nos EC2 e EC5, a fonte disponibiliza diretamente os agregados *R*, *N* e *F*, sem inventário físico item a item, e a agregação, o cálculo de Y e a transformação de coordenadas baricêntricas em cartesianas decorrem diretamente desses agregados, sem constituir teste numérico independente da etapa de transcrição.

Um exemplo adicional, mais compacto, aparece em Almeida *et al*. (2012). Para o aterro sanitário sem recuperação energética, a soma independente das linhas publicadas na tabela de emergia do artigo produz $R \approx 1{,}51 \times \frac{10^{16} sej}{ano}$, $N \approx 7{,}53 \times \frac{10^{13} sej}{ano}$ e $F \approx 2{,}06 \times \frac{10^{19} sej}{ano}$, dos quais decorre $ELR = \frac{N+F}{R} \approx 1{,}36 \times 10^{3}$, valor próximo, mas não idêntico, ao ELR = 367,7 impresso na tabela de indicadores do artigo. O EYR recalculado (≈ 1,00) reproduz o valor publicado (1,0). É plausível, embora não demonstrável apenas a partir do material disponível, que o valor impresso de ELR tenha perdido o algarismo inicial "1" (1367,7 → 367,7); trata-se, entretanto, de hipótese, não de correção. Para o sistema com geração elétrica, o mesmo procedimento produz EYR ≈ 13,1 e ELR ≈ 0,27, próximos aos valores publicados (12,9 e 0,3, respectivamente), mas o ESI impresso (50,8) tampouco corresponde exatamente à razão entre os valores publicados de EYR e ELR ($\frac{12{,}9}{0{,}3} = 43$), o que evidencia que os indicadores impressos na Tabela 3 do artigo não são mutuamente reprodutíveis apenas a partir de si mesmos, com a resolução decimal apresentada. O caso reforça que a reconstrução dos resultados exige verificar a consistência entre dados elementares, totais e indicadores, e não apenas transcrever resultados publicados.

O procedimento de comparação numérica foi aplicado segundo a granularidade documental de cada estudo. Na primeira etapa, foram transcritos os agregados *R*, *N*, *F* e *Y*, as composições percentuais e os indicadores efetivamente disponibilizados pelas fontes, sem inferência de fluxos físicos ou UEVs individuais não publicados. Na segunda etapa, foi registrada a baseline declarada por cada estudo e mantida a escala numérica original dos agregados utilizados na comparação. A seleção e a aplicação item a item dos UEVs foram avaliadas nos estudos em que o inventário físico estava disponível com granularidade suficiente (EC1, EC3, EC4, EC6 e, parcialmente, EC7); nos demais (EC2, EC5), a fonte disponibiliza diretamente os agregados *R*, *N* e *F*, sem inventário físico item a item. Na terceira etapa, os dados reconstruíveis foram cadastrados e processados no *TRIGES* conforme o nível de informação de

cada caso. Na quarta etapa, os resultados derivados pela plataforma foram comparados com os valores publicados, mediante cálculo do desvio e aplicação das categorias de aderência definidas nesta seção.

Divergências superiores a 0,1% classificadas como divergência explicada decorrem de um entre quatro fatores diagnósticos: (i) diferença de arredondamento, quando os dados de entrada são os mesmos, mas o número de casas decimais dos valores publicados é insuficiente para reprodução exata; (ii) diferença de UEV ou de baseline, quando os autores utilizaram um valor ligeiramente distinto do disponível na biblioteca da plataforma, situação documentada explicitamente; (iii) diferença de modelagem, quando há divergência na classificação de um fluxo como *R*, *N* ou *F*, situação que exige ajuste manual e é discutida no Capítulo 4; (iv) discrepância entre valores absolutos e percentuais, quando os percentuais impressos na fonte não correspondem à composição implícita nos próprios valores absolutos da mesma tabela. A inconsistência estrutural da fonte, quando o valor de *Y*, reportado na fonte viola a identidade $Y = R + N + F$ em relação aos absolutos publicados, permanece como classe própria de resultado, definida anteriormente nesta seção, e não como um desses fatores diagnósticos. Essa taxonomia dos fatores diagnósticos é em si uma contribuição metodológica: torna auditável o processo de comparação numérica, evidencia os pontos em que a padronização da plataforma pode diferir de decisões individuais dos autores originais, distingue em todos os casos limitações da fonte de referência de eventuais falhas do algoritmo da plataforma. A necessidade de reconstruir resultados a partir dos dados e fórmulas, em vez de apenas transcrever valores publicados, também pode ser observada em Pan *et al*. (2021). No artigo, as expressões de *EIR* e *ELR* apresentadas na tabela inicial de indicadores diferem das fórmulas exibidas posteriormente junto aos resultados; a substituição dos valores publicados mostra que os resultados numéricos são consistentes com as expressões da tabela de resultados, não com as da tabela inicial; trata-se de uma inconsistência interna de formulação entre as duas tabelas, não de um erro isolado de cálculo. O exemplo reforça que reprodutibilidade computacional requer preservação explícita da relação entre definição, dado de entrada, fórmula e valor derivado, e que uma referência bibliográfica não deve ser tratada apenas como fonte de números finais.

Ma *et al*. (2013) foram cadastrados e executados no *TRIGES* como Estudo de Caso 7, estruturado como auditoria documental em três camadas, conforme apresentado na Seção 4.3.9.

A avaliação apresentada nesta tese está sujeita a quatro categorias clássicas de ameaças à validade, examinadas explicitamente para delimitar o alcance das conclusões. Quanto à

validade de construto, os critérios adotados - convergência numérica dentro de tolerância declarada, verificação funcional por critério de aceitação mensurável e coincidência posicional no diagrama ternário - medem diretamente a correção do artefato em relação às equações do Capítulo 2, mas não avaliam a adequação epistemológica dos próprios valores de UEV empregados como referência, nem a qualidade metodológica dos estudos originais. Quanto à validade interna, os sete estudos de caso empregam dados publicados em tabelas impressas, sujeitas a arredondamento, a inconsistências de transcrição e, em ao menos um caso (Seções 4.3.4 e 4.3.9), a divergências internas na própria fonte. A taxonomia de divergências (Seção 3.7) e a distinção entre convergência estrita, divergência explicada, divergência não conclusiva e inconsistência estrutural da fonte mitigam, mas não eliminam, o risco de atribuir a erro do artefato o que é limitação da fonte, ou vice-versa. Quanto à validade externa, os sete estudos de caso cobrem domínios distintos (agricultura e silvicultura, saneamento ambiental, *ecodesign* e seleção de materiais, avaliação territorial e auditoria documental), mas não esgotam o universo de aplicações da contabilidade em emergia - setores como pecuária, cadeias produtivas industriais complexas e territórios urbanos de grande escala não foram testados, e a generalização das conclusões para esses domínios não está demonstrada. Quanto à validade de conclusão, os critérios de aceitação (0,1% de desvio numérico; 1 *pixel* de erro posicional a 560×560) são adequados para detectar determinados tipos de falha de implementação nos casos testados, mas não demonstram cobertura exaustiva do espaço de composições nem ausência geral de erros; o número de estudos de caso e de pontos de referência geométrica é modesto e a verificação segue lógica determinística de casos direcionados, não inferência estatística com intervalo de confiança ou análise de cobertura do espaço de composições R, N e F. A generalização "o artefato está correto" deve, portanto, ser lida como "o artefato foi correto nos testes realizados", sem extrapolação quantificada para composições não testadas.

Quanto à confiabilidade, os cálculos da plataforma são determinísticos e as entradas estão documentadas, o que permite reprodução por terceiros a partir dos dados publicados; a ausência de teste com usuários externos, entretanto, significa que a reprodutibilidade do procedimento de avaliação em si não foi verificada por avaliador independente. Um risco correlato, nomeado por Wieringa (2014, p. 188) como expectativa do experimentador (*experimenter expectation*), decorre de o mesmo pesquisador ter concebido o artefato e conduzido sua avaliação, o que poderia inclinar a classificação de um desvio para inconsistência estrutural da fonte em vez de falha do artefato. O autor reconhece que o ocultamento

experimental (*blinding*), mecanismo clássico de mitigação desse risco, não é viável em pesquisa de engenharia de software, na qual o experimentador conhece necessariamente a técnica aplicada. A mitigação adotada nesta tese segue, portanto, via alternativa: categorias de aderência definidas a priori (Seção 3.7), aplicadas de forma consistente a todos os estudos de caso, e exigência de demonstração documentada da fonte para toda divergência classificada como explicada ou como inconsistência estrutural, o que reduz, sem eliminar, a margem de discricionariedade na classificação.

Essa característica, automação determinística sem garantia automática de validade dos dados de entrada, não é exclusiva do *TRIGES*. Fonseca *et al*. (2017), ao descreverem uma ferramenta geoinformática para contabilidade em emergia de sistemas hídricos, caracterizam explicitamente seu modelo como determinístico e fortemente dependente da qualidade das bases de entrada. A convergência dessa observação, originada em um domínio de aplicação e arquitetura distinto do desta tese, reforça que a reprodutibilidade computacional, os mesmos dados e regras na produção dos mesmos resultados, é condição necessária, mas não suficiente, para a validade metodológica de um estudo em emergia. A seleção de dados, UEVs e classificações adequados ao sistema estudado permanecem responsabilidade do pesquisador, não do software.

Riscos adicionais, específicos ao escopo desta tese, também são reconhecidos: o requisito RNF03 (desempenho de renderização) não foi submetido a *benchmark* controlado e permanece como meta de engenharia (Seção 3.3); a conformidade a *WCAG AA* (RNF10) foi verificada por auditoria automatizada parcial, não por avaliação de acessibilidade com usuários. A plataforma opera exclusivamente com valores pontuais de UEV, sem propagação probabilística de incerteza (Seção 2.6), de modo que a convergência numérica demonstrada expressa fidelidade do cálculo aos dados de entrada, não exatidão epistemológica desses dados.

Em síntese, a avaliação conduzida nesta tese demonstra a correção do artefato nos testes realizados e dentro do recorte definido, sem afirmar ausência universal de erros nem validade epistemológica dos dados de emergia utilizados como referência.

Essa distinção encontra evidência aplicada em Ingwersen (2011), cuja contabilização emergética determinística foi acompanhada de propagação das incertezas de inventário e dos UEVs, o que resultou em intervalo de confiança substancial mesmo com uma cadeia de cálculo definida.

Adicionalmente, análises documentais auxiliares de consistência interna podem ser realizadas sobre fontes independentes, mediante reaplicação das equações canônicas apresentadas no Capítulo 2 aos dados publicados por essas fontes. Tais verificações têm finalidade de discussão metodológica; quer evidenciar, por exemplo, divergências entre valores publicados e valores recalculados a partir dos mesmos dados de origem. Elas não são contabilizadas como estudos de avaliação da plataforma quando os dados correspondentes não tiverem sido cadastrados nem executados no *TRIGES*. A Seção 4.3.13 aplica esse procedimento aos dados de Karuppiah, Sankaranarayanan e Ali (2022).

3.8 Síntese metodológica

Este capítulo estabeleceu o percurso metodológico completo da pesquisa. O delineamento em DSR posiciona a tese como produção de conhecimento por construção e avaliação de artefato - resposta tecnológica e cientificamente fundada a um problema documentado e reconhecido pela própria comunidade em emergia.

O vocabulário formal da Tabela 9 estabelece correspondência precisa entre os termos técnicos da plataforma (*Chart*, *Point*, *Flow*) e os conceitos em emergia correspondentes, o que previne ambiguidades na leitura dos capítulos de resultados. Os quatorze requisitos funcionais e os onze requisitos não funcionais, com critérios de aceitação mensuráveis, tornam a verificação objetiva e auditável. A delimitação do artefato ao modo *Traditional R*, *N* e *F* é necessária para a coerência metodológica: a tese responde por um núcleo bem delimitado de quatorze requisitos (RF01–RF10, RF12–RF15), efetivamente implementados e avaliados, sem estender suas conclusões a capacidades que não integram o artefato atual.

O modelo de dados com seis entidades inter-relacionadas do domínio em emergia implementa, em nível de banco, os princípios de preservação do valor numérico efetivamente empregado e de rastreabilidade operacional da cadeia de cálculo discutidos no Capítulo 2. A separação entre os dados primários de cada *Flow*, *valor_ptpd e transformidade_ptpd*, persistidos pelo *backend*, e os resultados derivados, com a inclusão da emergia individual, os agregados *R*, *N*, *F* e *Y*, os indicadores e a projeção ternária, descrita nas Seções 3.5 e 3.6, são funcionalmente coerentes com o princípio de separação entre dados persistidos e derivações enunciado na Seção 2.7.

Os três procedimentos - comparação numérica, verificação funcional e verificação geométrica - cobrem as dimensões de qualidade que a plataforma precisa mostrar: exatidão dos cálculos, completude das funcionalidades e correção do diagrama ternário. Os sete estudos de caso asseguram cobertura de domínios distintos, incluem casos com diagrama ternário publicado, documentam no EC3 uma diferença de baseline preservada sem conversão e abrangem comparação numérica e representação ternária em escala territorial multissistema, com o ponto agregado regional que permanece como trabalho futuro (Seção 4.3.7).

Definidos os requisitos, a arquitetura, o modelo de dados e os procedimentos de avaliação, resta verificar em que medida o artefato efetivamente implementado atende a esses critérios metodológicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificar em que medida o artefato implementado atende aos critérios estabelecidos no Capítulo 3 é o objeto deste capítulo.

A exposição organiza-se em seis blocos articulados. O primeiro descreve os resultados do desenvolvimento do software, com foco nas funcionalidades efetivamente implementadas, no modelo de dados operacionalizado e nas interfaces entregues ao usuário. O segundo apresenta a verificação funcional, demonstra que os requisitos definidos no Capítulo 3 foram implementados e estão operacionais. O terceiro reúne a comparação numérica com os sete estudos de caso efetivamente executados na plataforma. O quarto desenvolve a discussão integrada dos estudos de caso, inclui verificações bibliográficas complementares não promovidas a estudo de caso executado e destaca padrões em emergia e implicações metodológicas. O quinto apresenta a verificação da coerência geométrica do diagrama ternário, confirma a correspondência entre as equações do Capítulo 2 e sua implementação computacional. O sexto sintetiza os resultados do capítulo e sua contribuição para a tese.

4.1 Resultados do desenvolvimento do software

Essas três frentes resultam diretamente dos requisitos e da arquitetura definidos no Capítulo 3.

4.1.1 Funcionalidades implementadas

A plataforma *TRIGES* foi desenvolvida como aplicação *web* do tipo *SPA* (*Single Page Application*) e está acessível por navegador sem necessidade de instalação local. O sistema foi estruturado em módulos funcionais interdependentes, em conformidade com a especificação metodológica do Capítulo 3. Nesta seção, o foco recai sobre o que foi efetivamente implementado e disponibilizado ao usuário e não sobre a reapresentação integral da especificação técnica do artefato.

Tabela 17 - Módulos implementados, funcionalidade central e resultado operacional

Módulo	**Funcionalidade central**	**Resultado operacional para o usuário**
Autenticação	Registro, login, recuperação de senha, renovação de sessão, gerenciamento de perfil e proteção de rotas.	Controle de acesso individualizado e manutenção segura da sessão do usuário.
Gestão de Charts	Criação de estudo (*Chart*) com múltiplos subsistemas (*Points*).	Organização hierárquica de estudos em emergia em um único espaço de trabalho.
Gestão de *Points* e *Flows*	Configuração de visibilidade, cor e simetria de cada *Point* no diagrama; cadastro de fluxos *R*, *N* e F com valor numérico e UEV, com input aceitando notação brasileira, americana e científica; emergia calculada automaticamente.	Comparação simultânea de subsistemas em um único espaço de trabalho; eliminação do cálculo manual de emergia por fluxo, com unidade registrada e valor do UEV preservado no *Flow*.
Gestão de *Outputs*	Cadastro persistente de múltiplas saídas (*Outputs*) por *Point*, contendo descrição, quantidade e unidade, com derivação automática da UEV.	Permite ao pesquisador registrar múltiplas saídas de um sistema e obter seu valor unitário de emergia sem cálculo manual, mantendo *Y* derivado integralmente do inventário.
Biblioteca de UEVs	Cadastro de UEV com referência bibliográfica obrigatória, baseline, unidade e classe; busca paginada com *debounce* de 400 ms.	Consulta e inserção de coeficientes de transformidade com rastreabilidade de fonte, reduzindo o uso de UEVs sem origem documentada.
Análise comparativa de UEVs	Simulação de substituição de UEV em um *Flow* (*Variation Scenarios*), comparação entre registros alternativos do mesmo elemento (*UEV Reference Comparison*) e entre baselines globais (*Global Baseline Comparison*), com coeficiente de sensibilidade calculado localmente.	Avaliação exploratória do impacto de escolhas bibliográficas alternativas sobre o sistema, sem comprometer a integridade do inventário persistido (RF14).
Diagrama ternário	Canvas 2D equilátero com pontos, linhas de recurso, curvas ESI, funcionalidade de ponto de composição em emergia agregada, zoom, pan e exportação em PNG.	Visualização analítica interativa da composição em emergia *R*, *N* e *F* e comparação simultânea de múltiplos subsistemas.
Cálculo de indicadores	Cálculo automático de EYR, EIR, ELR, ESI e %R com fórmulas canônicas, *tooltips* explicativos e tratamento explícito de divisão por zero.	Acesso imediato aos indicadores clássicos e à renovabilidade percentual (%R), com sinalização de N/A quando a operação algébrica não é definida.
Exportação e importação	Exportação de *Chart* completo (JSON v2.0), *Point* individual (v1.0) e diagrama ternário (PNG); importação com detecção de versão e *rate limiting*.	Portabilidade e compartilhamento de estudos em formato aberto e versionado, com reimportação para reconstituição estruturada dos dados do estudo.

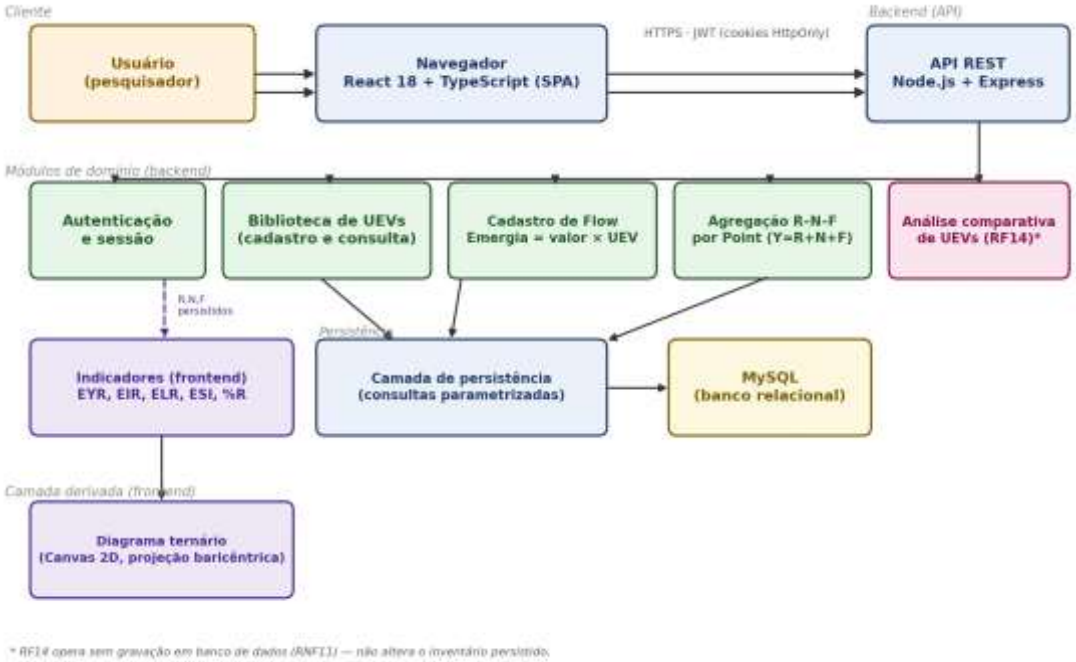
Fonte: Autor (2026).

A integração entre os módulos opera de forma transparente ao usuário. Ao selecionar um UEV da biblioteca para compor um *Flow*, o sistema registra automaticamente o identificador do UEV e o valor unitário utilizado no momento do cadastro, preserva a rastreabilidade bibliográfica sem exigir vinculação manual posterior. Em convergência com o Capítulo 3, o *backend* persiste os dados primários do *Flow*, deriva deterministicamente a emergia individual e deriva por agregação *SQL* sob demanda os totais *R*, *N* e *F* por *Point*, enquanto o *frontend* deriva, a partir desses totais agregados, os indicadores EYR, EIR, ELR, ESI e %R, bem como a projeção gráfica no diagrama ternário. Essa separação mantém resposta imediata na interface sem comprometer a auditabilidade dos dados de base.

4.1.2 Modelo de banco de dados implementado

Antes de detalhar o modelo de dados persistido, situa-se a arquitetura geral que sustenta o título da tese: uma plataforma *web* modular em que cliente, API e persistência são camadas distintas que se comunicam por contratos explícitos (HTTPS, JWT, API REST). A Figura 4 representa essa arquitetura em nível de componentes, mostra como cada módulo funcional descrito na Seção 3.6 se distribui entre *frontend*, *backend* e banco de dados.

Figura 4 - Arquitetura de componentes da plataforma *TRIGES*: distribuição de módulos entre cliente, API e persistência

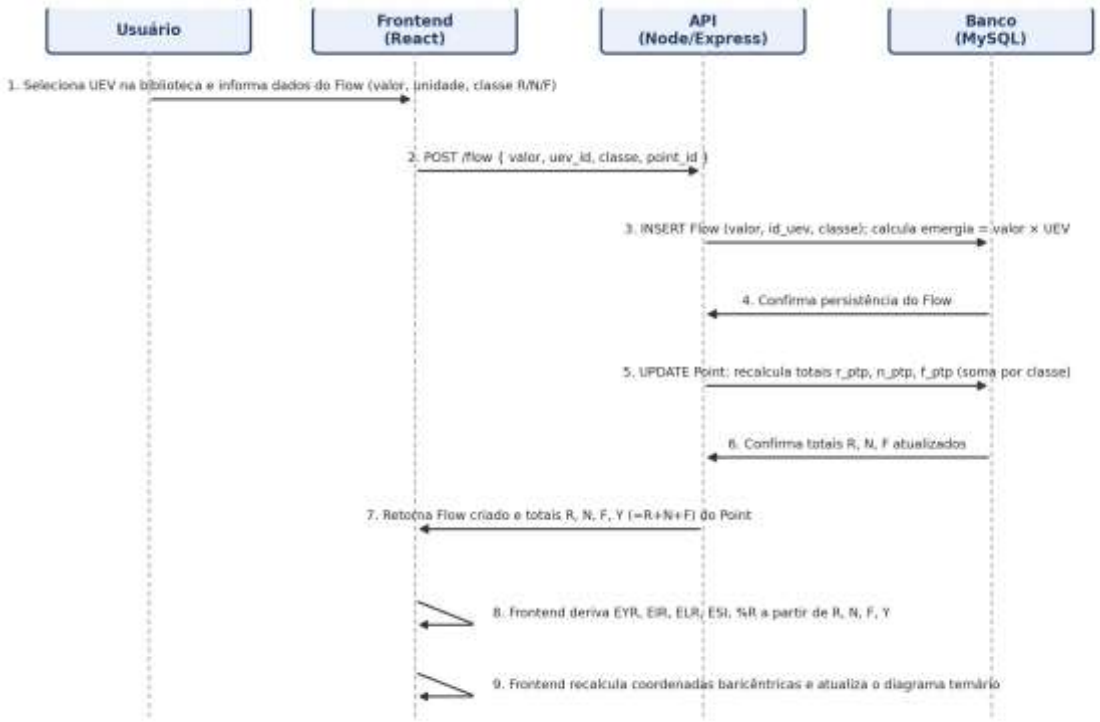


Fonte: Autor (2026).

A arquitetura segue separação estrita entre três camadas. No cliente, a *SPA React/TypeScript* concentra toda a lógica de apresentação e a derivação dos indicadores e do diagrama ternário, cálculos que não exigem nova consulta ao *backend*, pois operam sobre totais *R*, *N* e *F* já retornados pela API. No *backend*, a *API REST* em *Node.js/Express* expõe um módulo por responsabilidade (autenticação, biblioteca de UEVs, cadastro de *Flow*, agregação *R*, *N* e *F* e, mais recentemente, a análise comparativa de UEVs do RF14), todos em convergência para uma camada única de persistência parametrizada sobre o *banco relacional MySQL*. Essa separação é o que permite que o RF14 opere sem gravação em banco (RNF11): suas rotas consultam a biblioteca de UEVs e os totais do *Point*, já agregados a partir dos *Flows* persistidos, mas não acionam a camada de escrita; mantém o inventário do estudo intocado durante a simulação.

A Figura 5 detalha, em diagrama de sequência, o fluxo mais representativo dessa arquitetura: o cadastro de um *Flow* e a atualização em cascata de totais, indicadores e diagrama ternário.

Figura 5 - Diagrama de sequência: cadastro de Flow, recálculo de totais R, N e F e atualização do diagrama ternário



Fonte: Autor (2026).

Os passos 1 a 6 ocorrem inteiramente no *backend* e são persistidos de forma imediata e atômica; isto preserva a auditabilidade descrita no Capítulo 3: o valor do *Flow* e o identificador do UEV empregado (passo 3) são gravados antes de qualquer derivação. Os passos 7 a 9 ocorrem no *frontend*, sem nova escrita no banco, os indicadores e as coordenadas do diagrama ternário são funções determinísticas dos totais *R*, *N*, *F* e *Y* recebidos da API. Esse mesmo padrão de separação leitura/escrita é o que possibilita o módulo de análise comparativa de UEVs (RF14): ele reaproveita o passo 7 (consulta de totais) sem repetir os passos 2 a 6, calcula o cenário simulado inteiramente no cliente.

O modelo relacional da plataforma é composto por seis entidades principais, relacionadas ao domínio da contabilidade em emergia (Usuário, *Chart*, *Point*, *Flow*, UEV e *SystemOutput*). A integridade dos dados em emergia depende conjuntamente dos mecanismos de integridade referencial, das transações e das regras de derivação sob demanda descritas nas Seções 3.4 a 3.6; *não constituem* consequência automática da separação arquitetural.

Tabela 18 - Entidades centrais do banco de dados implementado

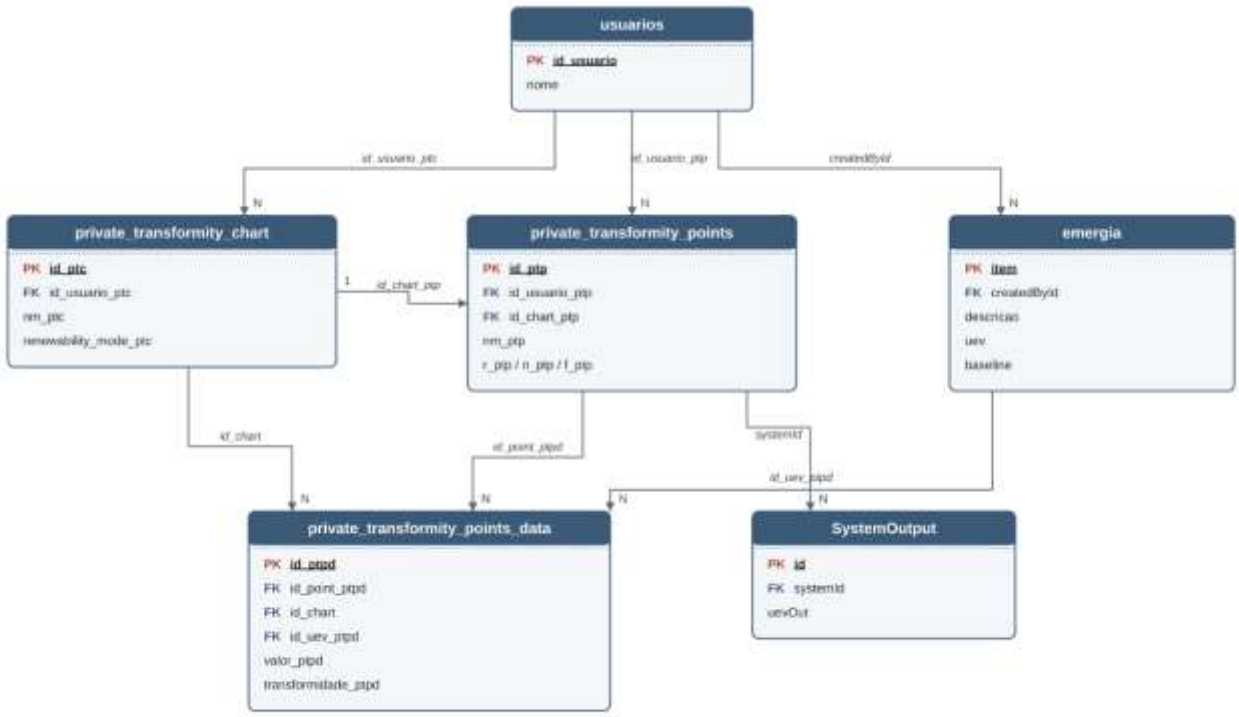
Entidade	**Atributos-chave**	**Relacionamentos**	**Decisão crítica de modelagem**
Usuário (usuarios)	id_usuario, nm_usuario, email_usuario, senha_usuario, instituição, país	1:N com Chart	Senha armazenada apenas como hash; autenticação JWT stateless; contexto institucional registrado para rastreabilidade do estudo.
Chart (*private_transformity_chart*)	id_ptc, nm_ptc, id_usuario_ptc, renewability_mode_ptc	N:1 com Usuário; 1:N com Point	O modo Traditional é o padrão e o único utilizado nesta tese; o campo renewability_mode_ptc permanece registrado para compatibilidade com a evolução do sistema.
Point (*private_transformity_points*)	id_ptp, id_usuario_ptp, id_chart_ptp, nm_ptp, r_ptp, n_ptp e f_ptp	N:1 com Chart; 1:N com Flow	Os totais R, N e F são obtidos por agregação SQL sob demanda sobre os Flows; r_ptp, n_ptp e f_ptp são campos legados (FLOAT) do esquema físico, não a fonte

			operacional desses totais.
Flow (*private_transformity_points_data*)	id_ptpd, id_point_ptpd, desc_ptpd, unidade_ptpd, classe_ptpd, valor_ptpd, transformidade_ptpd, id_uev_ptpd e id_chart	N:1 com Point; N:1 com Chart; N:1 com UEV	transformidade_ptpd é persistida no momento do cadastro e não sofre recálculo automático, preservando RNF02; id_uev_ptpd assegura rastreabilidade bibliográfica.
UEV (emergia)	item, descricão, classe, unidade, quantidade, uev, referência e baseline	1:N com Flow (o Flow mantém identificador e valor do UEV)	A referência bibliográfica é obrigatória; a baseline é registrada em cada UEV, permitindo sua identificação e verificação pelo analista.
SystemOutput	id, systemId, description, value, unit	N:1 com Point (Point 1:N SystemOutput; ON DELETE CASCADE)	value armazenado como DOUBLE; UEV da saída (Y/Q) e Total Emergy do Point não são persistidos na entidade, evitando duplicação de estado derivável.

Fonte: Autor (2026).

Um recorte do diagrama entidade-relacionamento da plataforma, apresentado na Figura 6, evidencia a cadeia de inventário Usuário → *Chart* → *Point* → *Flow* e a ligação de cada *Flow* ao registro correspondente da entidade UEV. A entidade *SystemOutput*, relacionada a *Point* e descrita nas Tabelas 13 e 18, não está representada neste recorte. Além do *vínculo Flow-UEV*, o campo *transformidade_ptpd* preserva no *Flow* o valor efetivamente empregado no cálculo, o que impede que alterações posteriores no valor corrente da biblioteca provoquem recálculo retroativo dos resultados já persistidos.

Figura 6 - Modelo relacional das seis entidades centrais do núcleo do TRIGES avaliado nesta tese



Fonte: elaborada pelo autor a partir do schema.prisma da versão do TRIGES avaliada nesta tese (2026).

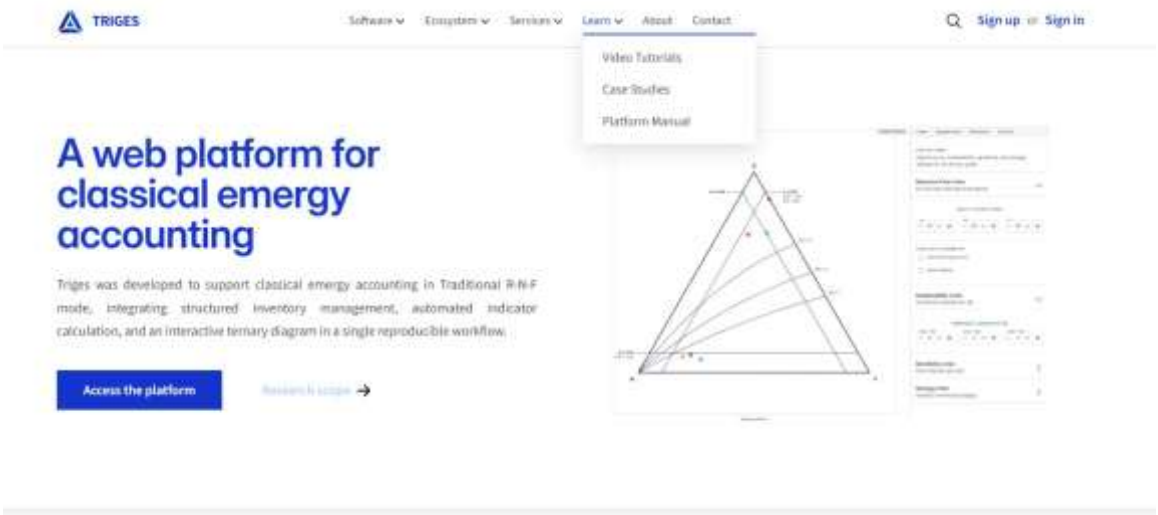
4.1.3 Interfaces de usuário desenvolvidas

As interfaces da plataforma foram desenvolvidas com *React 18* e *TypeScript*, sobre os componentes do *Design System v1.2* descrito no Capítulo 3, e materializam em tela a arquitetura de dados *Chart–Point–Flow* e a distinção metodológica entre biblioteca de UEVs, inventário de fluxos e resultados derivados apresentada nos Capítulos 2 e 3. A camada de interface cumpre três funções complementares: capturar dados de entrada com validação e vínculo bibliográfico obrigatório; expor, sem intervenção manual do usuário, os agregados de emergia calculados pelo *backend* e os indicadores e a projeção ternária calculados pelo *frontend*; e tornar interpretável, por meio de tabelas e do diagrama ternário, a composição *R*, *N* e *F* resultante. As telas descritas a seguir evidenciam a implementação dos módulos apresentados na Seção 3.6, mas não constituem, isoladamente, prova de usabilidade, de acessibilidade ou de compreensão adequada pelos usuários finais. Como reconhecido nas limitações da pesquisa (Capítulo 5),

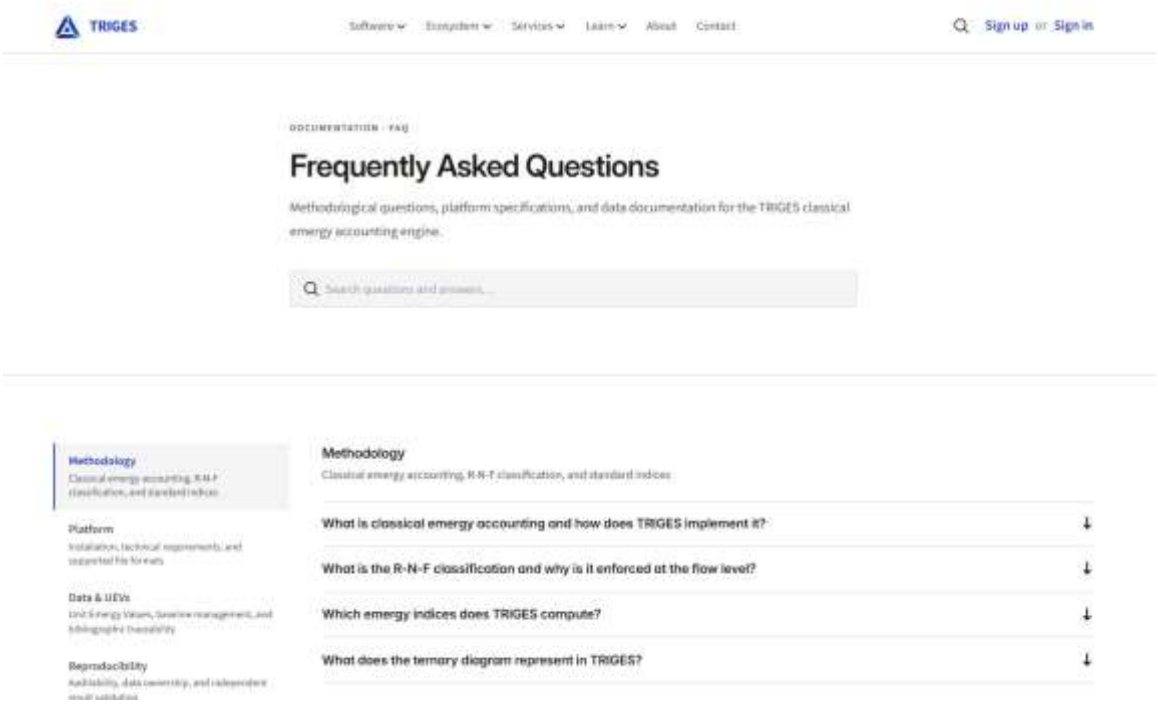
nenhum teste com participantes foi conduzido nesta tese. Acesso à plataforma é precedido por um ambiente institucional que situa a *TRIGES* no contexto da contabilidade em emergia clássica e do paradigma Design Science Research, *o que delimita* explicitamente o *modo Traditional R*, *N* e *F* como escopo científico avaliado e reunindo, sob os *menus Software*, *Ecosystem* e *Learn*, a documentação de referência do sistema, manual da plataforma, *FAQ* metodológico, estudos de caso e tutoriais em vídeo. A Figura 7 apresenta essa camada institucional.

Figura 7 - Ambiente institucional da plataforma *TRIGES*: (a) apresentação do escopo metodológico; (b) documentação estruturada por eixo metodológico (FAQ)

(a)



(b)

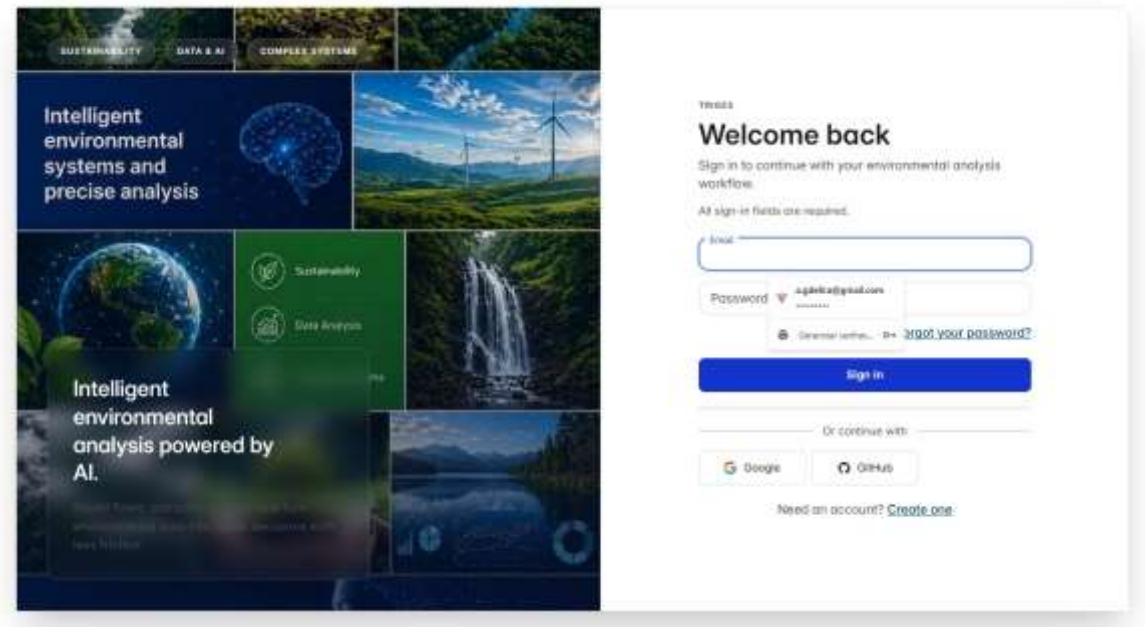


Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

A separação entre esse ambiente institucional e o ambiente analítico autenticado reproduz, na interface, a distinção entre documentação do artefato e operação do artefato: o primeiro comunica o escopo e a fundamentação metodológica do sistema; o segundo executa o inventário, o cálculo e a representação ternária efetivamente avaliados nesta tese. A organização da documentação por eixo metodológico (classificação *R*, *N* e *F*, gestão de UEVs, reprodutibilidade) reforça, em nível de comunicação, a mesma preocupação com rastreabilidade e transparência que orienta a arquitetura de dados descrita no Capítulo 3, sem que isso implique validação de sua eficácia comunicativa junto a usuários reais.

O acesso à área analítica exige autenticação individual, requisito RF01 especificado no Capítulo 3. A Figura 8 mostra a tela de entrada, que aceita credenciais de e-mail e senha ou autenticação federada via *Google* e *GitHub*, além de oferecer recuperação de senha e cadastro de nova conta.

Figura 8 - Tela de autenticação da plataforma, com *login* por credenciais ou provedores federados

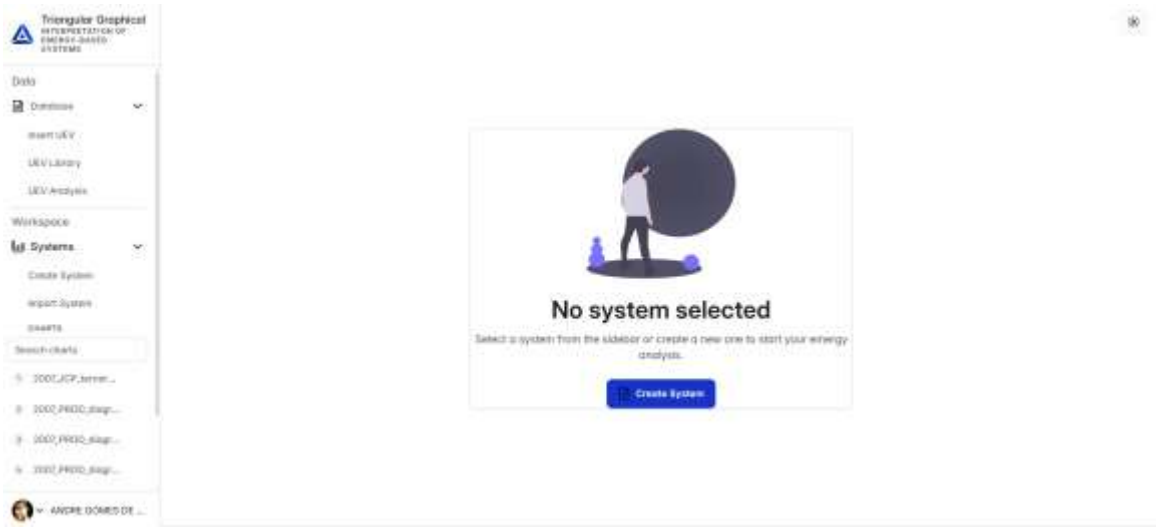


Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

A autenticação individual é condição necessária, mas não suficiente, para a rastreabilidade dos estudos. Ela identifica o autor de cada *Chart*, mas a proveniência operacional do valor de UEV empregado por *Flow*, discutida no Capítulo 2, decorre da arquitetura de persistência do *backend*, não da camada de autenticação. Os mecanismos de armazenamento de sessão (*cookies HttpOnly*) descritos na Seção 3.6 não são visíveis nesta tela; sua verificação funcional é tratada na Seção 4.2 (RF01).

Após a autenticação, o usuário acessa o ambiente de trabalho organizado em duas áreas complementares, visíveis na barra lateral da Figura 9: Data, que reúne os módulos de biblioteca de UEVs (*Insert UEV, UEV Library, UEV Analysis*); e Workspace, que reúne a gestão de estudos (*Create System, Import System*) e a listagem dos *Charts* já cadastrados pelo usuário autenticado.

Figura 9 - Ambiente de trabalho: barra lateral com as áreas Data e Workspace e estado inicial sem sistema selecionado



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

Essa divisão materializa em interface a separação conceitual, estabelecida no Capítulo 2, entre dados de referência (biblioteca de UEVs, compartilhada entre estudos) e dados de estudo (*Charts* e seus subsistemas, específicos de cada análise). A mensagem “No system selected”, exibida quando nenhum *Chart* está ativo, é um dos estados de validação da interface: ela impede o acesso às telas de inventário e de simulação antes que um sistema tenha sido criado ou selecionado, fato que reflete a dependência hierárquica Chart→Point→Flow descrita no Capítulo 3.

O cadastro de novos coeficientes segue o *formulário Global UEV Registry*, reproduzido na Figura 10, que exige a descrição do recurso, a unidade física, o valor do UEV, a baseline de origem e a referência bibliográfica antes de permitir o registro. Isto operacionaliza, em nível de interface, o requisito RF08 e o princípio de rastreabilidade bibliográfica discutido no Capítulo 2: nenhum UEV é aceito sem vínculo bibliográfico explícito. O indicador de progresso do formulário segmenta o cadastro em duas etapas (definição do recurso e quantificação/baseline), reduz submissões incompletas sem, no entanto, validar a exatidão do valor informado, tarefa que permanece sob responsabilidade do pesquisador que realiza o cadastro.

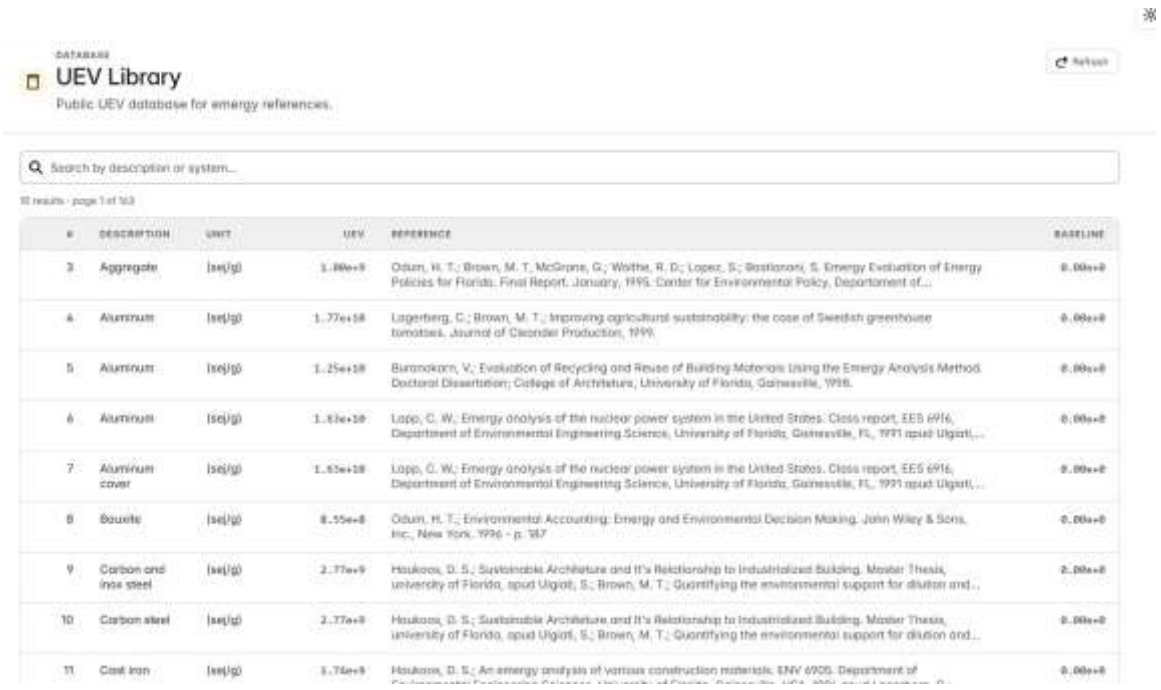
Figura 10 - Formulário de cadastro de UEV (Global UEV Registry), com campos obrigatórios de unidade, baseline e referência bibliográfica



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

A consulta aos UEVs já cadastrados é feita na *tela UEV Library* (Figura 11), que apresenta busca textual por descrição e paginação sobre um conjunto superior a 200 registros catalogados a partir de fontes publicadas, conforme a rastreabilidade bibliográfica exigida no Capítulo 2. Cada linha da tabela reproduz os campos definidos no cadastro, descrição, unidade, valor de UEV, referência completa e baseline, o que permite ao pesquisador inspecionar a origem de qualquer coeficiente antes de o utilizar em um *Flow*. A coexistência, na mesma tabela, de múltiplos registros para um mesmo recurso, como os diferentes valores de UEV para alumínios visíveis na Figura 11, oriundos de fontes distintas, expõe visualmente, sem necessidade de consulta externa, a dispersão bibliográfica discutida na Seção 2.6 como problema de governança científica do campo.

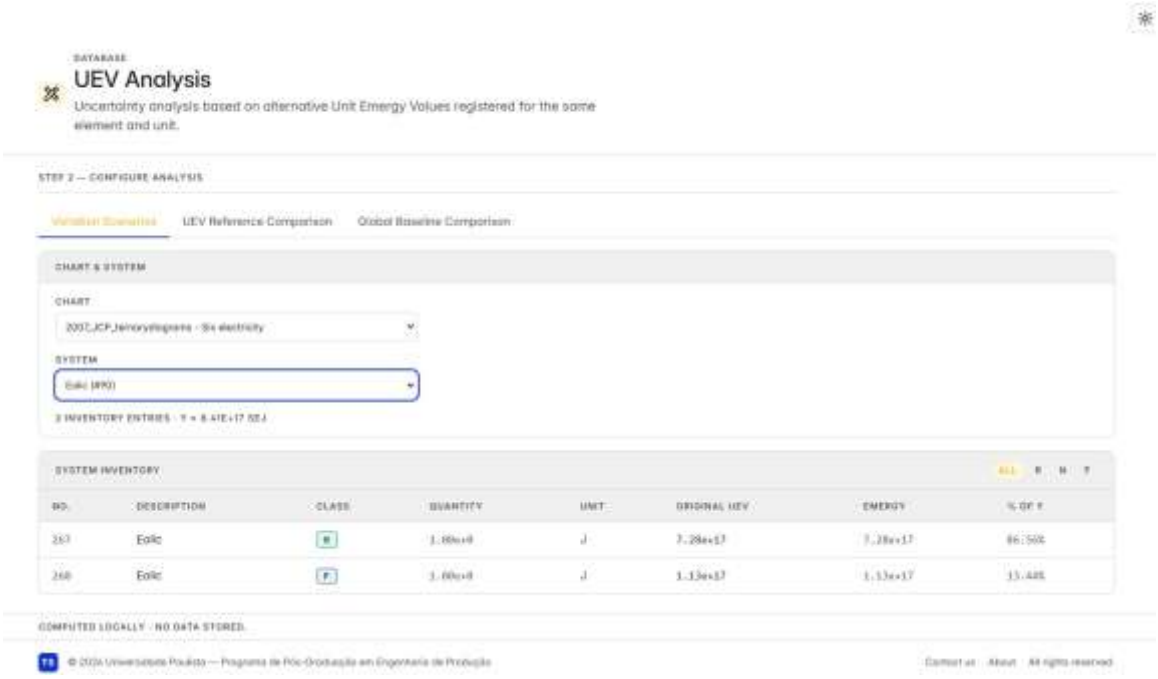
Figura 11 - Biblioteca de UEVs (UEV Library) com busca textual, paginação e campos de rastreabilidade bibliográfica



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

Selecionado um *Chart* e um subsistema, rotulado *System* na interface, correspondendo ao *Point* definido no Capítulo 3, a plataforma exibe, no painel *System Inventory* da *tela UEV* Analysis (*aba Variation Scenarios*), o inventário de fluxos associado, conforme a Figura 12. A *tabela System Inventory* apresenta, para cada *Flow*, o número identificador, a descrição, a classe (*R*, *N* ou *F*), a quantidade física, a unidade, o UEV original consultado na biblioteca, a emergia calculada e o percentual de participação na emergia total *Y* do subsistema, com filtros que permitem restringir a visualização a uma única classe.

Figura 12 - Painel *System Inventory* da tela UEV *Analysis* (*Variation Scenarios*), com classificação *R*, *N* e F, UEV original e emergia calculada por Flow

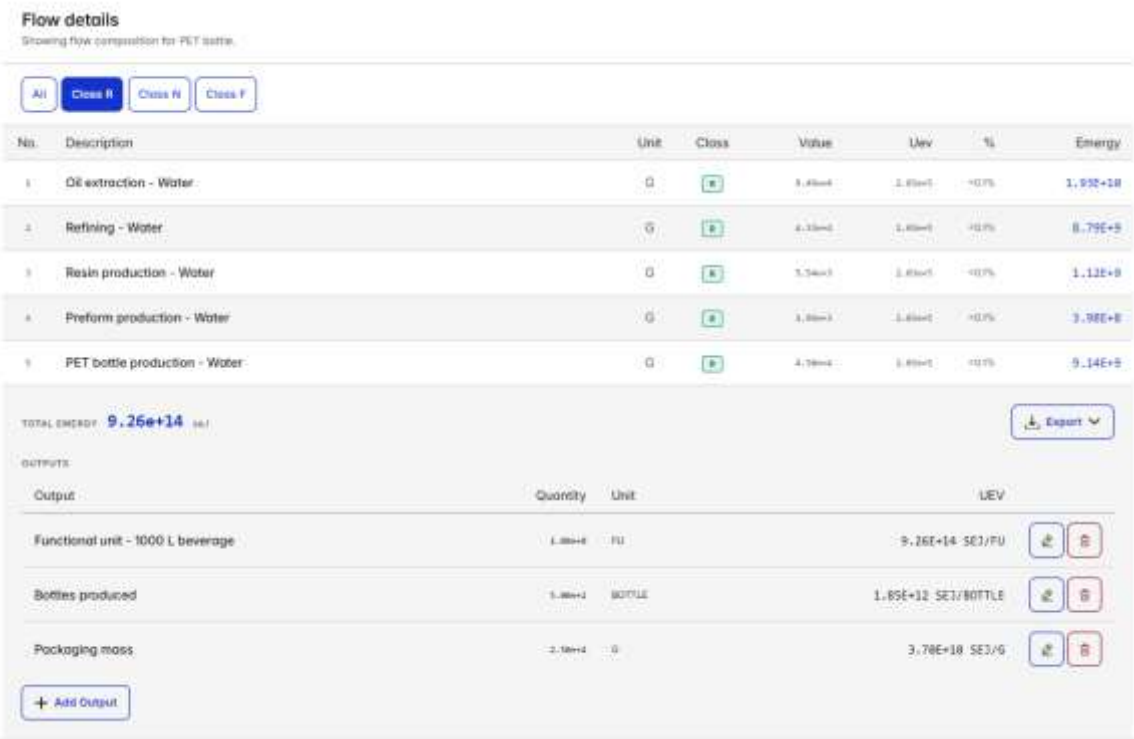


Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

A classificação de cada fluxo em *R*, *N* ou *F*, bem como a associação a um UEV da biblioteca permanecem decisão do pesquisador no momento do cadastro: a interface não infere automaticamente a categoria de um recurso a partir de sua descrição, nem sugere um UEV compatível; ela apenas impõe, estruturalmente, que todo *Flow* esteja vinculado a uma classe válida e a um UEV rastreável, condição necessária, mas não suficiente, para a correção metodológica do inventário. O total de entradas e o valor de *Y* exibidos acima da tabela são derivados automaticamente da soma dos fluxos persistidos, e o fato reproduz em interface a identidade $Y = R + N + F$ discutida no Capítulo 2.

Na tela de detalhes do *Flow* apresentada na Figura 13, a plataforma exibe as saídas (*Outputs*) associadas ao subsistema. Cada saída registra descrição, quantidade e unidade, enquanto o UEV correspondente é derivado automaticamente pela razão entre a emergia total *Y* e a quantidade declarada (UEVout = Y/Q). Os filtros *R*, *N* e *F* restringem somente as linhas exibidas do inventário de *Flows* e não modificam o valor integral de *Y*, empregado no cálculo dos UEVs das saídas. Um *Point* pode possuir zero ou múltiplos *Outputs*, cada um com seu UEV calculado independentemente a partir do mesmo *Y* integral do *Point*, sem soma das quantidades declaradas, sem alocação proporcional e sem redução de *Y* conforme o número de *Outputs*.

Figura 13 - Inventário de fluxos e múltiplas saídas de um subsistema, com Total Emergy e UEVs de saída



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

Além do cadastro e da consulta, a plataforma disponibiliza, no *módulo UEV Analysis*, três funcionalidades que operam sobre um *Flow* já cadastrado sem alterar o inventário persistido: substituição simulada de UEV (*aba Variation Scenarios*), comparação entre registros alternativos do mesmo recurso na biblioteca (*aba UEV Reference Comparison*) e comparação entre baselines emergéticas globais (*aba Global Baseline Comparison*). As três funcionalidades operam por avaliação determinística de um único cenário alternativo por vez, a partir de um valor informado pelo usuário; não constituem análise probabilística de incerteza, propagação de distribuições ou amostragem, capacidades explicitamente identificadas no Capítulo 2 como agenda futura desta linha de pesquisa. Essas três funcionalidades constituem o requisito RF14, verificado na Seção 4.2, e sua execução inteiramente local, sem gravação em banco de dados, conforme RNF11, garante que a exploração de cenários alternativos não comprometa o inventário persistido nem o valor histórico preservado nos *Flows* já cadastrados (RNF02).

Selecionado um *Flow* na aba *Variation Scenarios* (Figura 14a), a interface exige um valor de UEV simulado maior que zero, proveniente da biblioteca ou digitado manualmente,

antes de habilitar o botão de cálculo (Figura 14b). Valores inválidos ou não informados mantêm o botão desabilitado, outro estado de validação que separa entrada incompleta de resultado calculado. Um aviso explícito informa que valores manuais são usados apenas na simulação corrente e não são adicionados à biblioteca de UEVs, e isto preserva a integridade do repositório bibliográfico frente a experimentações do usuário.

Figura 14 - Simulação de UEV (aba *Variation Scenarios*): (a) estado inicial, com cálculo desabilitado até a informação de um valor válido; (b) valor simulado informado manualmente, habilitando o cálculo

(a)



(b)



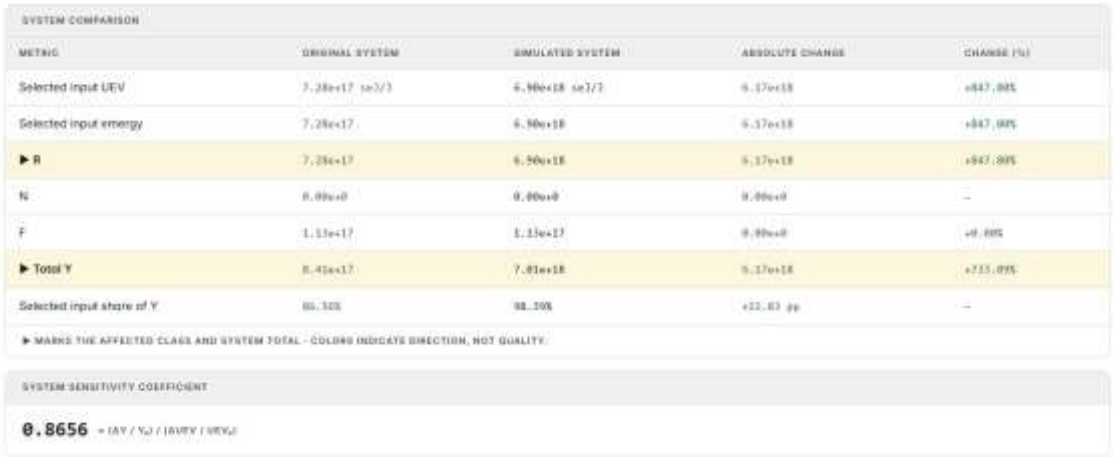
Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

O resultado da simulação é apresentado em duas camadas complementares. A primeira (Figura 15a) compara, em tabela, os valores originais e simulados do fluxo selecionado, dos totais R, *N* e *F*, da emergia total *Y* e da participação percentual do fluxo em *Y*, acompanhados da variação absoluta e percentual e de um coeficiente de sensibilidade do sistema, calculado como a razão entre a variação relativa de *Y* e a variação relativa do UEV simulado, $S = (\Delta Y/Y_0)$

/ ($\Delta UEV/UEV_0$). Esse coeficiente expressa a elasticidade determinística da emergia total do sistema a uma alteração pontual em um único fluxo; assim, não deve ser interpretado como medida formal de incerteza, nem como substituto de uma análise de sensibilidade sistemática sobre múltiplos parâmetros. A segunda camada (Figura 15b) reapresenta a mesma comparação em formato de barras horizontais para *R*, *N*, *F* e *Y*, seguida do inventário simulado completo, fato que reforça a rastreabilidade entre a alteração pontual no *Flow* e seus efeitos agregados no subsistema.

Figura 15 - Resultados da simulação de UEV: (a) comparação tabular entre sistema original e simulado, com coeficiente de sensibilidade; (b) comparação em barras de *R*, *N*, *F* e *Y* e inventário simulado

(a)



(b)



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

A Figura 16 mostra a tradução geométrica do mesmo cenário no diagrama ternário: os pontos original e simulado são plotados simultaneamente sobre o mesmo triângulo, com a composição percentual e a variação em pontos percentuais de cada classe indicadas ao lado. Essa representação reaproveita, para fins comparativos, a mesma implementação de projeção baricêntrica verificada no Capítulo 4 para os estudos de caso, o que evidencia que a geometria do diagrama responde de forma consistente tanto à composição de sistemas distintos, quanto a variações hipotéticas de um único sistema.

Figura 16 - Diagrama ternário da simulação, com composição original e simulada plotadas simultaneamente



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

As abas *UEV Reference Comparison* (Figura 17) e *Global Baseline Comparison* (Figura 18) deslocam a pergunta analítica de “o que aconteceria se este fluxo usasse outro UEV” para “quão sensível é o UEV escolhido às fontes bibliográficas alternativas disponíveis” e “quão sensível é esse mesmo UEV à baseline emergética adotada”. Na primeira, selecionado um registro da biblioteca (Figura 17a), a plataforma lista todos os demais registros compatíveis em elemento e unidade, ordenados por valor de UEV; calcula o fator relativo e a variação percentual de cada um em relação ao registro de referência escolhido (Figura 17b), e reproduz, em interface, a dispersão bibliográfica discutida na Seção 2.6 para materiais como alumínio. Na segunda, a plataforma recalcula o mesmo UEV sob diferentes baselines globais historicamente adotadas na literatura (9,44; 12,00; 15,20 e 15,83 × 10^{24} seJ·ano^{-1}), explicita textualmente que a comparação é estritamente analítica: não altera o valor persistido na

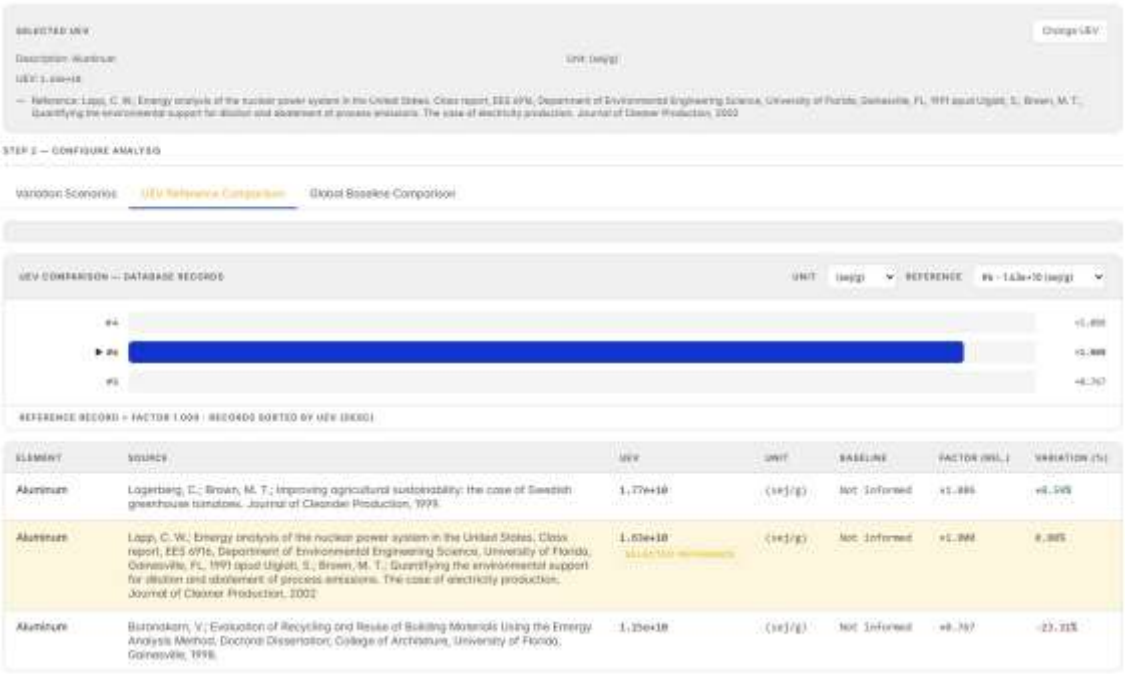
biblioteca nem gera um novo *Flow* ou *Point*. O reescalonamento implementado segue o princípio indicado por Brown *et al*. (2016), segundo o qual um valor obtido sob baseline anterior pode, quando metodologicamente apropriado, ser convertido pelo quociente entre a nova e a antiga GEB. Os mesmos autores desencorajam o uso dessas baselines antigas em novas avaliações, de modo que as quatro referências históricas disponíveis na comparação não constituem alternativas atuais equivalentes a $12{,}0 \times 10^{24}$ seJ·ano^{-1} (GEB2016), mas instrumentos de rastreabilidade e harmonização de UEVs publicados sob referências anteriores.

Figura 17 - Comparação entre registros alternativos de UEV (UEV *Reference Comparison*): (a) seleção do registro de referência; (b) comparação de fatores relativos e variação percentual entre registros do mesmo elemento

(a)



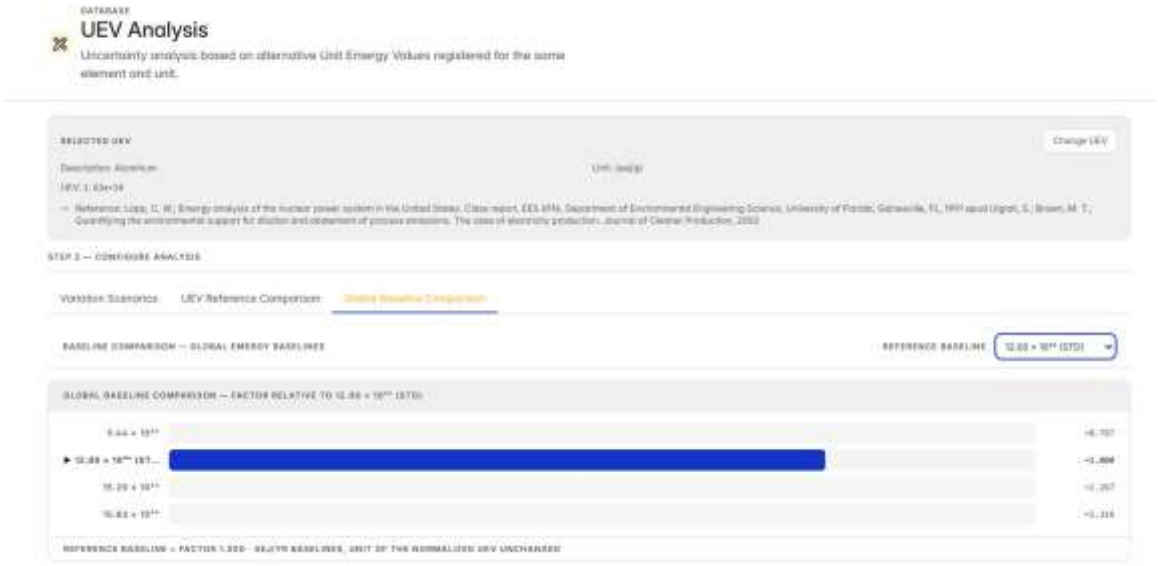
(b)



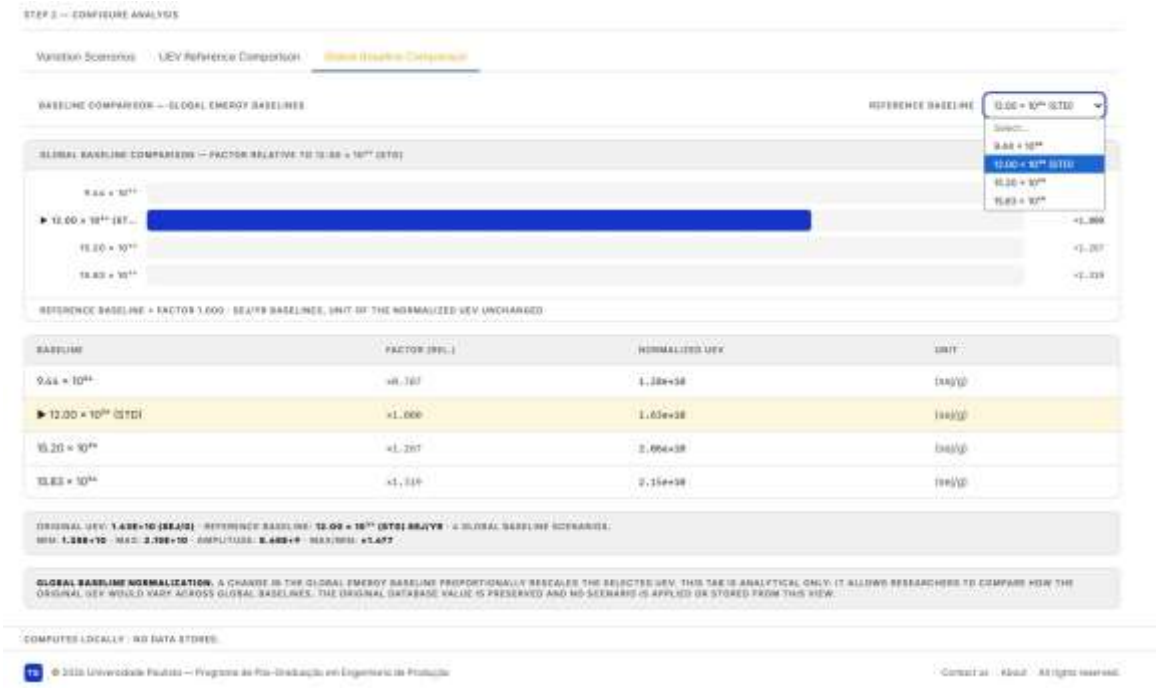
Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

Figura 18 - Comparação entre baselines emergéticas globais (*Global Baseline Comparison*), com fator relativo e UEV normalizado para cada baseline histórica

(a)



(b)



Fonte: elaborado pelo autor a partir da plataforma *TRIGES*.

Ambas as comparações operacionalizam, em nível de interface, a discussão da Seção 2.2 sobre a necessidade de tratamento explícito e uniforme de baselines distintas: ao normalizar

UEVs de baselines diferentes por um fator relativo declarado, a plataforma reduz o risco de combinação inadvertida de coeficientes incompatíveis, sem, contudo, executar automaticamente a conversão de baseline dentro do inventário de um estudo. Essa conversão, quando necessária para os estudos de caso do Capítulo 4, foi realizada manualmente pelo pesquisador antes do cadastro dos fluxos, conforme descrito na Seção 4.3.

A pertinência dessas duas funcionalidades encontra respaldo em evidência bibliográfica de maior escala. Giannetti *et al*. (2019), ao examinarem transformidades publicadas ao longo de aproximadamente três décadas, identificaram distribuições heterogêneas e valores extremos mesmo após harmonização de baseline, o que reforça que a coexistência de coeficientes alternativos é característica real da literatura em emergia, e não exceção pontual. No *TRIGES*, essa heterogeneidade não é resolvida pela seleção automática de um valor supostamente canônico: o módulo UEV Analysis (RF14) permite comparar deterministicamente registros alternativos e baselines e preserva o inventário original e a decisão metodológica do pesquisador.

A magnitude desse efeito é ilustrada empiricamente por Bonilla *et al*. (2010), que, ao substituírem a transformidade do trabalho humano por valores correspondentes a três contextos nacionais em uma plantação de bambu, mantendo o restante do inventário constante, obtiveram alterações substanciais em *F*, nos quatro indicadores derivados e na posição ternária dos sistemas resultantes. Esse resultado é qualitativamente equivalente ao que a aba *Variation Scenarios* do *módulo UEV Analysis* permite explorar: substituir deterministicamente o UEV de um único *Flow* e observar seu efeito propagado sobre *Y*, os indicadores e o diagrama, sem alterar o inventário persistido. A Seção 4.3.5 retoma esse artigo para uma verificação numérica independente.

A necessidade de comparar registros alternativos publicados encontra reforço adicional em Lyu *et al*. (2021), que recalcularam UEVs de fertilizantes e defensivos agrícolas a partir de inventários de ciclo de vida mais detalhados e encontraram divergências de dezenas de pontos percentuais em relação a coeficientes anteriormente publicados para o mesmo produto, por exemplo, o UEV recalculado da ureia situou-se aproximadamente 33% acima de uma referência e 61% abaixo de outra. Esse padrão de divergência é exatamente o que a aba *UEV Reference Comparison* foi concebida para tornar visível: múltiplos registros publicados para o mesmo elemento, ordenados e comparados por fator relativo, sem que a plataforma decida automaticamente qual coeficiente é mais atualizado ou mais correto.

As interfaces descritas nesta seção materializam, em conjunto, o fluxo metodológico estabelecido nos Capítulos 2 e 3: entrada rastreável de UEVs, associação obrigatória de fluxos a uma classe *R*, *N* ou *F* e a um coeficiente bibliograficamente referenciado, cálculo automático da emergia e dos indicadores a partir desse inventário, e representação tabular e ternária dos resultados. Os módulos de simulação e comparação de UEVs ampliam essa cadeia com uma camada exploratória determinística, que permite ao pesquisador avaliar o impacto de escolhas bibliográficas alternativas sem comprometer a integridade do inventário persistido. Essas interfaces, contudo, não substituem o julgamento do analista quanto à classificação *R*, *N* e *F*, à seleção do UEV apropriado ao contexto do fluxo ou à interpretação crítica das fontes bibliográficas consultadas; elas tornam essas decisões visíveis, rastreáveis e auditáveis, mas não as automatizam. Tampouco constituem evidência de usabilidade, acessibilidade ou eficácia comunicativa junto a usuários não especialistas, pois, como reconhecido nas limitações desta pesquisa, nenhuma dessas dimensões foi avaliada empiricamente nesta tese.

4.2 Verificação funcional dos requisitos

A verificação funcional consiste em mostrar que cada requisito funcional definido no Capítulo 3 (RF01 a RF10 e RF12 a RF15) foi implementado e satisfaz o respectivo critério de aceitação. Para cada requisito, os dados de entrada foram definidos explicitamente; a operação foi executada na plataforma em ambiente de teste, e o resultado obtido foi comparado com o resultado esperado. A verificação funcional não substitui a comparação numérica; ela demonstra que os requisitos operacionais do artefato foram implementados de forma estável e constitui condição necessária para a etapa de avaliação com estudos de caso.

Tabela 19 - Síntese da verificação funcional dos requisitos RF01 a RF10 e RF12 a RF15

ID	Requisito	Critério de aceitação	Evidência operacional verificada	Status
RF01	Login e autenticação	JWT em cookies HttpOnly; restauração automática de sessão; logout limpa sessão; guard de rotas bloqueia acesso não autenticado.	Confirmou-se o armazenamento de access_token e refresh_token em cookies HttpOnly (Secure, SameSite=Strict) inacessíveis via JavaScript, portanto não expostos em sessionStorage ou localStorage, a restauração da sessão em reacesso, o bloqueio de rotas privadas sem autenticação e a limpeza integral da sessão após logout.	Atendido
RF02	Registro de usuário	Validações field-by-field; erro 409 para e-mail duplicado.	Foram validados campos obrigatórios, consistência entre e-mail e confirmação, consistência entre senha e confirmação e retorno de erro descritivo quando o e-mail já estava cadastrado.	Atendido
RF03	Recuperação de senha	Fluxo POST /forgotpassword → validate → PUT /resetpassword; token inválido bloqueia formulário.	O fluxo completo de solicitação, validação de token e redefinição de senha foi executado com sucesso; tokens inválidos ou expirados impediram a abertura do formulário de redefinição.	Atendido
RF04	Gerenciamento de perfil	Atualização de dados cadastrais e troca de senha; logout automático por token expirado.	A atualização de dados cadastrais e a troca de senha foram concluídas com persistência no backend; a expiração de sessão foi tratada por logout automático.	Atendido

RF05	Gerenciamento de Charts	CRUD completo; seleção dispara carregamento automático dos dados associados.	A criação, renomeação, exclusão e seleção de Charts ocorreu sem falhas; a seleção acionou carregamento automático de Points e Flows associados.	Atendido
RF06	Gerenciamento de Points	CRUD completo; totais R/N/F recalculados após cada operação.	A criação, edição e exclusão de Points refletiu-se corretamente na interface e no backend; os totais agregados por Point foram recalculados após cada alteração de inventário.	Atendido
RF07	Gerenciamento de Flows	CRUD completo; parseFlexibleNumber() aceita notações BR, US e científica.	Foram testados cadastros e edições de Flows com notação 1.234,56, 1234.56 e 4.8e12; a emergia individual foi recalculada corretamente em todos os casos.	Atendido
RF08	Biblioteca de UEVs	Consulta com filtros; cadastro com referência obrigatória; busca com debounce.	A consulta paginada respondeu aos filtros por referência e classe; o cadastro bloqueou submissões sem referência bibliográfica válida e o debounce reduziu disparos redundantes de busca.	Atendido
RF09	Diagrama ternário	Triângulo equilátero; curvas ESI geradas algebricamente; ponto de composição em emergia agregada; exportação PNG.	O triângulo foi renderizado com geometria estável em diferentes estados de visualização; curvas ESI, pontos e a funcionalidade de ponto de composição em emergia agregada foram exibidos corretamente; a exportação em PNG foi concluída sem perda de conteúdo.	Atendido
RF10	Indicadores em emergia	Valores corretos; N/A para divisões por zero; tooltips funcionais.	Os indicadores clássicos e a renovabilidade percentual (%R) foram calculados de forma consistente a partir dos totais agregados; casos de divisão por zero foram sinalizados como N/A e os tooltips exibiram as fórmulas canônicas.	Atendido
RF12	Exportação de dados	JSON v2.0 reimportável; PNG com resolução adequada.	Charts completos, Points individuais e diagramas ternários foram exportados nos formatos previstos e puderam ser reutilizados em novos testes.	Atendido parcialmente
RF13	Importação de dados	Importação v1.0 e v2.0; rate limiting previne erro 429; JSON inválido gera mensagem descritiva.	A importação reconheceu corretamente as versões previstas, reconstruiu a hierarquia Chart–Point–Flow e tratou JSONs inválidos com mensagens descritivas, sem sobrecarga de requisições.	Atendido parcialmente

RF14	Análise comparativa de UEVs	UEV simulado > 0 habilita o cálculo; coeficiente de sensibilidade correto; comparações refletem fator relativo e variação percentual; nenhuma escrita é persistida.	Testou-se a simulação de UEV com valores inválidos e válidos, confirmando o bloqueio do cálculo abaixo do limiar; o coeficiente de sensibilidade exibido correspondeu à razão entre a variação relativa de Y e a variação relativa do UEV simulado; a comparação entre registros alternativos e entre baselines globais reproduziu corretamente os fatores relativos; em nenhum dos casos o inventário persistido, o Flow de origem ou a biblioteca de UEVs foram alterados.	Atendido
RF15	Gestão de Outputs e derivação de UEV de saída	CRUD de Outputs persistente; UEV derivado como Y/Q e não persistido; recálculo imediato ao editar Q; invariância sob filtros R/N/F.	Verificou-se GET 200 para lista inicialmente vazia de Outputs; POST 201 para cada Output criado (Grain, Crop residues, Nitrogen fixation), com UEV calculado corretamente em cada caso; persistência confirmada após reload completo; alternância dos filtros R → N → F → All alterou os Flows exibidos sem alterar o Total Emergy nem os UEVs de nenhum Output; PUT 200 recalculou o UEV de um Output imediatamente após edição de sua quantidade; DELETE 200 removeu um Output sem afetar os demais; persistência dos valores primários confirmada no banco de dados após o teste.	Atendido

Fonte: Autor (2026).

Os dados denominados *Grain*, *Crop residues* e *Nitrogen fixation* foram utilizados em protocolo funcional autônomo para verificar o CRUD persistente de *Outputs*, o recálculo de UEVout = Y/Q, o isolamento entre *Points*, a invariância sob filtros e a integridade referencial. Essa execução não foi utilizada como evidência numérica do EC1. A captura do EC4 apresentada na Seção 4.3.11 constitui evidência visual adicional do funcionamento do painel com agregados cuja consistência foi previamente confirmada na comparação numérica oficial do estudo.

O RF15 foi considerado atendido quanto ao protocolo funcional. Seu nível global de evidência permanece parcial no Quadro 5, porque o teste não abrange regras de alocação entre coprodutos e *splits*.

O preenchimento descritivo da Tabela 19 mostra que o status “Atendido” decorre de evidências operacionais objetivas, e não de mera declaração conclusiva; RF12 e RF13 recebem o *status* “Atendido parcialmente”, porque o teste cobriu o comportamento funcional da interface, sem integrar a comparação numérica ou a verificação geométrica dos estudos de caso, a distinção já adotada no Quadro 5 do Capítulo 3. O requisito RF10 é aprofundado na comparação numérica da Seção 4.3; nele, os valores calculados são confrontados com resultados de referência publicados.

Os requisitos não funcionais (RNF01-RNF11) não são verificados em uma tabela dedicada neste capítulo; sua evidência está distribuída entre os testes já relatados e as seções seguintes. RNF04 (exatidão dos cálculos) e RNF09 (notações numéricas) encontram evidência direta nos testes de RF10 e RF07, respectivamente, aprofundada pela comparação numérica da Seção 4.3; RNF05 (consistência geométrica) é verificado na Seção 4.5; RNF06 (segurança de sessão) encontra evidência no teste do RF01; RNF11 (isolamento de simulações exploratórias) é verificado no teste do RF14. Os demais seis requisitos, RNF01, RNF02, RNF03, RNF07, RNF08 e RNF10, não foram submetidos a protocolo de teste dedicado nesta etapa da pesquisa; o Quadro 6 (Seção 3.3) sintetiza essa classificação e justifica, requisito a requisito, o nível de evidência disponível.

4.3 Comparação numérica integrada com estudos de caso

A comparação numérica verifica se os valores de R, N, F, Y, EYR, EIR, ELR, ESI e %R calculados pela plataforma coincidem, dentro da tolerância definida no Capítulo 3, com os

valores publicados na literatura para os mesmos sistemas e os mesmos dados de entrada. O procedimento seguiu as etapas já estabelecidas: inserção dos dados publicados sem ajustes, registro explícito dos UEVs utilizados, execução do cálculo pela plataforma e comparação dos resultados obtidos com os valores de referência. As divergências, quando presentes, foram interpretadas à luz da consistência interna dos dados de entrada, da precisão com que os valores foram publicados e das restrições estruturais incorporadas pela arquitetura da plataforma.

4.3.1 Protocolo comum de comparação

Antes de apresentar os sete estudos de caso executados nesta tese, esta seção consolida, para referência conjunta, os critérios de aceitação já formalizados na Seção 3.7. A comparação numérica adota quatro categorias de aderência aplicadas uniformemente a todos os casos: convergência estrita, quando o desvio entre o valor publicado e o valor recalculado ou obtido no *TRIGES* é igual ou inferior a 0,1%; divergência explicada, quando o desvio excede esse limiar, mas pode ser reproduzido por arredondamento, truncamento, resolução limitada dos dados publicados, UEV distinto ou divergência de modelagem, mediante análise documentada da fonte, sem alteração da interpretação ou da posição espacial do sistema no diagrama ternário; divergência não conclusiva, quando o desvio excede o limiar e sua origem não pode ser demonstrada com os dados publicados disponíveis; inconsistência estrutural da fonte, quando há violação demonstrável de identidade matemática ou incompatibilidade interna entre dados, fórmulas e resultados publicados.

Divergências classificadas como inconsistência estrutural da fonte são atribuídas a incompatibilidade interna da própria fonte de referência e não ao artefato avaliado, caso documentado nos Tratamentos I e IIIa de Bravo Toledo *et al*. (2024), analisado na Seção 4.3.4 (EC2). A verificação geométrica examina a equivalência entre a posição dos sistemas no diagrama ternário publicado e a posição gerada pela plataforma, sob os mesmos critérios de aderência, detalhada na Seção 4.5.

Nenhum estudo é contabilizado como estudo de caso executado quando os dados correspondentes não tiverem sido efetivamente cadastrados e processados no *TRIGES*. Essa condição, formalizada como critério de promoção nesta seção, distingue estudo de caso executado e avaliado (Seção 4.3) de recálculo bibliográfico não promovido, categoria que permanece pontualmente discutida na Seção 4.4 sempre que uma fonte adicional for utilizada

apenas para demonstrar a utilidade do protocolo de auditoria numérica, sem constituir estudo de caso executado.

4.3.2 Visão geral e critérios de seleção

Sete estudos de caso foram cadastrados e executados na plataforma *TRIGES*, com evidência de interface e comparação numérica explícita com os valores publicados nas fontes originais, apresentados a seguir. Nenhum permanece na categoria de candidato: todos foram cadastrados e executados na plataforma, com evidência de interface preservada nos apêndices de nota técnica correspondentes.

Tabela 20 – Síntese comparativa dos sete estudos de caso executados na plataforma *TRIGES*

EC	**Sistema/Fonte**	**Domínio**	**Situação numérica**
EC1	Lefroy e Rydberg (2003); Giannetti *et al*. (2007): sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália	Agricultura	Divergências explicadas de até 0,63% (indicadores) e 0,31% (UEVs de saída), atribuídas à precisão e ao arredondamento dos valores publicados, após correção da regra de agregação de R
EC2	Bravo Toledo et al. (2024): cotratamento de águas residuárias e ácidas	Saneamento ambiental	Convergência parcial: 12 de 16 valores; divergências em EYR e ESI para os Tratamentos I e IIIa, rastreadas a inconsistência interna do artigo-fonte
EC3	Bonilla et al. (2010): produção de bambu gigante, Brasil/Austrália/China	Agricultura/silvicultura	22 comparações com convergência estrita e 2 inconsistências estruturais da fonte no cenário China 4b
EC4	Almeida et al. (2010): embalagens PET/alumínio, virgens e recicladas	Ecodesign/seleção de materiais	Desvios de Y entre 0,02% e 0,14%
EC5	Li et al. (2014): nove províncias do Pan-Pearl River Delta, China	Avaliação territorial	Dezesseis convergências estritas e 29 divergências explicadas nas 45 comparações; nenhuma divergência não conclusiva; ponto agregado regional não executado
EC6	Avalos-Rangel *et al*. (2021): sistema milpa familiar, México	Agricultura	Diferença de aproximadamente 0,017% no total emergético
EC7	Ma et al. (2013): planta de bio-hidrogênio	Auditoria documental	EIR e ELR convergem com o publicado; EYR e ESI não fecham com os subtotais impressos no artigo-fonte

Fonte: elaborado pelo autor a partir dos apêndices de nota técnica de EC1 a EC7.

4.3.3 Estudo de Caso 1: sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália (Lefroy e Rydberg, 2003; Giannetti *et al*., 2007)

Este estudo reaplica no *TRIGES* a avaliação emergética de três sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália, publicada por Lefroy e Rydberg (2003) e reorganizada no espaço *R*, *N* e *F* por Giannetti *et al*. (2007). O inventário de dezenove entradas por sistema foi cadastrado item a item no *TRIGES*. A consolidação em *R*, *N* e *F* declarada pelos autores segue a regra segundo a qual o agregado *R* corresponde ao maior entre os fluxos renováveis locais acoplados, e não à sua soma, para evitar dupla contagem.

A reaplicação envolveu duas execuções na plataforma, com alcances probatórios distintos. Na execução exploratória, os dezenove itens foram cadastrados na ordem original de cadastro, sem a aplicação da regra do maior fluxo renovável; essa execução não reproduziu os agregados nem a identificação numérica publicados; ela produz identificação invertida entre Tagasaste e a rotação tremoço/trigo e agregados *R*, *N* e *F* distantes dos valores-alvo. Na execução oficial, os agregados *R*, *N* e *F* foram corrigidos externamente pelo analista, com a regra do maior fluxo renovável aplicada fora da plataforma e cadastrados diretamente no *TRIGES*; essa execução reproduziu a identificação numérica e as posições publicadas por Giannetti *et al*. (2007). A execução oficial valida, portanto, os cálculos de *Y*, dos indicadores e da projeção ternária realizados pelo *TRIGES* a partir dos agregados corrigidos, mas não constitui validação independente da agregação item a item pela plataforma, uma vez que a regra de seleção do maior fluxo renovável foi aplicada externamente pelo analista, e não pelo *TRIGES*.

Tabela 21 - Indicadores em emergia publicados e recalculados no EC1

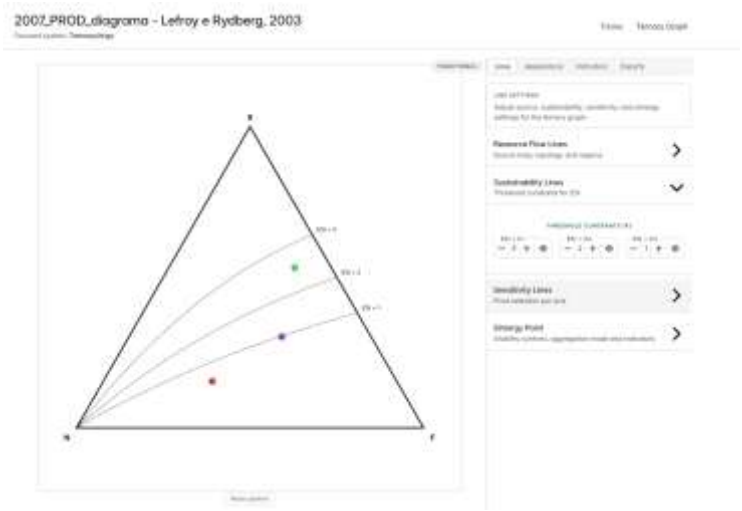
Sistema	**EYR pub./TRIGES**	**EIR pub./TRIGES**	**ELR pub./TRIGES**	**ESI pub./TRIGES**
Tremoço/trigo	3,18 / 3,18	0,46 / 0,46	5,46 / 5,46	0,58 / 0,58
Tagasaste	2,76 / 2,76	0,57 / 0,57	0,88 / 0,88	3,14 / 3,14
Cultivo em ruelas	2,27 / 2,27	0,79 / 0,79	2,31 / 2,31	0,99 / 0,99

Fonte: Giannetti *et al*. (2007, Tabela 8) e recálculo a partir do inventário exportado do *TRIGES*[1].

[1] Desvio máximo entre os valores de maior precisão inferior a 0,63% nos indicadores e a 0,31% nas UEVs de saída.

Uma execução exploratória do painel de saídas do *TRIGES* foi realizada para Tagasaste (forragem arbórea, resíduo lenhoso e fixação de nitrogênio), com cálculo correto das UEVs das três saídas declaradas e na confirmação do funcionamento nativo do módulo de múltiplas saídas; essa execução não foi adotada como evidência final do RF15 por anteceder a correção dos agregados. A evidência funcional utilizada nesta tese é apresentada na Seção 4.3.11 com base no EC4.

Figura 19 - Saída nativa do *TRIGES* para os três sistemas agrícolas, a partir dos fluxos agregados recalculados (EC1)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

4.3.4 Estudo de Caso 2: cotratamento de águas residuárias urbanas e águas ácidas (Bravo Toledo *et al*., 2024)

Este estudo reaplica no *TRIGES* os quatro cenários de cotratamento avaliados por Bravo Toledo et al. (2024) para a região de Pasco, Peru. Cada tratamento foi cadastrado como sistema independente, com os fluxos classificados nas categorias *R*, *N* e *F*.

Tabela 22 - Indicadores publicados e calculados nativamente pelo *TRIGES* no EC2 (cadastro agregado da Tabela 7 do artigo)

Tratamento	**EYR pub./TRIGES**	**EIR pub./TRIGES**	**ELR pub./TRIGES**	**ESI pub./TRIGES**
I	15,26 / 20,66*	0,05 / 0,05	0,45 / 0,45	33,99 / 46,10*
II	10,67 / 10,67	0,10 / 0,10	0,52 / 0,52	20,48 / 20,50
IIIa	5,09 / 6,65*	0,18 / 0,18	0,62 / 0,62	8,17 / 10,69*
IIIb	2,82 / 2,82	0,55 / 0,55	1,22 / 1,23	2,31 / 2,30

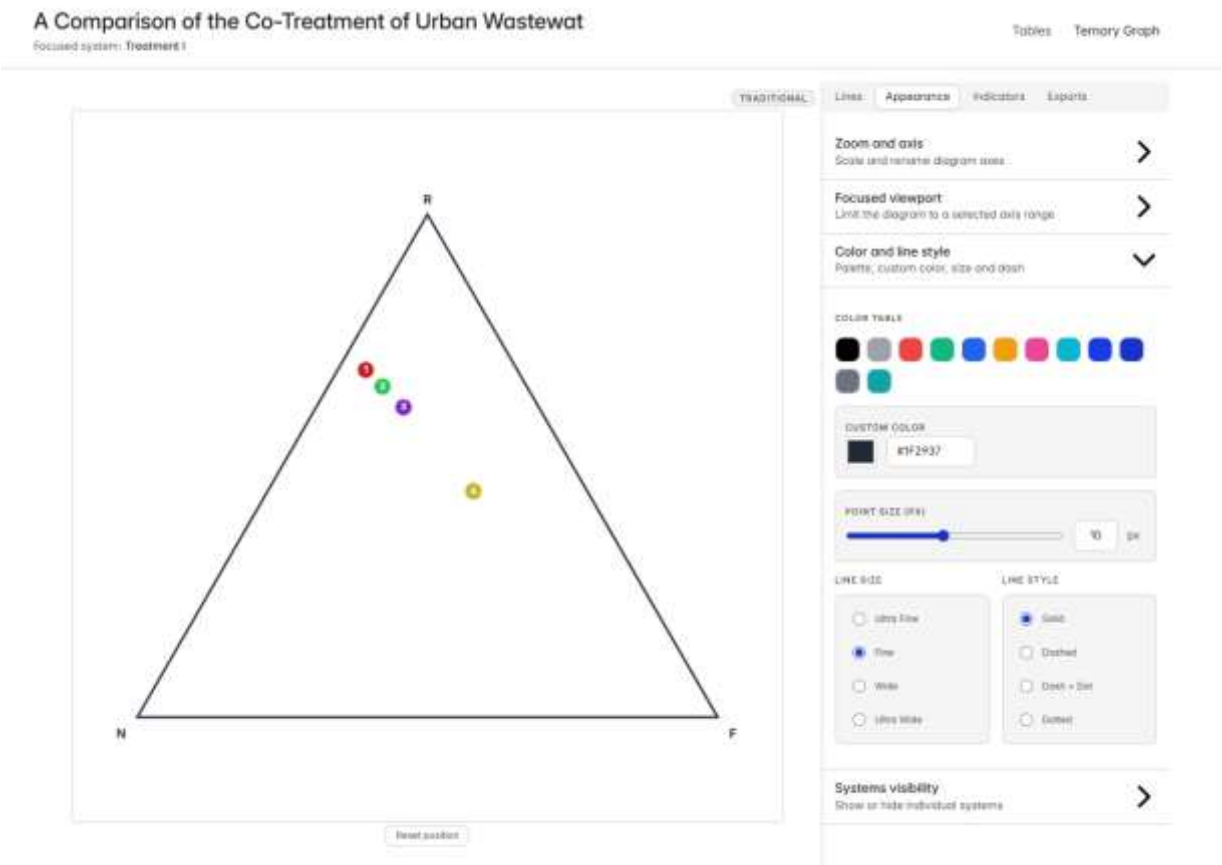
Fonte: Bravo Toledo *et al*. (2024, Tabela 6) e execução do *TRIGES*[2].

A auditoria identificou a causa da divergência: o artigo declara, na Tabela 5, duas grandezas que deveriam ser idênticas por definição, "Total emergy inflows" ($R + N + F + G + P \cdot I^2$) e "Total emergy used, U", mas publica valores diferentes para os Tratamentos I e IIIa, e valores iguais para os Tratamentos II e IIIb. O *TRIGES* reproduz o EYR e o ESI publicados exatamente nos tratamentos em que essas duas grandezas coincidem (II e IIIb), e diverge nos tratamentos em que não coincidem (I e IIIa). A divergência é, portanto, atribuível a uma inconsistência interna do artigo-fonte, e não à implementação do *TRIGES*.

Uma segunda camada de auditoria, com o recadastro granular dos componentes de F declarados nas Tabelas 4 e 5 do artigo, confirma esse diagnóstico: o Tratamento IIIb, que no cadastro agregado da Tabela 7 do artigo chegava a ser classificado pelo *TRIGES* como insustentável (ESI = 0,41, abaixo do limiar clássico), passa a reproduzir integralmente os quatro indicadores publicados (EYR = 2,82; EIR = 0,55; ELR = 1,23; ESI = 2,30) quando *F* é decomposto em seus três componentes declarados. Essa divergência inicial não é atribuída a defeito do *TRIGES*, mas ilustra a sensibilidade do resultado à base de consolidação de dados utilizada.

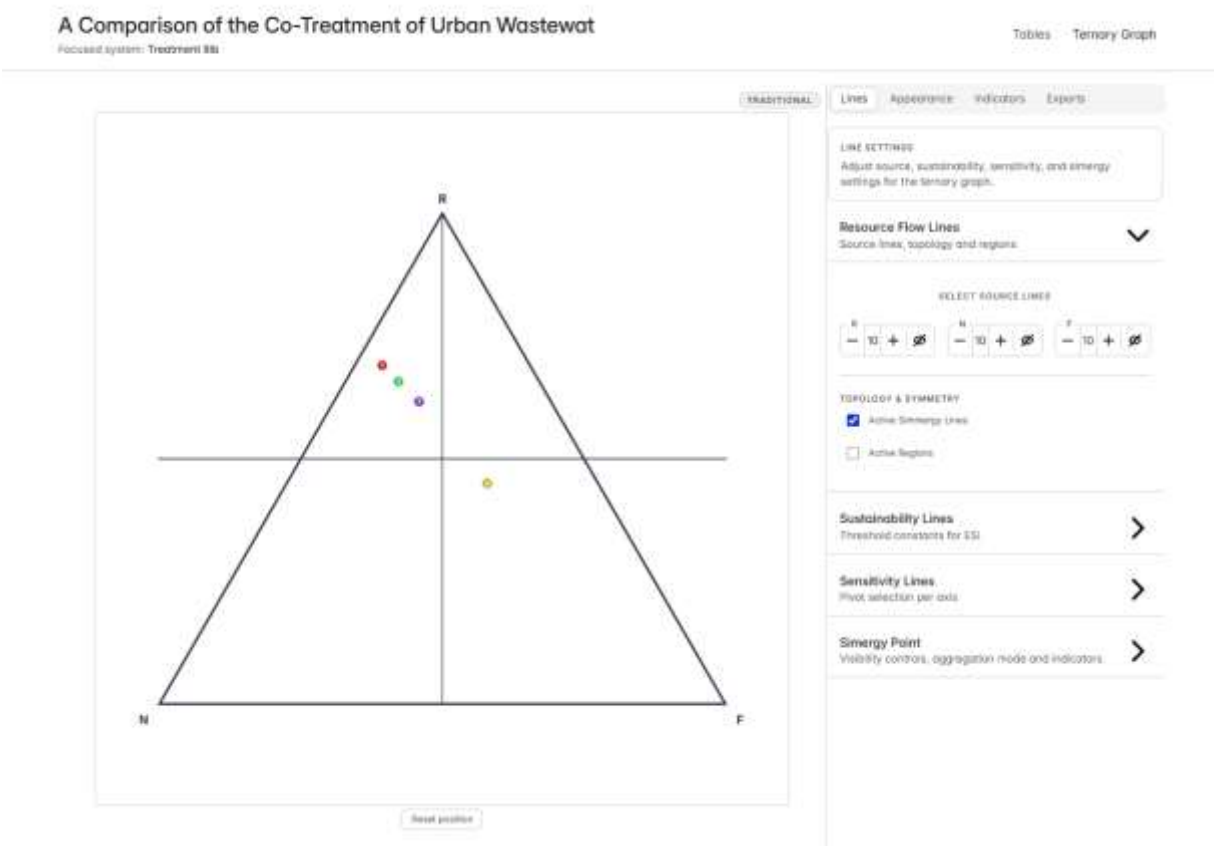
[2] *Valores não equivalentes no cadastro agregado; doze dos dezesseis valores convergem.

Figura 20 - Diagrama ternário produzido pelo TRIGES para os quatro tratamentos de cotratamento (EC2)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

Figura 21 - Diagrama ternário do *TRIGES* após o recadastro granular do Tratamento IIIb, com foco no sistema Treatment IIIb (EC2)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

A convergência numérica é, portanto, parcial (12/16 valores), explicada por uma inconsistência interna do artigo-fonte, e não por erro de implementação do *TRIGES*, conforme documentado no apêndice de nota técnica do EC2.

4.3.5 Estudo de Caso 3: produção de bambu gigante e renovabilidade indireta do trabalho (Bonilla *et al*., 2010)

Este estudo reaplica no *TRIGES* a avaliação emergética da produção de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) em Bauru, São Paulo, publicada por Bonilla *et al*. (2010) para três contextos nacionais de transformidade do trabalho (Brasil, Austrália, China), em duas análises:

4a, com o trabalho integralmente classificado em *F*; e 4b, com parte da emergia do trabalho redistribuída para *R*, conforme a participação renovável nacional publicada pelos autores.

Tabela 23 - Indicadores emergéticos publicados e calculados pelo *TRIGES* no EC3 (formato publicado / *TRIGES*)

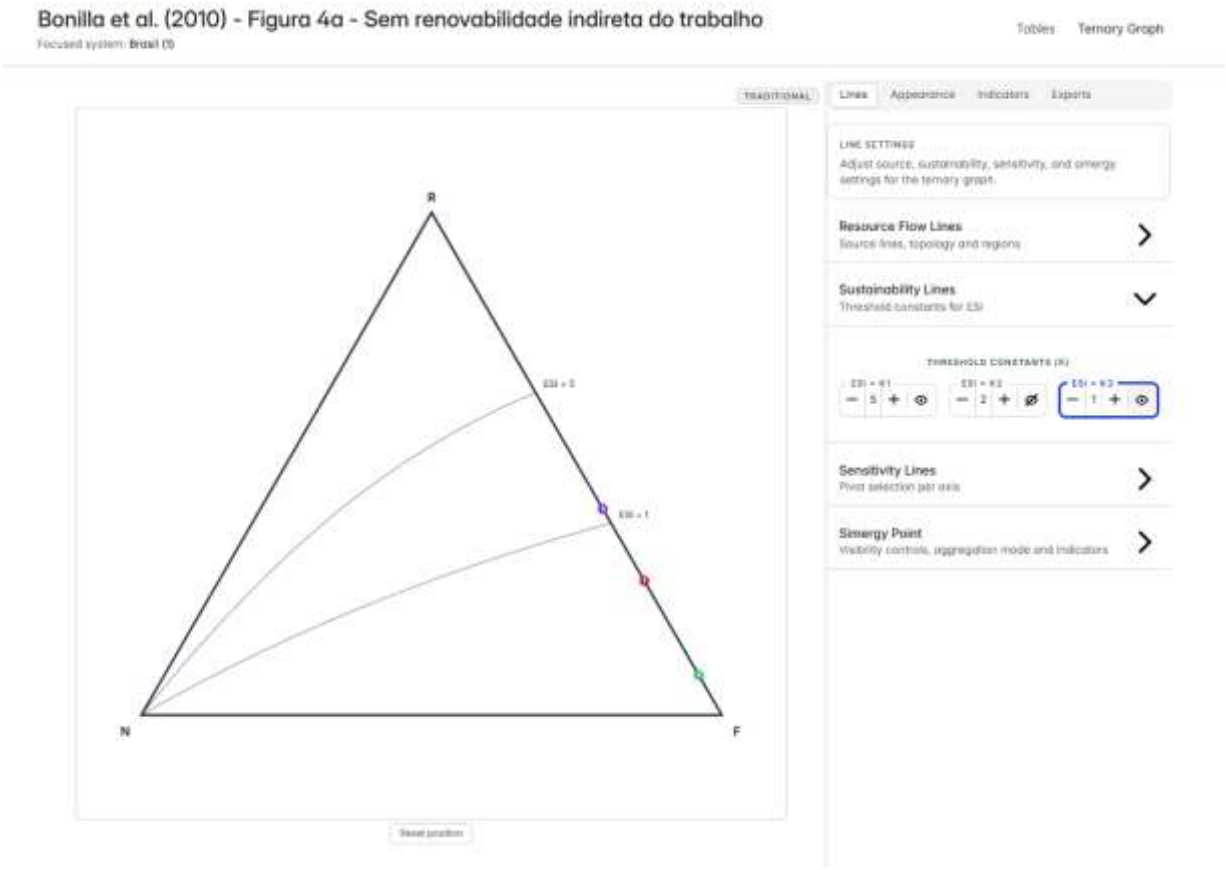
Sistema	**EYR**	**EIR**	**ELR**	**ESI**
Brasil 4a	1,36 / 1,36	2,75 / 2,75	2,75 / 2,75	0,50 / 0,50
Austrália 4a	1,09 / 1,09	11,57 / 11,57	11,57 / 11,57	0,09 / 0,09
China 4a	1,70 / 1,70	1,44 / 1,44	1,44 / 1,44	1,18 / 1,18
Brasil 4b	1,99 / 1,99	1,01 / 1,01	1,01 / 1,01	1,97 / 1,97
Austrália 4b	1,96 / 1,96	1,04 / 1,04	1,04 / 1,04	1,89 / 1,89
China 4b	1,83 / 1,83	1,02 / 1,20*	1,02 / 1,20*	1,53 / 1,53

Fonte: Bonilla *et al*. (2010, Tabela 2) e execução do TRIGES. [3]

A divisão do fluxo de trabalho entre *R* e *F* na análise 4b foi realizada externamente, a partir dos percentuais de renovabilidade nacional já publicados pelos autores; o *TRIGES* cadastra e agrega os dois fluxos resultantes já classificados, sem executar nativamente nenhum cálculo de renovabilidade parcial. Sob essa leitura, a análise 4b é integralmente compatível com o *modo Traditional R*, *N* e *F* avaliado nesta tese: a plataforma não decide a classificação, apenas agrega o que é informado; o mesmo princípio já aplicado ao *módulo Multiple Outputs*.

[3] Os valores publicados de EIR e ELR para China 4b (1,02) são incompatíveis com os fluxos *R*, *N* e *F* publicados na Tabela 7 do artigo; o valor coerente com esses fluxos e com o próprio ESI publicado (1,53) é 1,20, reproduzido pelo *TRIGES*. Divergência atribuída ao artigo-fonte.

Figura 22 - Diagrama ternário do *TRIGES* para a análise 4a (sem renovabilidade indireta do trabalho), sistema de bambu gigante (EC3)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

4.3.6 Estudo de Caso 4: seleção de materiais para embalagens de bebida (Almeida *et al*., 2010)

Este estudo reaplica no *TRIGES* a avaliação emergética de quatro alternativas de embalagem para 1000 L de bebida, publicada por Almeida *et al*. (2010): garrafa PET virgem, garrafa PET-R com 40% de material reciclado, lata de alumínio virgem e lata Al-R com 80% de material reciclado.

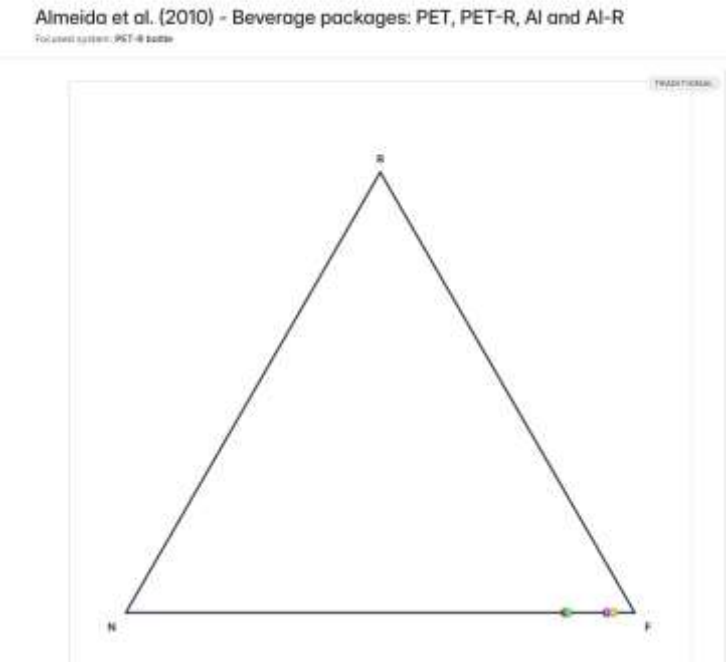
Tabela 24 - Emergia total publicada e calculada pelo *TRIGES* no EC4

Sistema	**Y publicado (sej/FU)**	**Y TRIGES (sej/FU)**	**ΔY**	**Classificação**
PET	9,26E14	9,2616E14	0,02%	Convergência estrita
PET-R	5,86E14	5,8523E14	-0,13%	Divergência explicada
Al	3,02E15	3,0242E15	0,14%	Divergência explicada
Al-R	7,95E14	7,9556E14	0,07%	Convergência estrita

Fonte: Almeida *et al*. (2010, Tabelas 2 a 6) e execução do *TRIGES*[4].

Os desvios superiores a 0,1% de PET-R e Al foram classificados como divergências explicadas, compatíveis com a precisão e o arredondamento dos valores publicados pela fonte.

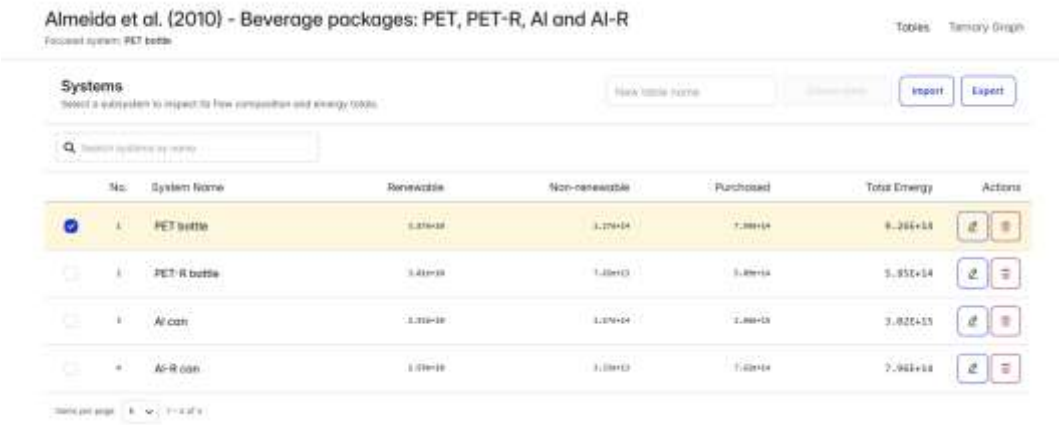
Figura 23 - Diagrama ternário do *TRIGES* com os quatro sistemas de embalagem (EC4)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

[4] Não há captura do painel *Indicators* para este EC; os indicadores tradicionais foram recalculados externamente a partir dos agregados reproduzidos pelo *TRIGES*, distinção mantida explícita para não igualar o nível de evidência deste caso ao nível dos demais.

Figura 24 - Quatro sistemas de embalagem importados no *TRIGES*, com os agregados *R*, *N*, *F* e *Y* (EC4)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

4.3.7 Estudo de Caso 5: nove províncias do Pan-Pearl River Delta (Li *et al*., 2014)

Este estudo reaplica no *TRIGES* os dados provinciais de 2011 utilizados por Li *et al*. (2014) para nove províncias do *Pan-Pearl River Delta* chinês, no nível individual. A unidade de análise é cada província; nenhum total, média ou marcador combinado foi calculado ou interpretado para o conjunto regional. Seis fluxos anuais foram cadastrados por província, mapeados para o modo *Traditional* segundo a correspondência *R* para *R*; *N0* mais *N1* para *N*; F mais *G* mais *P2I* para *F'*.

A Tabela - confronta, para cada uma das nove províncias, os quatro indicadores clássicos e a renovabilidade percentual reproduzidos pelo *TRIGES* com os valores publicados por Li *et al*. (2014, Tabela 3). A camada de linhas de recursos, de sustentabilidade e de sensibilidade foi executada e comparada com os painéis publicados; o nível de sustentabilidade ESI = 0,1 não está presente na configuração capturada.

Tabela 25 - Indicadores emergéticos publicados e calculados pelo TRIGES no EC5 (nove províncias do *Pan-Pearl River Delta*)

Província	**EYR pub./TRIGES**	**EIR pub./TRIGES**	**ELR pub./TRIGES**	**ESI pub./TRIGES**	**%R pub./TRIGES**
Fujian	1,75 / 1,75	1,34 / 1,34	9,16 / 9,17	0,191 / 0,19	9,84 / 9,83
Guangdong	1,32 / 1,32	3,17 / 3,17	18,57 / 18,53	0,071 / 0,07	5,11 / 5,12
Guangxi	2,05 / 2,05	0,95 / 0,95	11,13 / 11,21	0,184 / 0,18	8,24 / 8,19
Guizhou	17,69 / 17,90	0,06 / 0,06	26,26 / 26,41	0,674 / 0,68	3,67 / 3,65
Hainan	2,69 / 2,70	0,59 / 0,59	1,26 / 1,26	2,145 / 2,14	44,34 / 44,21
Hunan	3,13 / 3,13	0,47 / 0,47	23,03 / 23,27	0,136 / 0,13	4,16 / 4,12
Jiangxi	2,70 / 2,69	0,59 / 0,59	16,25 / 16,16	0,166 / 0,17	5,80 / 5,83
Sichuan	4,48 / 4,47	0,29 / 0,29	5,94 / 5,96	0,753 / 0,75	14,40 / 14,37
Yunnan	3,18 / 3,18	0,46 / 0,46	6,26 / 6,27	0,508 / 0,51	13,77 / 13,76

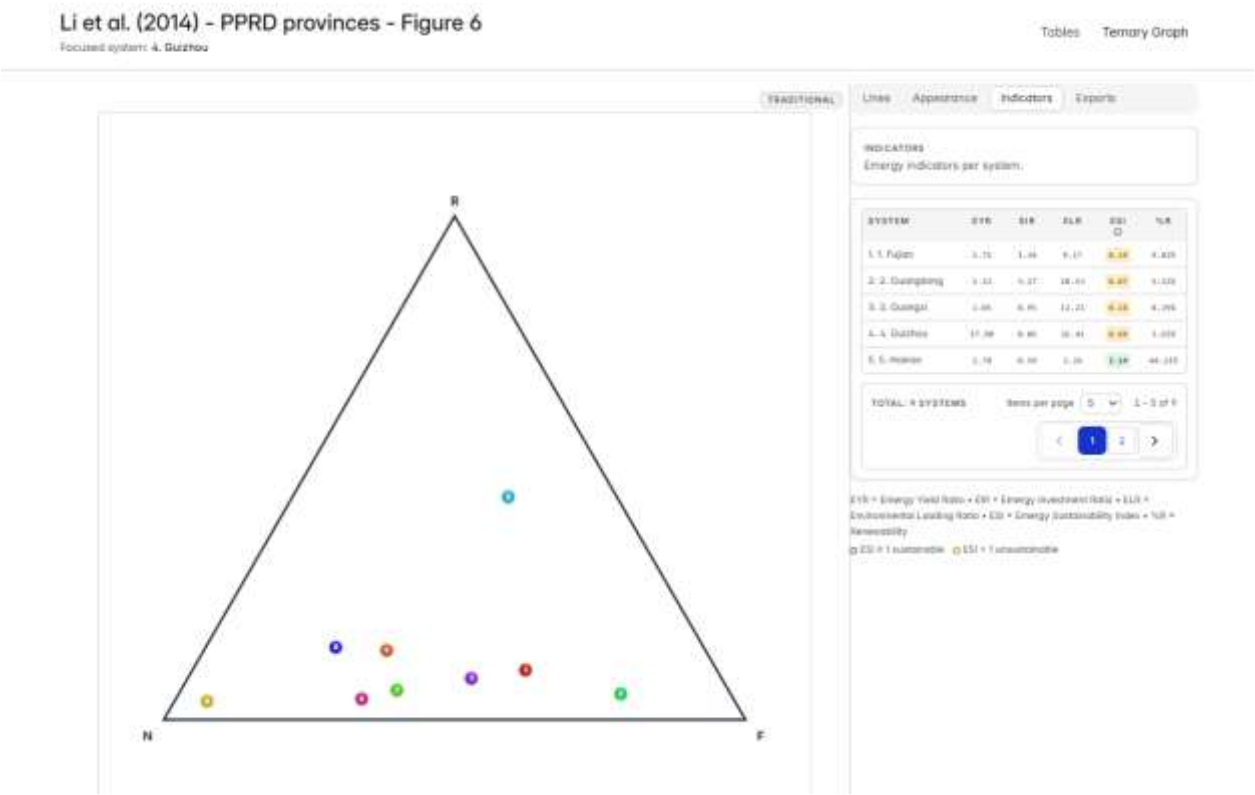
Fonte: Li *et al*. (2014, Tabela 3) e execução do *TRIGES*.

A comparação numérica abrange as quarenta e cinco combinações entre os nove sistemas provinciais e os cinco indicadores clássicos (EYR, EIR, ELR, ESI e %R) *e confronta* os valores publicados na Tabela 3 de Li *et al*. (2014) com os valores calculados nativamente pelo *painel Indicators* do *TRIGES*. Do total, dezesseis comparações atingem convergência estrita (desvio igual ou inferior a 0,1%) e vinte e nove apresentam divergência explicada, atribuída à precisão de duas casas decimais dos agregados de entrada e à apresentação dos indicadores com duas casas decimais no painel, ante as três casas do ESI publicado. Nenhuma divergência não conclusiva foi identificada. A maior diferença relativa registrada foi de -4,41%, no ESI de Hunan. Os dados de entrada foram exportados em formato estruturado (*JSON*), o que permite a reexecução aritmética independente dos quarenta e cinco resultados calculados. Esses resultados foram confrontados com os valores publicados na Tabela 3 de Li *et al*. (2014).

Limitação declarada: o ponto de composição agregada regional do PPRD, a décima composição do artigo original, resultante da agregação ponderada por emergia total das nove províncias, não foi calculado nem renderizado neste estudo de caso, por decisão de escopo explícita adotada na reaplicação. A funcionalidade de agregação ponderada (*Simergy Point*) da plataforma

permanece, portanto, sem validação por execução real contra este *benchmark* específico, e é registrada como trabalho futuro.

Figura 25 - Diagrama ternário dos nove sistemas provinciais e primeira página do painel de indicadores do *TRIGES* (EC5)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

4.3.8 Estudo de Caso 6: *sistema milpa familiar* (Avalos-Rangel *et al*., 2021)

Este estudo reaplica no *TRIGES* o inventário emergético do *sistema milpa familiar* (FMS) de San Bernardino Tepenene, Puebla, México, avaliado por Avalos-Rangel *et al*. (2021) para o ano agrícola de 2018. Dezoito fluxos ativos foram cadastrados e agregados em *R*, *N* e *F*.

Tabela 26 - Confronto entre valores publicados e a reaplicação do FMS completo no EC6

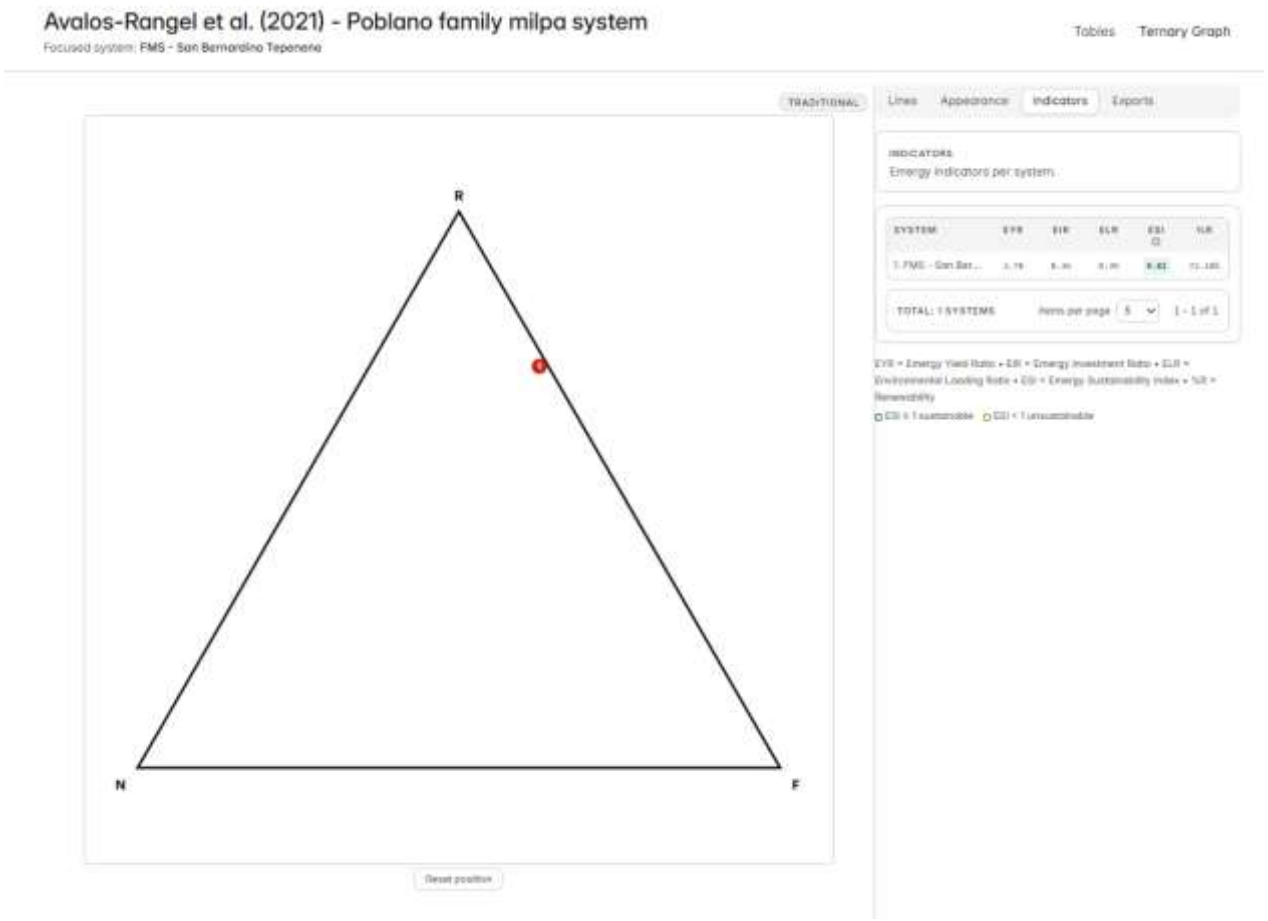
Grandeza	**Artigo**	**TRIGES (tela)**	**Diferença**
R	1,33E16	1,33E16	-0,13%
N	2,57E14	2,58E14	+0,26%
F	4,86E15	4,86E15	+0,05%
Y	1,84E16	1,84E16	+0,02%
EYR	3,78	3,78	+0,13%
ESI	9,80	9,82	+0,20%

Fonte: Avalos-Rangel *et al*. (2021, Tabela 1) e execução do *TRIGES*.

Como exploração funcional adicional, as três colunas por cultura da Tabela 1 do artigo (milho, feijão, abóbora) foram convertidas em três sistemas analíticos no *TRIGES* para testar a comparação multissistema e o *modo de agregação Weighted* (*Simergy Point*). Essa decomposição constitui construção própria desta tese, não sistemas publicados pelos autores, e seus resultados não são atribuídos a Avalos-Rangel *et al*. (2021) nem interpretados como conclusão agronômica sobre a sustentabilidade isolada de cada cultivo.

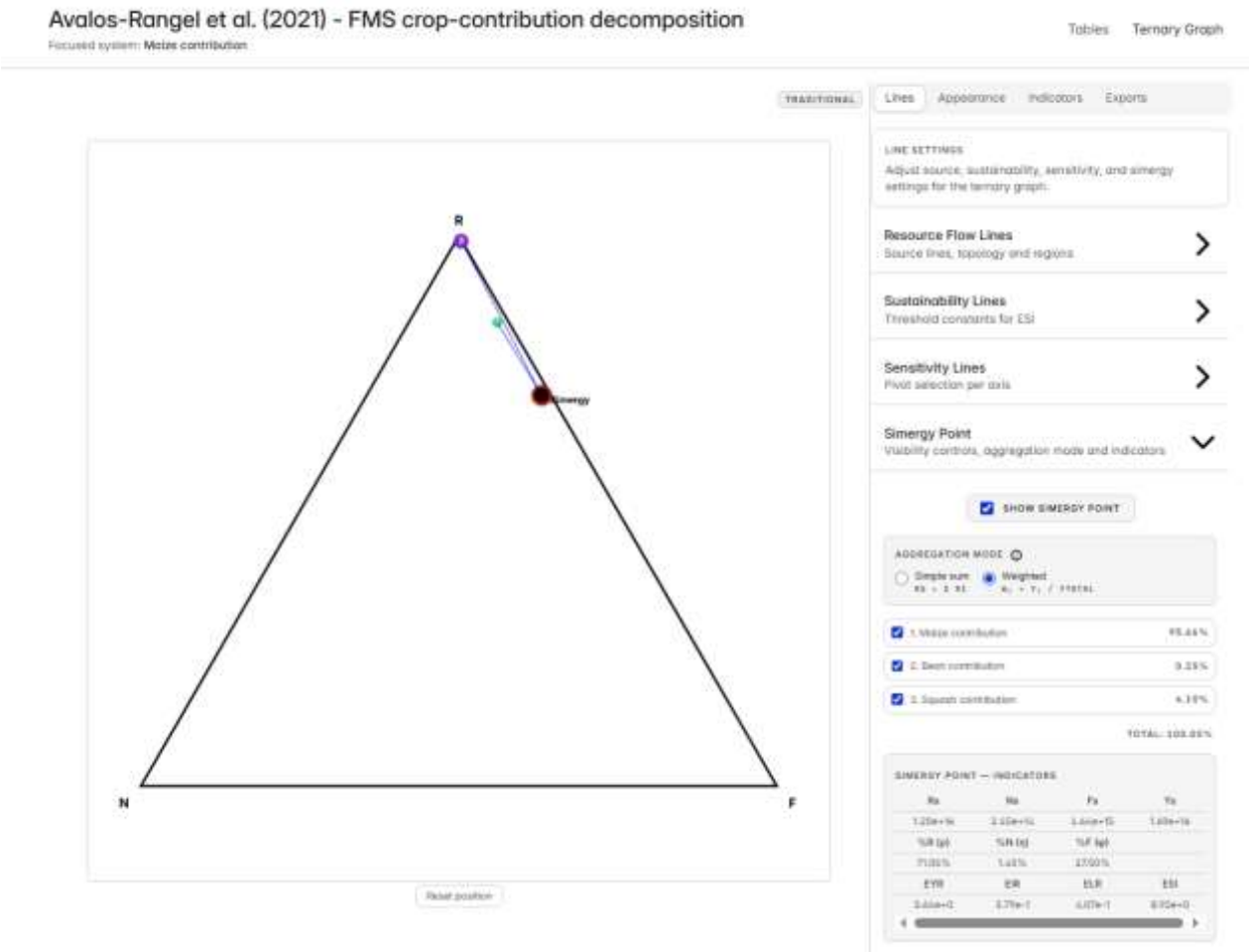
Limitação declarada: o *módulo Multiple Outputs* (RF15), especificamente os sete coprodutos e frações divididas (*splits*) com UEVs de saída próprias documentados na Tabela 2 do artigo, não foi testado neste estudo de caso. A evidência funcional do *painel Outputs* foi obtida separadamente na Seção 4.3.11, com base no EC4, com agregados cuja consistência foi previamente confirmada na comparação numérica oficial do estudo.

Figura 26 - Posição ternária e indicadores nativos do *TRIGES* para o sistema milpa familiar completo (EC6).



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

Figura 27 - Demonstração funcional do modo *Weighted* (*Simergy Point*) aplicado aos três sistemas analíticos por cultura (EC6)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

4.3.9 Estudo de Caso 7: auditoria documental da produção de bio-hidrogênio (Ma *et al*., 2013)

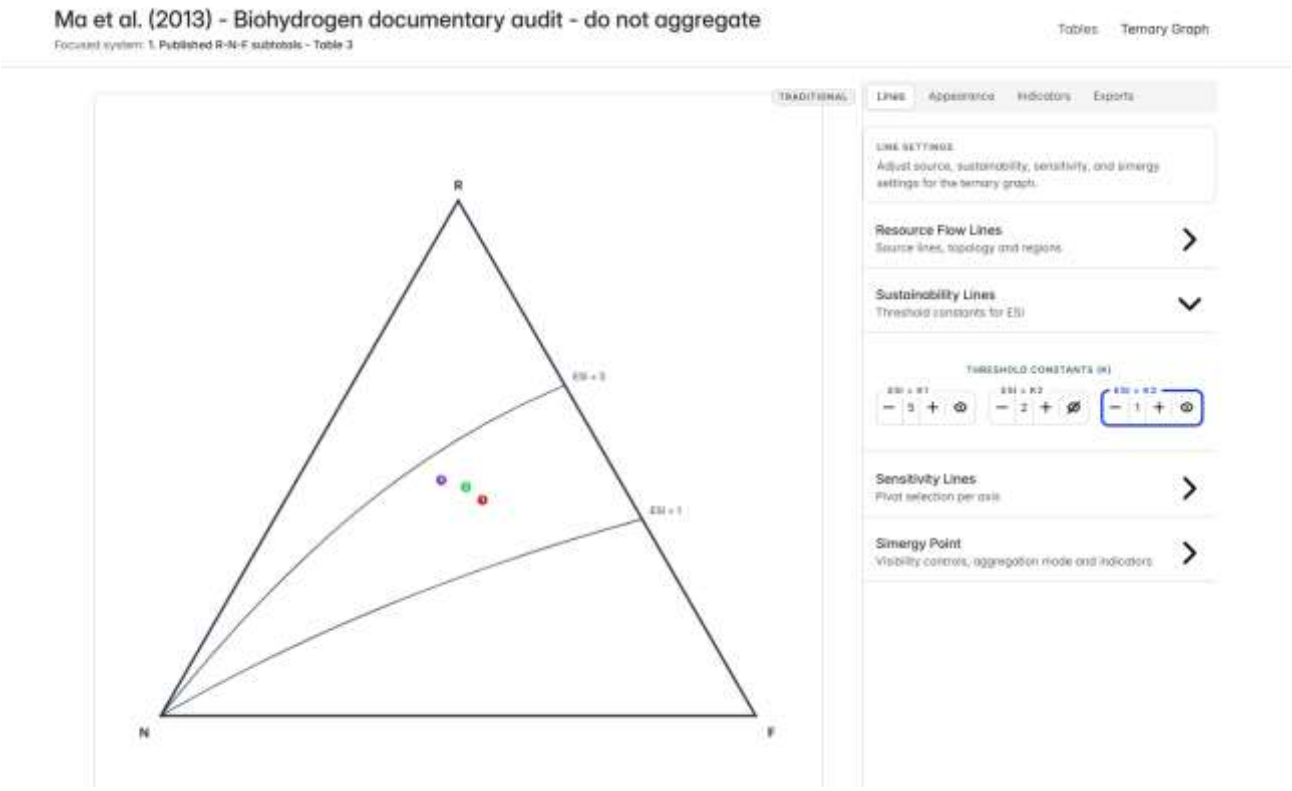
Este estudo difere estruturalmente dos seis anteriores: não é uma reprodução única, mas uma auditoria documental em três camadas paralelas e mutuamente excludentes da mesma planta demonstrativa de produção de bio-hidrogênio avaliada por Ma *et al*. (2013): subtotais publicados ao final da Tabela 3 do artigo; soma das emergias publicadas linha a linha; e recomposição quantidade vezes UEV.

Tabela 27 - Indicadores publicados e recalculados nas três camadas documentais do EC7

Camada	EYR	EIR	ELR	ESI	%R
Artigo (Tabelas 3 e 4)	3,21	0,50	1,39	2,31	42,00%
Subtotais publicados	3,02	0,50	1,39	2,18	41,89%
Emergias por linha	3,44	0,41	1,25	2,75	44,43%
Quantidade x UEV	4,12	0,32	1,18	3,48	45,77%

Fonte: Ma *et al*. (2013, Tabelas 3 e 4) e execução do *TRIGES*[5].

Figura 28 - Diagrama ternário do *TRIGES* com os pontos das três camadas documentais e linhas de sustentabilidade (EC7)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

[5] EIR e ELR reproduzem os valores publicados quando arredondados a duas casas decimais; EYR e ESI não fecham com os subtotais impressos no artigo, divergência atribuída à incompatibilidade interna dos números publicados e não à implementação do *TRIGES*. Nenhum resultado agregado entre as três camadas foi utilizado.

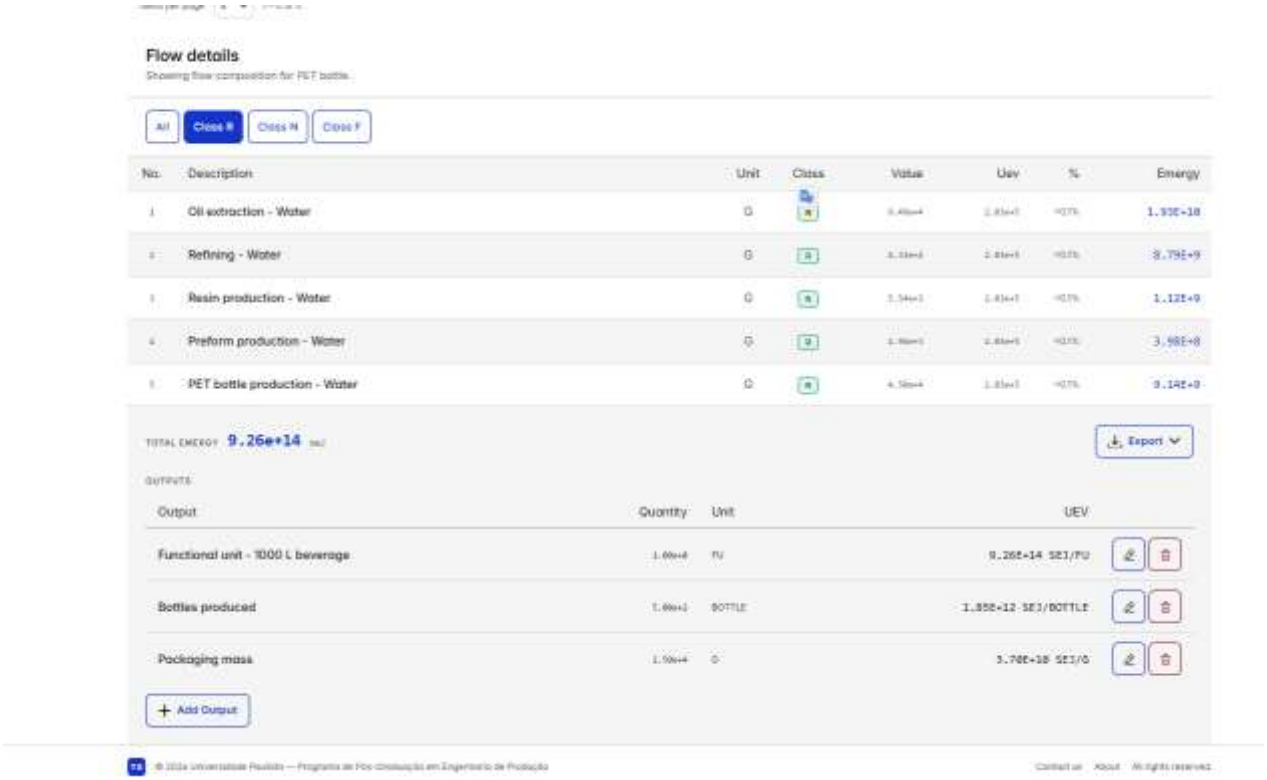
4.3.10 Síntese comparativa dos sete estudos de caso

Em conjunto, os sete estudos de caso confirmam que a plataforma *TRIGES* implementou corretamente o núcleo metodológico da contabilidade emergética clássica no modo *Traditional R*, *N* e *F* nos testes realizados, com resultados que variam por estudo: aderência numérica com desvios explicados de até 0,63% no EC1; doze comparações com convergência estrita e quatro inconsistências estruturais da fonte no EC2; vinte e duas comparações com convergência estrita e duas inconsistências estruturais no cenário China 4b do EC3; duas comparações com convergência estrita e dois desvios explicados de 0,13% e 0,14% no EC4; dezesseis convergências estritas e 29 divergências explicadas nas 45 comparações do EC5; convergência estrita para *Y*, com desvio de 0,02%, e divergências explicadas de até 0,26% nas demais grandezas no EC6; no EC7, EIR e ELR compatíveis com a precisão da fonte, com EYR e ESI classificados como inconsistências estruturais. Duas limitações permanecem declaradas e não devem ser confundidas com capacidades demonstradas: a agregação ponderada regional (*Simergy Point*) não foi executada contra o *benchmark* do EC5; o *módulo Multiple Outputs* com coprodutos e *splits* (RF15) não foi executado contra o *benchmark* do EC6, embora sua operação nativa esteja evidenciada separadamente na Seção 4.3.11, com base no EC4.

4.3.11 Evidência funcional do *módulo Multiple Outputs* (RF15)

O *painel Outputs* do *TRIGES* foi verificado quanto ao cálculo nativo de UEVout = Y/Q a partir de uma captura de tela do sistema de embalagem PET virgem (EC4, Almeida *et al*., 2010), cujo total emergético (Y = 9,26E14 sej) já havia sido validado na comparação numérica oficial do estudo, com desvio de 0,02% em relação ao valor publicado, conforme a Seção 4.3.6. Para as três saídas declaradas do sistema, unidade funcional de 1000 L de bebida (1 FU), garrafas produzidas (500 unidades) e massa de embalagem (25.000 g), a interface exibiu UEVs de 9,26E14 sej/FU, 1,85E12 *sej/BOTTLE* e 3,70E10 *sej/G*, respectivamente, valores integralmente consistentes com a divisão do total emergético exibido pela quantidade de cada saída.

Figura 29 - Painel *Outputs* do *TRIGES* para o sistema de embalagem PET virgem, com as UEVs calculadas nativamente para três saídas declaradas (EC4)



Fonte: *TRIGES*, execução fornecida pelo autor.

A captura utiliza os agregados do EC4 previamente validados na comparação numérica oficial do estudo e garante coerência entre a evidência funcional do RF15 e os resultados reportados na Seção 4.3.6.

Essa evidência atende parcialmente à lacuna deixada pelo EC6 (Seção 4.3.8), que não testou os coprodutos e *splits* do artigo de Avalos-Rangel *et al*. (2021). A verificação aqui apresentada confirma o funcionamento do cálculo de UEV por saída para múltiplas saídas simultâneas de um mesmo sistema, mas não constitui evidência de que o *TRIGES* processe corretamente frações divididas (*splits*) entre coprodutos com regras de alocação declaradas pelo pesquisador; essa função permanece como limitação declarada e é candidata a avaliação futura.

4.3.12 Limitações técnicas identificadas no relatório exportado do *TRIGES*

A auditoria realizada no âmbito do EC2 (Seção 4.3.4) identificou defeitos confirmados na camada de relatório exportado pela plataforma, distintos dos cálculos de indicadores e da renderização do diagrama ternário, que permaneceram corretos. O relatório examinado exibiu os seguintes problemas: a coluna "Valor" apresentou 0,00E+00 quando o cadastro operacional utilizou valor unitário igual a 1; a coluna de emergia repetiu o total *Y* do sistema nas três linhas correspondentes a *R*, *N* e *F*, em vez de exibir o fluxo individual de cada classe; o percentual do cenário foi repetido de forma idêntica em cada linha; o campo "Total da Fase" somou os totais de quatro tratamentos mutuamente exclusivos como se constituíssem um único sistema, quando o valor correto seria um subtotal independente de *Y* para cada tratamento.

Esses problemas afetam exclusivamente a camada de exportação de relatório; os painéis de cadastro, o cálculo de indicadores e o diagrama ternário, verificados de forma independente nos sete estudos de caso, não apresentaram as mesmas inconsistências. Por essa razão, o relatório exportado não foi utilizado como evidência numérica final em nenhum dos estudos de caso desta tese; a avaliação apoiou-se nos painéis de fluxo, indicadores e diagrama, e nos arquivos *JSON* exportados diretamente do cadastro operacional.

Recomenda-se, como melhoria técnica para versões futuras da plataforma, a correção da camada de geração de relatório para exibir o valor efetivamente cadastrado, a emergia individual de cada classe por linha, o percentual específico de cada componente e um subtotal de emergia total independente por sistema, além da revisão da nomenclatura do campo *F* para refletir com precisão a definição de recursos provenientes da economia.

4.3.13 Auditoria documental complementar de Karuppiah, Sankaranarayanan e Ali (2022)

Um exercício de recálculo independente adicional pode ser realizado a partir de Karuppiah, Sankaranarayanan e Ali (2022), que compararam quatro fornecedores da indústria de curtumes indiana (Fornecedor 1 a Fornecedor 4) por meio da contabilidade em emergia *Traditional*. O fato classificou os fluxos em *R* (sol, chuva, vento), *N* (água) e *F* (maquinário, eletricidade, produtos químicos e trabalho), com UEVs referenciados à *GEB* de Brown *et al*. (2016) ($12{,}0 \times 10^{24}$ sej/ano). O artigo publica os valores agregados de *R*, *N*, *F* e *U*, denominado pelos autores como *U*, correspondente funcionalmente ao *Y* empregado nesta tese, na Tabela 2,

os indicadores EYR, ELR, ESI, %R, ESR, e ED na Tabela 3 e um exemplo de cálculo pormenorizado no Apêndice B.

Aplicando as equações canônicas desta tese ($Y = R + N + F$; $EYR = \frac{Y}{F}$; $EIR = \frac{F}{R+N}$; $ELR = \frac{N+F}{R}$; $ESI = \frac{EYR}{ELR}$; $\%R = \frac{R}{Y}$) diretamente aos valores de R, N e F publicados na Tabela 2 do artigo original, obtêm-se os resultados apresentados na tabela a seguir, comparados aos valores publicados na Tabela 3.

Tabela: Indicadores publicados por Karuppiah, Sankaranarayanan e Ali (2022) comparados ao recálculo independente pelas equações *Traditional* desta tese

Fornecedor	EYR pub.	EYR rec.	ELR pub.	ELR rec.	ESI pub.	ESI rec.	%R pub.	%R rec.	ED pub. (sej/m²)	ED rec. (sej/m²)	Desvio ED
Fornecedor 1	1,09	1,11	9,43	9,43	0,12	0,12	9,68%	9,59%	1,87E+11	2,28E+11	+22,0%
Fornecedor 2	1,11	1,10	10,32	10,32	0,11	0,11	8,84%	8,83%	2,01E+11	2,60E+11	+29,2%
Fornecedor 3	1,07	1,07	14,45	14,45	0,07	0,07	6,48%	6,47%	2,87E+11	2,73E+11	−5,0%
Fornecedor 4	1,08	1,07	13,92	13,92	0,08	0,08	6,72%	6,70%	2,89E+11	1,92E+11	−33,2%

Fonte: elaborado pelo autor a partir da Tabela 2 (*R*, *N*, *F*, *U* publicados) e da Tabela 3 (indicadores publicados) de Karuppiah, Sankaranarayanan e Ali (2022)[6].

[6] Recálculo pelas equações ($Y = R + N + F$; $EYR = \frac{Y}{F}$; $EIR = \frac{F}{R+N}$; $ELR = \frac{N+F}{R}$; $ESI = \frac{EYR}{ELR}$; $\%R = \frac{R}{Y}$), aplicadas aos valores de *R*, *N* e *F* publicados.

O recálculo aproxima-se dos valores publicados para EYR (desvio máximo de aproximadamente 1,5%) e converge quase exatamente para ELR (desvio inferior a 0,1% nos quatro fornecedores). Para ESI e para %R, os desvios relativos são maiores (até aproximadamente 6% e 1%, respectivamente), efeito esperado da baixa resolução decimal adotada pelos autores para indicadores de pequena magnitude, o mesmo padrão já observado no recálculo de Bonilla *et al*. (2010) na Seção 4.3.5, e não indício de erro sistemático de cálculo.

A soma independente dos fluxos elementares de *R* (sol, chuva e vento) reproduz o total de R publicado com desvio inferior a 1,2% para os quatro fornecedores, compatível com arredondamento das linhas individuais. Na coluna de *N* (água), a leitura do dado bruto do Fornecedor 2 na tabela original (30,00) é ambígua; interpretada como 30.000 kg, hipótese que reproduz exatamente o *N* publicado (1,23 × 10^9 sej). A soma de N converge para os Fornecedores 1, 2 e 3 (desvio inferior a 1%), mas diverge cerca de 14% para o Fornecedor 4, sem explicação disponível nos dados publicados. Na coluna de F, a soma das quatro linhas (maquinário, eletricidade, produtos químicos e trabalho) diverge do total F publicado entre 0,0% e 1,0% conforme o fornecedor, também compatível com arredondamento. A exceção é a linha de maquinário, cuja emergia individual publicada na Tabela 2 (ordem de 10^9 sej) é sistematicamente dez vezes maior que o produto direto entre a quantidade em gramas e a UEV publicada ($2{,}49 \times \frac{10^9 sej}{g}$), um fator de dez que se repete nos quatro fornecedores e sugere erro tipográfico de casa decimal na coluna de emergia do maquinário, sem efeito relevante sobre *F* devido à magnitude pequena dessa linha frente às demais.

A auditoria do indicador de densidade emergética ($ED = \frac{U}{Área}$) revela uma inconsistência estrutural mais relevante. Recalculando ED a partir do U publicado na Tabela 2 e das áreas informadas na Tabela 1, os valores obtidos divergem entre 5% e 33% dos valores publicados na Tabela 3, desvio muito superior ao explicável por arredondamento. A investigação da área implícita em cada ED publicado ($Área = \frac{U}{ED}$) mostra que essa área corresponde, com desvio inferior a 0,2%, à área de um fornecedor diferente do informado na linha correspondente da Tabela 3: o ED do Fornecedor 1 foi aparentemente calculado com a área do Fornecedor 4 (30.000 m²), o do Fornecedor 2 com a área do Fornecedor 1 (24.545 m²),

o do Fornecedor 3 com a área do Fornecedor 2 (18.985 m²) e o do Fornecedor 4 com a área do Fornecedor 3 (20.000 m²), um padrão de deslocamento cíclico de uma posição entre a coluna de área (Tabela 1) e o cálculo de ED (Tabela 3). Esse achado é consistente com a inconsistência identificada também no Apêndice B do artigo, cujo cálculo de exemplo para o 'Fornecedor 1' emprega área de 30.000 m² e insolação associada a Chennai, dados que, na Tabela 1, correspondem ao Fornecedor 4 e à empresa focal, respectivamente, não ao Fornecedor 1 (Maharashtra, 24.545 m²). A convergência entre as duas auditorias independentes, a do indicador ED e a do Apêndice B, reforça a hipótese de uma troca sistemática de identificação de fornecedores em parte dos cálculos auxiliares do artigo original, não atribuível ao *TRIGES* nem a este recálculo.

Esse recálculo não constitui um novo estudo de caso executado e avaliado desta tese: os valores não foram cadastrados nem executados na plataforma *TRIGES*, condição estabelecida nesta tese como critério de promoção a estudo de caso. Permanece, portanto, como candidato a um eventual estudo de caso futuro, condicionado ao cadastro do inventário completo (fluxos elementares com UEVs individuais) na plataforma e à verificação de que a implementação aceita os três conjuntos *R*, *N* e *F* sem exigir renovabilidade parcial ou funcionalidade fora do escopo *Traditional*. Ainda assim, o exercício bibliográfico já contribui para a tese em dois sentidos: primeiro, estende a um domínio industrial e de decisão comparativa entre fornecedores, distinto dos domínios territoriais e ecossistêmicos cobertos por EC1–EC7 e pelos recálculos de Lefroy e Rydberg (2003) e Bonilla *et al*. (2010), a utilidade do protocolo de auditoria aplicado às equações canônicas *Traditional R*, *N* e *F*; segundo, demonstra que uma auditoria estruturada, aplicada a uma publicação revisada por pares, é capaz de localizar e quantificar inconsistências internas específicas, o possível deslocamento cíclico de áreas no cálculo de ED, coerente com a inconsistência do Apêndice B, sem necessidade de ajustar arbitrariamente o método para produzir concordância artificial com os valores impressos.

4.4 Discussão integrada dos estudos de caso

Os sete estudos de caso, quando examinados em conjunto, permitem interpretar a contribuição da plataforma em nível mais amplo do que a simples replicação de resultados publicados. Em todos eles, a plataforma centralizou o armazenamento, a consolidação e o cálculo dos dados após os procedimentos metodológicos externos devidamente declarados em

cada estudo de caso. Ela operou como infraestrutura integrada de cadastro de fluxos, cálculo de indicadores, projeção ternária e comparação entre sistemas. Essa leitura integrada evidencia três dimensões complementares de contribuição: padrões emergéticos observados, unificação metodológica e consistência arquitetural observada nas condições avaliadas.

4.4.1 Padrões em emergia observados

Os estudos de caso apresentam comportamentos distintos, coerentes com a diversidade dos sistemas e com as diferentes granularidades documentais das fontes. No EC1, os três sistemas agrícolas apresentaram composições e indicadores diferentes, com ESI de 0,58 para a rotação tremoço/trigo, 3,14 para Tagasaste e 0,99 para o cultivo em ruelas. A comparação exigiu a aplicação externa da regra de seleção do maior fluxo renovável entre entradas biofisicamente acopladas, pois o *TRIGES* agrega os fluxos classificados pelo analista, mas não identifica automaticamente relações de dupla contagem.

No EC3, a substituição da transformidade do trabalho entre os contextos Brasil, Austrália e China alterou F e os indicadores derivados. A análise 4b mostrou adicionalmente o efeito da redistribuição externa de parte da emergia do trabalho entre *R* e *F*. O *TRIGES* processou os fluxos previamente classificados, sem calcular nativamente renovabilidade parcial. A incompatibilidade dos valores de EIR e ELR publicados para China 4b foi tratada como inconsistência interna da fonte, porque o valor 1,20 calculado a partir dos fluxos publicados é coerente com o ESI informado.

No EC4, os quatro sistemas de embalagem apresentaram desvios de *Y* entre 0,02% e 0,14%. Como não houve captura do painel nativo de indicadores, a evidência desse caso deve permanecer limitada ao fechamento dos agregados, à emergia total e à representação ternária, sem ampliar a conclusão para uma validação integral dos indicadores. No EC5, as nove províncias foram avaliadas individualmente; permaneceu fora da execução o ponto de composição agregada regional. No EC6, o inventário do *sistema milpa familiar* foi reproduzido, enquanto a decomposição por culturas e o ponto ponderado constituíram exploração funcional própria da tese, não conclusão agronômica do artigo original.

Os EC2 e EC7 evidenciaram o papel diagnóstico do protocolo. No EC2, doze dos dezesseis valores comparados convergiram, enquanto as divergências dos Tratamentos I e IIIa foram relacionadas à incompatibilidade interna entre grandezas apresentadas pela fonte. No EC7, as três camadas documentais produziram resultados diferentes, porque subtotais, emergias

linha a linha, e recomposição quantidade vezes UEV não são mutuamente equivalentes. Esses resultados demonstram que a plataforma e o protocolo permitem distinguir aderência computacional, limitação de resolução e inconsistência documental, sem certificar automaticamente a validade científica da fonte.

4.4.2 Contribuição metodológica da unificação

A unificação dos estudos de caso em um único capítulo de resultados evidencia que a consistência dos mesmos resultados não decorre de um único experimento bem-sucedido, mas do comportamento funcional e numérico observado ao longo dos estudos executados. A plataforma mostrou-se apta a processar sistemas agrícolas reais (EC1, EC3, EC6), cenários de saneamento ambiental (EC2: quatro cenários de tratamento de águas), casos de *ecodesign* (EC4: quatro alternativas de embalagem), avaliações territoriais multissistema (EC5: nove províncias) e auditoria documental de fontes com inconsistências internas (EC7), e manteve a lógica computacional e a mesma coerência geométrica.

Essa leitura integrada permite distinguir dois papéis complementares da plataforma. O primeiro é reprodutivo: reproduzir resultados publicados quando os dados são internamente consistentes, como se observou em EC1 e, de forma substancial, em EC3 e EC4. O segundo é diagnóstico: explicitar incoerências estruturais quando elas existem, como no EC2, sem recorrer a correções manuais *ad hoc* que comprometam a rastreabilidade analítica. Nesse sentido, o artefato não funciona apenas como calculadora automatizada, mas como infraestrutura metodológica capaz de fortalecer a auditabilidade dos estudos em emergia.

4.4.3 Evidências de consistência arquitetural nos estudos avaliados

Os estudos de caso confirmam empiricamente três propriedades arquiteturais centrais da plataforma. A primeira é a garantia, por construção, da restrição $Y = R + N + F$ e da derivação automática de porcentagens a partir dos valores absolutos, o que reduz o risco de dessincronias entre inventário e indicadores nos mecanismos contemplados pela arquitetura. Essa propriedade foi particularmente evidente no EC2 e, nele, a imposição rigorosa da identidade fundamental expôs inconsistências que permaneciam invisíveis em análises manuais. A segunda é a unicidade do inventário de fluxos, armazenado em banco de dados relacional e utilizado como

única fonte para todos os cálculos derivados. Essa propriedade reduz riscos de divergência entre tabelas, versões paralelas de planilhas e ajustes locais não propagados.

A terceira é a correção geométrica da projeção ternária. Em EC1 e EC2, a comparação entre os diagramas originais e os diagramas gerados pela plataforma revelou inversão horizontal na disposição lateral dos vértices N e F em relação às figuras publicadas. Verificou-se que essa diferença corresponde a uma transformação de reflexão no plano cartesiano, que preserva integralmente as propriedades composicionais e a leitura das proporções por perpendiculares ao lado oposto, não constituindo erro de projeção. No EC5, as linhas de recursos configuradas na plataforma (R = 0,05; N = 0,60; F = 0,35) reproduziram integralmente os limiares publicados por Li *et al*. (2014). Essa comparação com diagrama publicado ocorreu em apenas dois dos sete estudos de caso, EC1 e EC2, únicos casos em que a fonte disponibilizava figura ternária original passível de contraste direto. Nos demais cinco estudos e nas verificações sintéticas detalhadas na Seção 4.5, a coerência geométrica foi examinada por consistência algébrica interna entre a formulação do Capítulo 2 e a implementação computacional, sem confronto com figura externa independente. Giannetti *et al*. (2013) reconhecem o diagrama ternário como instrumento de verificação de robustez metodológica em contabilidade em emergia mesmo quando aplicado pelo mesmo analista, o que confere lastro à prática adotada nesta tese, sem equivaler a validação por avaliador externo independente.

4.4.4 Implicações para a tese

A integração dos sete estudos de caso reforça a tese central de que a lacuna computacional na contabilidade emergética não se limita à ausência de uma interface conveniente. Ela envolve fragmentação de dados, fragilidade de processamento, baixa rastreabilidade de transformidades e risco de inconsistência na geração de diagramas ternários. Os resultados deste capítulo mostram que a plataforma *TRIGES* responde a essas limitações ao reunir, em um mesmo ambiente *web*, cadastro de UEVs com rastreabilidade, inventário de fluxos, cálculo padronizado de indicadores e visualização ternária interativa. Desse modo, os estudos de caso deixam de ser apenas exemplos de uso e passam a funcionar como evidência empírica de que a plataforma implementou corretamente o núcleo metodológico da contabilidade emergética clássica nos testes realizados, o que atende aos requisitos de avaliação estabelecidos pela metodologia *Design Science Research.*

Os dados de Lefroy e Rydberg (2003) e de Bonilla *et al*. (2010) foram cadastrados e executados no *TRIGES*, conforme documentado nas Seções 4.3.3 (EC1) e 4.3.5 (EC3), *o que inclui* a correção da regra de agregação de *R* e o cenário de redistribuição do trabalho entre *R* e *F*.

4.5 Verificação da coerência geométrica do diagrama ternário

Enquanto a Seção 4.3 demonstrou a aderência numérica dos indicadores calculados pela plataforma em relação aos resultados publicados, esta seção verifica se a tradução geométrica dessas relações no espaço ternário também foi implementada corretamente. A verificação da coerência geométrica examina se os elementos analíticos do diagrama ternário são algebricamente consistentes com as equações apresentadas no Capítulo 2. Conforme especificado na Seção 3.7 do Capítulo 3, foram realizados três conjuntos de verificações: comparação entre coordenadas teóricas e coordenadas fornecidas à operação de desenho no Canvas; aderência das curvas de sustentabilidade ESI = 1 e ESI = 5 a pontos de referência definidos analiticamente; comparação entre a posição calculada e a posição obtida para o desenho do ponto de composição emergética agregada para conjuntos conhecidos de *Points*.

A Tabela 44 sintetiza os procedimentos adotados, os critérios de aceitação e os resultados observados. O critério uniforme de aceitação foi erro máximo de 1 *pixel* em resolução de 560 × 560, tolerância operacional adotada nesta verificação geométrica; evitou-se ruído *subpixel* irrelevante para interpretação gráfica.

Tabela 28 - Síntese dos testes de coerência geométrica

Conjunto de verificação	**Procedimento adotado**	**Critério de aceitação**	**Resultado observado**
Coordenadas teóricas versus coordenadas obtidas para o desenho	Comparação entre coordenadas baricêntricas convertidas analiticamente e coordenadas efetivamente fornecidas à operação ctx.arc() para o desenho	Erro máximo de 1 pixel em resolução de 560 × 560.	Os dez pontos testados apresentaram erro euclidiano de 0 px (11/11 testes aprovados; detalhamento na tabela desta seção).

	dos pontos, para dez pontos de referência.		
Curvas ESI = 1 e ESI = 5	Cálculo analítico de cinco pontos de referência pertencentes às curvas e comparação com as curvas geradas pelo algoritmo.	As curvas devem atravessar os pontos de referência dentro da tolerância de 1 pixel.	Em todos os casos, as curvas passaram pelos pontos calculados, confirmando aderência algébrica.
Ponto de composição emergética agregada	Cálculo da média ponderada em coordenadas baricêntricas para três conjuntos conhecidos de Points e comparação com a posição renderizada.	Coincidência posicional dentro da mesma tolerância de 1 pixel.	As posições obtidas para o desenho coincidiram com as posições esperadas, confirmando a implementação correta da média ponderada.

Fonte: Autor (2026).

A coerência geométrica da representação ternária foi verificada por meio de teste automatizado aplicado a dez composições de referência: os três vértices, o centroide, os pontos médios das três arestas e os três pontos internos. O teste foi executado em canvas de 560 × 560 *pixels*, com *zoom* unitário e sem *viewport* regional. As coordenadas teóricas em *pixels* foram calculadas por uma reimplementação separada no arquivo de teste, sem importar a função *convertToPixel()* utilizada pelo código de produção e comparadas com as coordenadas efetivamente fornecidas à operação de desenho dos pontos. Nas condições avaliadas, os dez pontos apresentaram erro euclidiano igual a 0 px, sem diferença entre as coordenadas teóricas e obtidas; não houve ponto com erro superior aos demais. Os 11 testes dessa verificação foram aprovados, assim como os 1.048 testes da suíte completa do projeto.

Tabela 29 - Coordenadas teóricas e obtidas para dez composições de referência (canvas 560 × 560 px)

Ponto	**R**	**N**	**F**	**x teórico (px)**	**y teórico (px)**	**x obtido (px)**	**y obtido (px)**	**Erro (px)**
Vértice R	1	0	0	280,0000	143,4980	280,0000	143,4980	0,0000
Vértice N	0	1	0	68,4000	510,0000	68,4000	510,0000	0,0000

Vértice F	0	0	1	491,6000	510,0000	491,6000	510,0000	0,0000
Centroide	1/3	1/3	1/3	280,0000	387,8327	280,0000	387,8327	0,0000
Meio R–N	0,5	0,5	0	174,2000	326,7490	174,2000	326,7490	0,0000
Meio R–F	0,5	0	0,5	385,8000	326,7490	385,8000	326,7490	0,0000
Meio N–F	0	0,5	0,5	280,0000	510,0000	280,0000	510,0000	0,0000
Interior A	0,5	0,25	0,25	280,0000	326,7490	280,0000	326,7490	0,0000
Interior B	0,2	0,3	0,5	322,3200	436,6996	322,3200	436,6996	0,0000
Interior C	0,6	0,1	0,3	322,3200	290,0988	322,3200	290,0988	0,0000

Fonte: elaborada pelo autor com base no teste automatizado *DesenhaPontos.geometry.test.ts* (2026).

Como os dois caminhos de cálculo reproduzem deliberadamente a mesma cadeia aritmética, o teste demonstra consistência exata entre a formulação documentada e a implementação nas condições avaliadas, mas não constitui validação independente de navegador, dispositivo, transformação visual ou rasterização do Canvas.

Na primeira verificação, os resultados detalhados acima confirmam a coincidência entre as coordenadas teóricas e as coordenadas fornecidas à operação de desenho. Esse resultado confirma que a parametrização centrada no centróide, utilizada na implementação do *frontend*, é geometricamente equivalente à formulação baricêntrica apresentada no Capítulo 2. Na segunda verificação, cinco pontos de referência pertencentes às curvas ESI = 1 e ESI = 5 foram calculados analiticamente, renderizados na plataforma e comparados com as curvas geradas pelo algoritmo. Em todos os casos, as curvas passaram pelos pontos de referência dentro da tolerância definida, mostraram que sua geração decorre da avaliação direta da equação algébrica $ESI = \frac{EYR}{ELR}$, não de aproximação gráfica dissociada do modelo matemático.

Na terceira verificação, três conjuntos de dois ou mais *Points* com composições conhecidas foram utilizados para o cálculo do ponto de composição emergética agregada. As posições obtidas para o desenho coincidiram com as posições esperadas dentro da mesma tolerância, e o fato confirmou a implementação correta da média ponderada em coordenadas baricêntricas. Em conjunto, as três verificações confirmam que a implementação computacional preserva a geometria analítica do diagrama ternário. A coincidência entre coordenadas teóricas e coordenadas fornecidas à operação de desenho, a aderência das curvas ESI aos pontos de

referência e a convergência posicional do ponto de composição emergética agregada demonstram que a plataforma não apenas calcula corretamente os indicadores, como também os representa de forma geometricamente consistente com o referencial teórico adotado. Esse resultado demonstra consistência da implementação na resolução de 560 × 560 *pixels*, efetivamente testada, sem que se a interprete como limite de erro independente da escala de renderização.

4.6 Síntese dos resultados

Este capítulo documentou os resultados da pesquisa em seis dimensões complementares que, integradas, constituem a evidência empírica e arquitetural da contribuição do artefato desenvolvido. A primeira dimensão, desenvolvimento do software, demonstrou que a plataforma *TRIGES* foi implementada com módulos funcionais integrados, modelo relacional com rastreabilidade da cadeia de cálculo e proveniência operacional do valor de UEV empregado por fluxo, e interfaces de usuário aderentes ao *Design System* v1.2.

A segunda dimensão, verificação funcional, confirmou a implementação do núcleo funcional da plataforma, com níveis de evidência integral ou parcial conforme os critérios e as limitações registrados no Quadro 5.

A terceira dimensão, comparação numérica, mostrou que a plataforma reproduz com fidelidade resultados da literatura quando os dados de entrada são internamente consistentes e, ao mesmo tempo, explicita incoerências estruturais de bases de referência quando elas existem, o que permite confrontar resultados e identificar inconsistências documentais. A quarta dimensão, discussão integrada, mostrou que o comportamento funcional e numérico permaneceu consistente em domínios distintos e que sua contribuição não se restringe à automação do cálculo, mas alcança a governança metodológica dos estudos.

A quinta dimensão, verificação geométrica, confirmou a coerência entre equações, algoritmo de projeção e representação visual, com erro euclidiano de 0 px nos dez pontos de referência testados. A sexta dimensão, síntese dos resultados, consolidou as evidências de que o *TRIGES* implementa de forma consistente, nas condições avaliadas, o núcleo metodológico da contabilidade emergética *Traditional*. Esses resultados sustentam auditabilidade e reprodução determinística dos cálculos, sem demonstrar reprodutibilidade científica completa.

5 CONCLUSÕES

Este fechamento retoma o problema de pesquisa enunciado no Capítulo 1 e verifica, à luz dos resultados reunidos no Capítulo 4, se e como cada objetivo específico foi atendido. Ele mantém continuidade com a fundamentação teórica, com o delineamento metodológico em *Design Science Research*, com as evidências de verificação funcional, com a comparação numérica e com a verificação geométrica apresentadas nos capítulos anteriores.

5.1 Resposta ao problema de pesquisa

A tese partiu da necessidade de identificar quais princípios de modelagem de dados e de arquitetura de software permitem integrar, de maneira verificável, a síntese em emergia *Traditional R*, *N* e *F*, o uso rastreável de UEVs e a representação ternária em ambiente *web*, e em que medida sua implementação no *TRIGES* atende aos critérios funcionais, numéricos e geométricos definidos. Os resultados respondem à questão no recorte avaliado: o artefato implementou os princípios propostos e atendeu aos critérios estabelecidos, sem que isso implique unicidade da arquitetura ou validade universal.

O artefato implementado reuniu, em arquitetura única, os módulos de biblioteca de UEVs, gestão de estudos e subsistemas, cadastro de fluxos, cálculo automático de emergia e indicadores, gestão de saídas (*Outputs*) com derivação automática de UEV e diagrama ternário interativo, além de mecanismos estruturados de exportação e importação de dados. O editor de diagramas de linguagem energética (ESL) não integra a versão do artefato avaliada nesta tese; ele permanece como referência conceitual e possibilidade de desenvolvimento futuro. A resposta ao problema de pesquisa não decorre apenas da existência de uma implementação funcional, mas do atendimento aos critérios metodológicos de sucesso definidos no delineamento da investigação. A verificação funcional demonstrou a implementação e a avaliação dos quatorze requisitos do núcleo científico, com níveis de evidência distintos e inclui verificações integrais e parciais conforme documentado no Quadro 5.

A comparação numérica confrontou os resultados produzidos pelo *TRIGES* com valores publicados em sete estudos distribuídos em cinco grupos de aplicação. EC1 (três sistemas agrícolas do sudoeste da Austrália) apresentou divergências explicadas de até 0,63% nos indicadores e 0,31% nas UEVs de saída, após correção da regra de agregação de *R*. EC2 (quatro

cenários de tratamento de águas) apresentou convergência em doze dos dezesseis valores comparados; as quatro divergências restantes foram rastreadas a uma inconsistência interna do artigo-fonte (Tabela 5), não à implementação do *TRIGES*. EC3 (três sistemas de produção de bambu, em dois cenários cada) apresentou convergência estrita em vinte e duas das vinte e quatro comparações realizadas; ele inclui o cenário de redistribuição do trabalho entre *R* e *F*; as duas comparações restantes, no cenário China 4b, foram tratadas como inconsistência estrutural da fonte. EC4 (quatro sistemas de embalagem) apresentou desvios de *Y* entre 0,02% e 0,14%, sem verificação direta do painel de indicadores nativo. EC5 (nove sistemas provinciais) apresentou dezesseis convergências estritas e 29 divergências explicadas nas 45 comparações realizadas, sem divergência não conclusiva; o ponto agregado regional permaneceu como pendência declarada. EC6 (sistema agrícola multissaída) apresentou diferença de aproximadamente 0,017% no total emergético. EC7 (auditoria documental em três camadas) reproduziu EIR e ELR dentro da precisão publicada; EYR e ESI divergentes foram atribuídos a incompatibilidade interna do artigo-fonte. A verificação geométrica demonstrou coerência entre a formulação teórica do diagrama ternário e sua implementação computacional nos casos em que a renderização foi executada e comparada com figuras publicadas (EC1 e EC2). Ela – a verificação – inclui a identificação de diferenças de convenção de orientação dos vértices, matematicamente equivalentes a transformações de reflexão que preservam as propriedades composicionais do diagrama. A convergência do ponto de composição agregada regional não foi avaliada nesta etapa; ela permanece como trabalho futuro (Seção 4.3.7). Em conjunto com a verificação funcional e a comparação numérica, esses resultados demonstram a viabilidade técnica da solução no recorte estudado. A preservação do valor de UEV empregado, a separação entre dados de referência e lógica derivativa e a consistência geométrica favorecem governança e auditabilidade, mas não constituem prova de suficiência geral.

5.2 Atendimento aos objetivos da pesquisa

O objetivo geral consistiu em propor e avaliar princípios de modelagem de dados e de arquitetura de software, implementados no *TRIGES*, para integrar de maneira verificável o fluxo *Traditional R*, *N* e *F*, o uso de UEVs e a representação ternária. O objetivo foi atendido no recorte definido, e o atendimento aos sete objetivos específicos é sintetizado na tabela a seguir.

Tabela 30 - Síntese do atendimento aos objetivos específicos

Objetivo específico	**Síntese do atendimento**
1. Levantar e sistematizar os requisitos funcionais e não funcionais	Atendido pela definição de 14 requisitos funcionais (RF01 a RF10 e RF12 a RF15) e onze requisitos não funcionais (RNF01 a RNF11), com critérios de aceitação e delimitação explícita ao modo Traditional R, N e F.
2. Projetar a modelagem conceitual, a arquitetura e a estrutura de dados	Atendido pela construção do modelo relacional com seis entidades principais, pela formalização do vocabulário do domínio e pela integração entre inventário, biblioteca de UEVs, resultados derivados e representação ternária.
3. Implementar os módulos centrais da plataforma	Atendido com os módulos de autenticação, estudos, subsistemas, fluxos, biblioteca de UEVs, indicadores, diagrama ternário e exportação e importação estruturadas.
4. Implementar mecanismos de rastreabilidade do UEV empregado	Atendido pela preservação, em cada entidade Flow persistida, do identificador e do valor numérico do UEV efetivamente empregado. Unidade, referência e baseline permanecem vinculadas ao registro corrente da biblioteca, sem snapshot bibliográfico histórico integral.
5. Comparar numericamente os resultados com sete estudos publicados	Atendido nos sete estudos de caso executados. A comparação verificou os resultados derivados na granularidade permitida pelas fontes; nos EC2 e EC5, os agregados R, N e F publicados constituíram as entradas da comparação, de modo que a evidência recai principalmente sobre Y, indicadores e normalização, e não sobre a rederivação dos UEVs e inventários físicos originais. A identidade $Y = R + N + F$ permaneceu como invariante da comparação.
6. Verificar os requisitos e a coerência geométrica do diagrama ternário	Atendido pela verificação funcional dos 14 requisitos e por três conjuntos de testes geométricos. No teste das dez composições de referência, as coordenadas

	teóricas e as fornecidas à operação de desenho apresentaram erro euclidiano de 0 px; as curvas ESI e o ponto de composição emergética agregada atenderam à tolerância operacional de 1 pixel, em resolução de 560 × 560 pixels.
7. Analisar as contribuições e limitações do artefato	Atendido pela análise integrada de governança de UEVs, auditabilidade, comparabilidade, reprodução determinística dos cálculos e potencial de comunicação analítica. A tese não realizou testes com usuários nem demonstrou reprodutibilidade científica completa ou impacto decisório.

Fonte: Autor (2026).

5.3 Contribuições da tese

As contribuições da tese articulam três planos. No plano científico, o trabalho propõe e avalia princípios de arquitetura e governança de dados específicos ao domínio, distingue-os das equações, dos indicadores, do diagrama ternário e das aplicações *web* já documentados. No plano metodológico, o protocolo de avaliação separa verificação funcional, comparação numérica e verificação geométrica e classifica divergências como convergência, arredondamento, limitação de resolução da fonte ou inconsistência estrutural. No plano tecnológico, o *TRIGES* implementa a integração entre o valor de UEV empregado, o inventário persistente, os resultados derivados e a representação ternária. A identificação de inconsistências no EC2 ilustra a utilidade diagnóstica desse encadeamento, sem transformar o artefato em certificador automático da qualidade científica dos dados de entrada.

No plano metodológico, a tese sistematiza a correspondência entre a álgebra clássica *R*, *N* e *F*, a construção da tabela de emergia, o cálculo dos indicadores e a representação ternária em coordenadas baricêntricas. A formalização da equivalência entre a parametrização geométrica teórica (baseada em vértices do triângulo equilátero) e a parametrização centrada no centróide utilizada na implementação constitui contribuição relevante para a estabilidade analítica do diagrama ternário em ambiente computacional. A verificação geométrica demonstrou que, nos dez pontos de referência avaliados, ambas as parametrizações produziram coordenadas numericamente coincidentes, com erro euclidiano de 0 px na configuração de 560

× 560 *pixels* testada. A taxonomia das divergências permitiu distinguir convergência estrita nas comparações que atenderam ao limiar de 0,1%; divergências explicadas no EC1, cujo desvio máximo foi de 0,63%; duas comparações com convergência estrita e duas com desvios de 0,13% e 0,14% no EC4; e inconsistências internas das fontes identificadas no EC2, no cenário China 4b do EC3 e no EC7.

No plano tecnológico, a plataforma integra biblioteca de UEVs, estudos, subsistemas, fluxos *R*, *N* e *F*, cálculo de *Y* e dos indicadores, múltiplas saídas declaradas, diagrama ternário e exportação e importação em *JSON*. O valor numérico do UEV efetivamente empregado é preservado em cada *Flow*, enquanto referência, unidade e baseline permanecem vinculadas ao registro corrente da biblioteca. A implementação cria uma base tecnicamente viável para reduzir fragmentação e apoiar auditoria interna, mas não demonstra, sem avaliação com usuários, ganho de produtividade, redução empírica de erros ou melhoria de decisões.

5.4 Limitações da pesquisa

Apesar dos resultados alcançados, a pesquisa apresenta limitações que precisam ser explicitadas para orientar adequadamente a interpretação de seus achados e a continuidade da agenda de investigação. A primeira limitação decorre da própria delimitação de escopo adotada: a tese trata exclusivamente da abordagem clássica *R*, *N* e *F* no modo *Traditional*, sem incorporar o modo de renovabilidade parcial, discutido na literatura (Agostinho *et al*., 2025) e identificado como direção metodológica relevante, mas não implementado na plataforma avaliada nesta tese. Essa delimitação preservou comparabilidade direta com a literatura clássica e manteve foco metodológico consistente, mas restringe o alcance imediato dos resultados a contextos em que a classificação *R*, *N* e *F* clássica é suficiente.

A segunda limitação refere-se ao escopo de validação empírica. Embora os estudos de caso selecionados cubram domínios distintos: sistemas agrícolas e de silvicultura (EC1, EC3, EC6), saneamento ambiental (EC2), *ecodesign* e seleção de materiais (EC4), avaliação territorial (EC5) e auditoria documental (EC7), eles não esgotam a diversidade de aplicações possíveis da contabilidade em emergia. Setores como pecuária, cadeias produtivas industriais complexas, avaliações territoriais urbanas de grande escala e sistemas de manufatura

específicos permanecem como domínios de validação futura. A robustez demonstrada é relevante, mas depende de ampliação para outros contextos antes de generalização irrestrita.

A terceira limitação relaciona-se à governança do repositório de UEVs. A plataforma incorpora mecanismos de rastreabilidade bibliográfica, registro de baseline, preservação, em cada *Flow* já persistido, do valor do UEV efetivamente empregado; ela evita recálculo retroativo em decorrência de alterações posteriores na biblioteca. Contudo, a tese não abrangeu a implantação de fluxo comunitário de curadoria, revisão por pares, homologação institucional e atualização colaborativa do banco de UEVs em larga escala. Esses mecanismos de governança científica permanecem como necessidade reconhecida, mas não implementada no escopo do trabalho. Iniciativas institucionais como a *EmCFdb* (De Vilbiss *et al*., 2024) evidenciam que uma biblioteca científica pode incorporar mecanismos formais adicionais de governança que incluam documentação das alterações e processos institucionais de *Quality Assurance*. Esses mecanismos não estão implementados na biblioteca do *TRIGES* avaliada nesta tese.

A quarta limitação diz respeito ao modelo de colaboração implementado. O sistema é multiusuário em termos de autenticação individual e compartilhamento estruturado por exportação e importação de dados, mas não implementa edição concorrente em tempo real no estilo de ferramentas colaborativas síncronas. Essa delimitação não compromete o argumento central da tese; define, porém, um limite funcional para trabalhos colaborativos simultâneos. Por fim, a qualidade dos resultados produzidos pela plataforma permanece condicionada à qualidade dos dados de entrada, à coerência da classificação dos fluxos como *R*, *N* ou F, e à rastreabilidade dos UEVs utilizados. Nenhuma arquitetura computacional elimina, por si só, o papel crítico do julgamento analítico na construção do inventário em emergia. A integração computacional não elimina limitações epistemológicas associadas aos dados de entrada. Zhang *et al*. (2024) identificam incompletude de dados e parametrização entre os desafios persistentes das aplicações em emergia, de modo que a rastreabilidade oferecida pelo *TRIGES* permite identificar e reconstruir os coeficientes e dados empregados, mas não constitui certificação automática de sua representatividade científica para todo contexto de aplicação.

Essa distinção metodológica é particularmente relevante para a classificação de fontes renováveis. Brown e Ulgiati (2016b) mostram, em avaliações de sistemas de paisagem, que fluxos renováveis nominalmente distintos, como vento, chuva, escoamento superficial e ondas, podem constituir manifestações secundárias ou terciárias de um mesmo conjunto de forças

motrizes primárias, de modo que sua soma indiscriminada produz dupla contagem. O *TRIGES* agrega deterministicamente os fluxos *R*, *N* e *F* informados pelo analista, mas não identifica automaticamente essas dependências biofísicas entre entradas classificadas como renováveis; a correção computacional da agregação não substitui a validade metodológica do inventário que a alimenta. Essa responsabilidade permanece integralmente do pesquisador, apoiada pelo diagrama de energia sistêmica (Seção 2.2) como instrumento de modelagem prévio à tabela de emergia.

A quinta limitação diz respeito ao escopo da funcionalidade de múltiplas saídas (RF15). A plataforma permite registrar múltiplas saídas explicitamente declaradas pelo analista e derivar seus UEVs a partir da emergia total do sistema. Esse recurso não identifica automaticamente coprodutos ou divisões de fluxo, não aplica procedimentos de alocação entre saídas e não executa a propagação da emergia em redes de processos. A consistência da definição das saídas permanece dependente da modelagem realizada pelo analista. Essa limitação é distinta e independente da limitação relativa à renovabilidade parcial, discutida anteriormente: *Multiple Outputs* opera inteiramente dentro do escopo *Traditional R*, *N* e *F* avaliado nesta tese, sem introduzir classificação de renovabilidade fracionária. A relevância prática dessa delimitação é ilustrada por Ingwersen (2011): em um caso real de mineração de coprodutos, a troca da regra de coprodutos por uma alocação econômica reduziu o UEV de um dos produtos a cerca de 2,8% do valor obtido pela atribuição integral, e o de outro a cerca de 0,8%. O exemplo não implica que a mesma magnitude se aplicaria aos sistemas desta tese, mas evidencia que a regra de atribuição de *Y* entre múltiplas saídas é uma decisão metodológica com efeito potencialmente grande sobre o resultado, e não um detalhe secundário. A propagação emergética em redes com *feedbacks*, divisões e coprodutos demanda algoritmos específicos, como os de Marvuglia *et al*. (2013), Le Corre e Truffet (2012; 2015) e Nimmanterdwong *et al*. (2018), e permanece fora do escopo do *TRIGES* avaliado nesta tese. A plataforma fixa, ademais, uma única formulação operacional dos indicadores EYR, ELR e ESI; variantes de ciclo de vida e decomposição renovável dos investimentos, como as discutidas por Arbault *et al*. (2014b), não integram o artefato avaliado.

A sexta limitação é a ausência de propagação probabilística de incerteza, já delimitada na Seção 2.6: o *TRIGES* opera exclusivamente com valores pontuais de UEV e de fluxo. Essa ausência não constitui apenas uma limitação computacional genérica. Em aplicação real, Ingwersen (2011) mostrou que a incorporação conjunta das incertezas do inventário e dos UEVs

produziu, para o *doré* analisado, uma faixa de confiança de aproximadamente um fator dois em torno do resultado central. O exemplo não implica que a mesma magnitude se aplique aos estudos desta tese, mas demonstra que precisão aritmética e incerteza metodológica são dimensões distintas.

A sétima limitação refere-se a sistemas hierarquicamente aninhados. A versão avaliada trata cada sistema como unidade analítica independente, identificada por nome no *Chart* e no *Point*, e não implementa formalmente relações entre sistemas e subsistemas em diferentes níveis organizacionais. Assim, a plataforma não reclassifica automaticamente fluxos quando a fronteira de um estudo é ampliada ou reduzida, nem resolve possíveis sobreposições de emergia entre níveis hierárquicos. Essas operações requerem modelagem específica, como demonstram as abordagens baseadas em teoria dos conjuntos de Morandi *et al*. (2015), e permanecem fora do escopo do artefato avaliado nesta tese.

5.5 Próximos passos

Os desdobramentos futuros da pesquisa podem ser organizados em cinco direções principais que ampliam e consolidam as contribuições do artefato desenvolvido. A primeira consiste em implementar e avaliar, na plataforma, o modo de renovabilidade parcial, permitir comparação sistemática entre o paradigma *Traditional* (fluxos integralmente classificados como *R*, *N* ou *F*) e abordagens que desagregam os fluxos em categorias híbridas. Esse avanço poderá esclarecer ganhos analíticos, custos adicionais de modelagem e impactos sobre a comparabilidade dos resultados, ampliar a base empírica para decisões metodológicas informadas. Formulações anteriores, como Ortega *et al*. (2005), já desagregam materiais e serviços em parcelas renováveis e não renováveis e modificam consequentemente determinadas equações de desempenho (Seção 2.3). A incorporação futura dessa possibilidade ao *TRIGES* não deve, portanto, ser tratada como simples opção de interface, e ela exigirá: (1) especificação da fração renovável de cada material e serviço; (2) armazenamento desses parâmetros no modelo de dados do *Flow*; (3) revisão das regras de agregação de F; (4) implementação das equações específicas de %R, EYR, EIR e ELR na formulação expandida; (5) novos testes unitários e de integração; (6) novos estudos de validação, independentes dos sete estudos de caso empregados nesta tese para o modo *Traditional*; (7) comparação sistemática entre os

resultados *Traditional* e com renovabilidade parcial para o mesmo inventário; (8) análise de compatibilidade com estudos históricos publicados no modo *Traditional*.

A segunda direção envolve a consolidação do banco de UEVs como infraestrutura científica compartilhada para a comunidade de pesquisa em emergia. Isso inclui mecanismos formais de versionamento público, trilhas de auditoria mais amplas, políticas de curadoria baseadas em revisão por pares, critérios de homologação de novas entradas, documentação padronizada de conversões de baseline e eventual integração com identificadores persistentes (*DOI*, *ORCID*) para referências bibliográficas e versões de coeficientes. Essa evolução transformaria o repositório em infraestrutura de governança científica efetiva. Nessa mesma direção, o versionamento formal dos registros de UEV, o histórico de alterações e metadados estruturados de proveniência constituem direção futura, e a eventual interoperabilidade com bibliotecas institucionais externas de fatores emergéticos, como a *EmCFdb* (De Vilbiss *et al*., 2024), poderá ser investigada.

A terceira direção consiste em completar, nos estudos já cadastrados, os pontos declarados como pendência: o ponto de composição agregada regional do EC5 e os coprodutos e *splits* do EC6. Os dados de Li *et al*. (2014) para as nove províncias do *Pan-Pearl River Delta* chinês já foram cadastrados e executados no *TRIGES* nesta tese, como EC5 (Seção 4.3.7). Permanece como trabalho futuro apenas o ponto de composição agregada regional (*Simergy Point*), a décima composição do artigo original, que não foi calculada nem renderizada nesta etapa por decisão de escopo. Da mesma forma, o sistema familiar de *milpa* de Avalos-Rangel *et al*. (2021) já foi cadastrado, executado como EC6 (Seção 4.3.8); permanece como trabalho futuro o cadastro completo dos sete coprodutos e frações divididas (*splits*) com UEVs de saída próprias documentados na Tabela 2 do artigo, candidato prioritário para validar o módulo de múltiplas saídas (RF15) contra esse *benchmark* específico, funcionalidade cuja operação nativa foi evidenciada separadamente na Seção 4.3.11, com base no EC4, mas não testada contra coprodutos e *splits* declarados por um pesquisador externo.

A quarta direção envolve o desenvolvimento de módulos analíticos adicionais que ampliem a utilidade da plataforma sem romper o núcleo metodológico estabelecido nesta tese. Isso inclui tratamento formal de incerteza propagada, análise de sensibilidade orientada por parâmetros específicos, relatórios comparativos automáticos entre múltiplos sistemas, integração com serviços externos de dados ambientais (*APIs* de clima, solo, biodiversidade) e

desenvolvimento de *dashboards* de visualização avançada. Esses desdobramentos podem fortalecer a capacidade analítica do sistema e manter fidelidade aos fundamentos teóricos da contabilidade emergética clássica.

Como extensão analítica adicional, poderá ser investigada a persistência de séries temporais de estados *R*, *N* e *F*, o que permitirá acompanhar a evolução histórica de um mesmo sistema e comparar cenários sucessivos. A associação entre variáveis emergéticas e modelos dinâmicos possui precedentes na literatura (Lei; Wang, 2008); dentro da própria linhagem do diagrama ternário, Barrella (2011) já utilizava esse espaço como representação de percurso emergético, com a exibição de estados sucessivos de um sistema simulado ao longo do tempo. Fora dessa linhagem, Wu, Fan e Lu (2021) acoplaram indicadores emergéticos, EYR, ELR e ESI, a um modelo de *System Dynamics* aplicado ao setor de transportes da província de Qinghai, utilizaram cenários prospectivos para avaliar os efeitos de mudanças na estrutura modal do transporte, na utilização de recursos não renováveis e no ritmo de desenvolvimento econômico, com validação histórica dos resultados simulados. O exemplo demonstra que indicadores emergéticos clássicos podem atuar como variáveis de saída de modelos dinâmicos dotados de relações causais e realimentação temporal, complementar o precedente interno de Barrella (2011) com evidência de que a mesma direção metodológica também foi adotada em outro domínio de aplicação. Em um nível de complexidade mais avançado, Tilley e Brown (2006) demonstraram, por meio de *Dynamic Emergy Accounting*, o que emergia, e transformidades podem ser acompanhadas endogenamente à medida que estoques, fontes e saídas de um sistema variam no tempo. Essa alternativa distingue-se da persistência de *snapshots* sucessivos de estudos independentes considerados acima, pois exigiria um modelo de estados, equações de evolução temporal e mecanismos de propagação endógena que não constituem extensão simples do *TRIGES* avaliado nesta tese. No *TRIGES*, entretanto, a implementação e a validação de mecanismos preditivos, as relações causais, os *feedbacks* temporais ou a simulação dinâmica permanecem fora do escopo da versão avaliada nesta tese.

Uma extensão posterior poderá também permitir a construção explícita de cenários multivariados, nos quais diferentes fluxos físicos e econômicos sejam alterados simultaneamente segundo hipóteses de política ou tecnologia, e comparados no espaço R, N e *F*. Aplicações dessa estratégia já foram documentadas em análises emergéticas de sistemas agroenergéticos (CHEN; CHEN, 2012), mas esse tipo de simulação permanece distinto do

módulo determinístico de variação de UEV avaliado nesta tese e não foi implementado na plataforma.

A quinta direção envolve extensões estruturais e contextuais da plataforma, inclui relações hierárquicas entre sistemas, metadados espaciais e temporais para as UEVs, integração geoespacial e UEVs paramétricos. Uma extensão de maior complexidade poderia representar explicitamente relações entre sistemas e subsistemas, permitir registrar a origem e o destino dos fluxos entre níveis hierárquicos e avaliar alterações de classificação associadas à ampliação ou à redução da fronteira, na linha do formalismo baseado em teoria dos conjuntos propostos por Morandi *et al*. (2015) para sistemas territoriais aninhados. Tal evolução poderia apoiar análises multiescalares, mas exigiria tratamento rigoroso de dupla contagem entre níveis, regras próprias de agregação hierárquica e um novo protocolo de validação; não constitui, portanto, extensão simples do modelo de dados atual, no qual *Chart* e *Point* representam estudos e subsistemas como entidades independentes, sem relação hierárquica formal entre si.

Outra extensão poderá incorporar metadados espaciais e temporais mais ricos à biblioteca de UEVs, como localização, período de referência e condições ambientais, e eventual integração com fontes geoespaciais, o que permite contextualizar a seleção de UEVs para recursos cuja intensidade emergética dependa significativamente de condições locais, conforme demonstrado em aplicações GIS da contabilidade em emergia (DÍAZ-DELGADO et al., 2014). Essa extensão permanece distinta do escopo atual da plataforma, que preserva o valor numérico do UEV, sua unidade e sua referência bibliográfica, mas não estrutura contexto geográfico ou temporal como campos próprios do modelo de dados. A justificativa empírica para essa evolução é reforçada por Lyu *et al*. (2021), cujo recálculo de UEVs tecnosféricos evidencia que período de referência, tecnologia de processo e contexto geográfico afetam materialmente o coeficiente resultante, mesmo quando a baseline é mantida constante.

Um antecedente operacional dessa direção é apresentado por Fonseca *et al*. (2017), que implementaram, em Delphi, sobre o ambiente GIS Idrisi três módulos hidrogeomáticos destinados à contabilização da emergia da extração de águas subterrâneas, ao tratamento de águas residuais e à avaliação de cenários de abastecimento na bacia do Alto Rio Lerma, México. No módulo de extração subterrânea, os autores modelam a emergia como função não linear do volume bombeado, da profundidade do lençol freático e das perdas hidráulicas do sistema de bombeamento, evidenciam que, em determinados processos, um UEV não pode ser tratado como constante independente das condições operacionais em que é aplicado. Essa

demonstração é distinta da variabilidade geográfica discutida por Díaz-Delgado *et al*. (2014): trata-se de dependência processual e operacional do coeficiente, e não apenas de sua localização. No *TRIGES*, a biblioteca de UEVs armazena valores pontuais e não funções paramétricas; a representação de UEVs derivados por modelos ou funções operacionais permaneceria, portanto, como extensão arquitetural futura; exigiria novos metadados, regras de execução e validação próprias e não uma alteração incremental trivial.

A incorporação de incerteza mencionada acima pode ser especificada em quatro componentes que preservam a arquitetura atual: um UEV futuro registraria, além do valor central, distribuição ou intervalo, método de estimação, referência e baseline e escopo metodológico (por exemplo, com ou sem trabalho e serviços, na linha de Ingwersen, 2011). Um *Flow* futuro registraria a quantidade e a incerteza associadas a essa quantidade; um motor de cálculo futuro propagaria essas distribuições para *R*, *N*, *F*, *Y*, *UEV* de saída e indicadores, por exemplo por simulação de Monte Carlo (Ingwersen, 2011; Hudson; Tilley, 2014). Uma saída futura reportaria média ou mediana, intervalo de confiança e identificação das variáveis dominantes na incerteza total. Esses componentes não são descritos como funcionalidade atual da plataforma. A incorporação de procedimentos sistemáticos de sensibilidade e de incerteza também foi apontada como direção futura em desenvolvimentos computacionais anteriores de emergia, como os de Nimmanterdwong, Chalermsinsuwan e Piumsomboon (2018), que propõem essas funções como agenda futura de seu algoritmo sem as ter implementado.

5.6 Considerações finais

A pesquisa demonstrou que a construção de uma plataforma web para contabilidade emergética *Traditional* é tecnicamente viável no recorte estudado. O artefato integrou biblioteca de UEVs, inventário de fluxos *R*, *N* e *F*, cálculo dos indicadores, diagrama ternário e intercâmbio estruturado de dados. A verificação funcional, a comparação numérica com sete estudos e a verificação geométrica fornecem evidências de implementação correta do núcleo metodológico nas condições avaliadas, respeitadas a precisão e a granularidade das fontes.

A plataforma não substitui o julgamento do analista nem elimina a necessidade de modelagem rigorosa. Sua contribuição é criar condições estruturais para organizar dados, executar cálculos determinísticos e representar os resultados de modo coerente. As inconsistências identificadas no EC2 mostram a capacidade diagnóstica do protocolo, enquanto

a preservação do identificador e do valor numérico do UEV empregado favorece auditoria. A tese não demonstra preservação histórica integral da proveniência, da reprodutibilidade científica completa, da usabilidade ou do impacto decisório.

Conclui-se que a contribuição do trabalho ultrapassa a entrega de software funcional: nos termos da *Design Science Research*, a tese propõe e avalia princípios de arquitetura e governança de dados por meio de um artefato verificável. O resultado é uma base metodológica e tecnológica delimitada para a contabilidade em emergia *Traditional* em ambiente *web*, acompanhada de um protocolo auditável de avaliação. A agenda futura inclui versionamento integral da proveniência, curadoria comunitária, propagação de incerteza, ampliação dos estudos de caso e avaliações independentes com usuários e pesquisadores externos.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.; MUNIZ, A. G. L.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANNETTI, B. F. A 20-year update of the emergy ternary diagram: technical and methodological advancements. Journal of Cleaner Production, v. 520, art. 146123, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146123.

AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods. Ecological Indicators, v. 24, p. 494–503, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.08.006.

ALMEIDA, C. M. V. B.; BARRELLA, F. A.; GIANNETTI, B. F. Emergetic ternary diagrams: five examples for application in environmental accounting for decision-making. Journal of Cleaner Production, v. 15, n. 1, p. 63–74, 2007. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.07.002.

ALMEIDA, C. M. V. B.; FRIMAIO, G. S.; BONILLA, S. H.; DA SILVA, C. C.; GIANNETTI, B. F. An evaluation of a MSW-to-energy system using Emergy synthesis. International Journal of Environment and Sustainable Development, v. 11, n. 3, p. 258–273, 2012. DOI: 10.1504/IJESD.2012.050462.

ALMEIDA, C. M. V. B.; RODRIGUES, A. J. M.; BONILLA, S. H.; GIANNETTI, B. F. Emergy as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 1, p. 32–43, 2010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.03.019.

ARBAULT, D.; RUGANI, B.; MARVUGLIA, A.; BENETTO, E.; TIRUTA-BARNA, L. Emergy evaluation using the calculation software SCALE: case study, added value and potential improvements. *Science of the Total Environment*, v. 472, p. 608–619, 2014a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.087.

ARBAULT, D.; RUGANI, B.; TIRUTA-BARNA, L.; BENETTO, E. A semantic study of the Emergy Sustainability Index in the hybrid lifecycle-emergy framework. *Ecological Indicators*, v. 43, p. 252–261, 2014b. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.02.029.

ARBAULT, D.; RUGANI, B.; TIRUTA-BARNA, L.; BENETTO, E. A first global and spatially explicit emergy database of rivers and streams based on high-resolution GIS-maps. *Ecological Modelling*, v. 281, p. 52–64, 2014c. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.03.004.

AVALOS-RANGEL, M. A.; CAMPBELL, D. E.; REYES-LÓPEZ, D.; RUEDA-LUNA, R.; MUNGUÍA-PÉREZ, R.; HUERTA-LARA, M. The environmental-economic performance of a Poblano family milpa system: an emergy evaluation. *Sustainability*, v. 13, n. 16, art. 9425, 2021. DOI: 10.3390/su13169425.

BARAL, A.; BAKSHI, B. R. Emergy analysis using US economic input–output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol. *Ecological Modelling*, v. 221, n. 15, p. 1807–1818, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.04.010.

BARRELLA, F. A. *Ferramenta Gráfica para Análise Emergética: Avaliação Ambiental e Tomada de Decisão.* 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Paulista, São Paulo, 2004.

BARRELLA, F. A. *Ferramenta para análise de desempenho ambiental na geração de energia elétrica.* 2011. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências, área Tecnologia Nuclear: Aplicações): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BONILLA, S. H.; GUARNETTI, R. L.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANNETTI, B. F. Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labour, time and space. Journal of Cleaner Production, v. 18, p. 83–91, 2010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.07.012.

BRAVO TOLEDO, L.; MONTAÑO PISFIL, J. A.; RODRÍGUEZ ABURTO, C. A.; DEL ÁGUILA VELA, E.; POMA GARCÍA, J. A.; POMA GARCÍA, C. R.; POMA GARCÍA, J. L.; MONTAÑO MIRANDA, B. A comparison of the co-treatment of urban wastewater and acidic water using a ternary emergy diagram. Sustainability, v. 16, n. 7, art. 2609, 2024. DOI: 10.3390/su16072609.

BROWN, M. T.; HERENDEEN, R. A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, v. 19, p. 219–235, 1996.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 10, n. 4, p. 321-334, 2002. DOI: 10.1016/S0959-6526(01)00043-9.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, v. 9, n. 1-2, p. 51-69, 1997. DOI: 10.1016/S0925-8574(97)00033-5.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Assessing the global environmental sources driving the geobiosphere: a revised emergy baseline. Ecological Modelling, v. 339, p. 126–132, 2016a. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.03.017.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy assessment of global renewable sources. Ecological Modelling, v. 339, p. 148–156, 2016b. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.03.010.

BROWN, M. T.; CAMPBELL, D. E.; DE VILBISS, C.; ULGIATI, S. The geobiosphere emergy baseline: a synthesis. Ecological Modelling, v. 339, p. 92–95, 2016. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.03.018.

CAMPBELL, D. E. A revised solar transformity for tidal energy received by the earth and dissipated globally: implications for emergy analysis. In: BROWN, M. T.; BRANDT-WILLIAMS, S.; TILLEY, D.; ULGIATI, S. (ed.). *Emergy Synthesis: Proceedings of the First Biennial Emergy Analysis Research Conference.* Gainesville: Center for Environmental Policy, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000. p. 255–264.

CHEN, S.; CHEN, B. Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: an emergy synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 3948-3959, 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.040.

CAMPBELL, D. E.; GARMESTANI, A. S. An energy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado. *Journal of Environmental Management*, v. 95, n. 1, p. 72-97, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.07.028.

DE VILBISS, C.; ARDEN, S.; BROWN, M. T.; CAMPBELL, D. E.; MA, X.; INGWERSEN, W. The Unit Emergy Value (UEV) Library for Characterizing Environmental Support

in Life Cycle Assessment. EPA/600/R-23/202. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2024. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-05/epa-600-r-23-202_508-compliant.pdf. Acesso em: 6 ago. 2026.

DÍAZ-DELGADO, C.; FONSECA, C. R.; ESTELLER, M. V.; GUERRA-COBIÁN, V. H.; FALL, C. The establishment of integrated water resources management based on emergy accounting. *Ecological Engineering*, v. 63, p. 72-87, 2014. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.034.

FONSECA, C. R.; DÍAZ-DELGADO, C.; ESTELLER, M. V.; GARCÍA-PULIDO, D. Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: case study of the Lerma river, Mexico. Ecological Engineering, v. 99, p. 436–453, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.034.

GIANNETTI, B. F. et al. Emergy evaluation of a coffee farm in Cerrado area of Brazil. *Agricultural Systems*, v. 104, n. 9, p. 679–688, 2011.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; AGOSTINHO, F.; BONILLA, S. H.; ULGIATI, S. Primary evidences on the robustness of environmental accounting from emergy. *Journal of Environmental Accounting and Management*, v. 1, n. 2, p. 203–212, 2013. DOI: 10.5890/JEAM.2013.05.007.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; BONILLA, S. H. Comparing emergy accounting with well-known sustainability metrics: the case of Southern Cone Common Market, Mercosur. *Energy Policy*, v. 38, n. 7, p. 3518–3526, 2010.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; BONILLA, S. H. Can emergy sustainability index be improved? Complementary insights for extending the vision. *Ecological Modelling*, v. 244, p. 158–161, 2012. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.027.

GIANNETTI, B. F.; BARRELLA, F. A.; ALMEIDA, C. M. V. B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 201-210, 2006. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.09.002.

GIANNETTI, B. F.; BARRELLA, F. A.; BONILLA, S. H.; ALMEIDA, C. M. V. B. Aplicações do diagrama emergético triangular na tomada de decisão ecoeficiente. *Revista Produção*, v. 17, n. 2, p. 246–262, 2007. DOI: 10.1590/S0103-65132007000200003.

GIANNETTI, B. F.; MARCILIO, M. D. F. D. F. B.; COSCIEME, L.; AGOSTINHO, F.; LIU, G.; ALMEIDA, C. M. V. B. Howard Odum's "Self-organization, transformity and information": three decades of empirical evidence. Ecological Modelling, v. 407, art. 108717, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.06.005.

HARIZAJ, P. Can the Emergy Sustainability Index be improved? *Ecological Modelling*, v. 222, n. 12, p. 2031-2033, 2011. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.03.022.

HUDSON, A.; TILLEY, D. R. Assessment of uncertainty in emergy evaluations using Monte Carlo simulations. Ecological Modelling, v. 271, p. 52–61, 2014. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.05.018.

INGWERSEN, W. W. Uncertainty characterization for emergy values. Ecological Modelling, v. 221, n. 3, p. 445–452, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.10.032.

INGWERSEN, W. W. Emergy as a life cycle impact assessment indicator: a gold mining case study. Journal of Industrial Ecology, v. 15, n. 4, p. 550–567, 2011. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00333.x.

KAMIYA, D. de S. Análise emergética on-line para diagnóstico de sistemas agrícolas. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos): Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

KARUPPIAH, K.; SANKARANARAYANAN, B.; ALI, S. M. Evaluation of suppliers in the tannery industry based on emergy accounting analysis: implications for resource conservation in emerging economies. International Journal of Sustainable Engineering, v. 15, n. 1, p. 1–14, 2022. DOI: 10.1080/19397038.2021.1982066.

LE CORRE, O.; TRUFFET, L. Exact computation of emergy based on a mathematical reinterpretation of the rules of emergy algebra. *Ecological Modelling*, v. 230, p. 101–113, 2012. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.12.018.

LE CORRE, O.; TRUFFET, L. Emergy paths computation from interconnected energy system diagram. *Ecological Modelling*, v. 313, p. 181–200, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.030.

LEFROY, E. C.; RYDBERG, T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. Ecological Modelling, v. 161, p. 195–211, 2003. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00341-1.

LEI, K.; WANG, Z. Emergy synthesis and simulation for Macao. *Energy*, v. 33, p. 613-625, 2008. DOI: 10.1016/j.energy.2007.11.008.

LI, G.; KUANG, Y.; HUANG, N.; CHANG, X. Emergy synthesis and regional sustainability assessment: case study of Pan-Pearl River Delta in China. *Sustainability*, v. 6, n. 8, p. 5203–5230, 2014. DOI: 10.3390/su6085203.

LOU, B.; QIU, Y.; ULGIATI, S. Emergy-based indicators of regional environmental sustainability: a case study in Shanwei, Guangdong, China. Ecological Indicators, v. 57, p. 514–524, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.017.

LYU, Y.; RAUGEI, M.; ZHANG, X.; MELLINO, S.; ULGIATI, S. Environmental cost and impacts of chemicals used in agriculture: An integration of emergy and Life Cycle Assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 151, art. 111604, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111604.

MA, T.; CHEN, M.; WANG, C.; MAO, Z.; JIANG, M. Study on the environment-resource-economy comprehensive efficiency evaluation of the biohydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, p. 13062-13068, 2013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.03.079.

MARTIN, R. C. *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. Boston: Prentice Hall, 2017. 432 p. ISBN: 978-0-13-449416-6.

MARVUGLIA, A.; BENETTO, E.; RIOS, G.; RUGANI, B. SCALE: Software for CALculating Emergy based on life cycle inventories. *Ecological Modelling*, v. 248, p. 80–91, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.09.013.

MORANDI, F.; CAMPBELL, D. E.; PULSELLI, F. M.; BASTIANONI, S. Emergy evaluation of hierarchically nested systems: application to EU27, Italy and Tuscany and

consequences for the meaning of emergy indicators. Ecological Modelling, v. 315, p. 12–27, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.04.001.

NACIMENTO, R. A. et al. Sustainability assessment of commercial Brazilian organic and conventional broiler production systems under an Emergy analysis perspective. Journal of Cleaner Production, v. 359, art. 132050, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132050.

NIMMANTERDWONG, P.; CHALERMSINSUWAN, B.; PIUMSOMBOON, P. Development of an emergy computation algorithm for complex systems using depth first search and track summing methods. *Journal of Cleaner Production*, v. 193, p. 625–641, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.088.

ODUM, H. T. *Environmental accounting: emergy and environmental decision making.* New York: John Wiley and Sons, 1996.

ORACLE CORPORATION. *MySQL 8.0 Reference Manual.* 2026. Disponível em: https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/. Acesso em: mar. 2026.

ORTEGA, E.; CAVALETT, O.; BONIFÁCIO, R.; WATANABE, M. Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis With an Expanded Scope. *Bulletin of Science, Technology & Society*, v. 25, n. 4, p. 323-334, 2005. DOI: 10.1177/0270467605278367.

PAN, Y.; ZHANG, B.; WU, Y.; TIAN, Y. Sustainability assessment of urban ecological-economic systems based on emergy analysis: a case study in Simao, China. *Ecological Indicators*, v. 121, art. 107157, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107157.

SANDVE, G. K.; NEKRUTENKO, A.; TAYLOR, J.; HOVIG, E. Ten simple rules for reproducible computational research. *PLOS Computational Biology*, v. 9, n. 10, p. e1003285, 2013.

SONG, F.; WU, H.; SUN, Z.; BAI, J.; SU, F.; XU, D.; CAO, C.; LI, H.; SONG, S.; LIU, Y. Change in the sustainability of regional agricultural systems: based on an emergy decomposition analysis. *Environmental Research Letters*, v. 19, art. 104075, 2024. DOI: 10.1088/1748-9326/ad786b.

SUN, J.; YUAN, X.; LIU, H.; LIU, G.; ZHANG, G. Emergy evaluation of a swamp dike-pond complex: a new ecological restoration mode of coal-mining subsidence areas in China. *Ecological Indicators*, v. 107, art. 105660, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105660.

TAKAHASHI, F. Desenvolvimento de ferramentas computacionais para avaliação emergética de sistemas agrícolas. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos): Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

TILLEY, D. R.; BROWN, M. T. Dynamic emergy accounting for assessing the environmental benefits of subtropical wetland stormwater management systems. Ecological Modelling, v. 192, p. 327–361, 2006. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.034.

ULGIATI, S. *et al*. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological Engineering*, v. 5, n. 4, p. 519–531, 1995.

W3C. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. W3C Recommendation, 5 jun. 2018. Disponível em: https://www.w3.org/TR/2018/REC-WCAG21-20180605/. Acesso em: ago. 2026.

WIERINGA, R. J. *Design science methodology for information systems and software engineering.* Berlin: Springer, 2014. 332 p. DOI: 10.1007/978-3-662-43839-8.

WILKINSON, M. D. *et al*. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, v. 3, p. 160018, 2016.

WILSON, G.; ARULIAH, D. A.; BROWN, C. T. *et al*. Best practices for scientific computing. *PLOS Biology*, v. 12, n. 1, p. e1001745, 2014.

WU, H.; FAN, W.; LU, J. Researching on the Sustainability of Transportation Industry Based on a Coupled Emergy and System Dynamics Model: A Case Study of Qinghai. *Sustainability*, v. 13, n. 12, art. 6804, 2021. DOI: 10.3390/su13126804.

ZHANG, C.; SU, B.; BECKMANN, M.; VOLK, M. Emergy-based evaluation of ecosystem services: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 192, art. 114201, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114201.

ZHANG, J.; MA, L. Environmental Sustainability Assessment of a New Sewage Treatment Plant in China Based on Infrastructure Construction and Operation Phases Emergy Analysis. *Water*, v. 12, n. 2, art. 484, 2020. DOI: 10.3390/w12020484.

ZHANG, X.-H. *et al*. An emergy evaluation of the sustainability of Chinese crop production system during 2000–2010. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 622–633, 2016. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.08.004.

ZHAO, Y.; XU, Y.; YU, M. An approach for measuring and analyzing embodied carbon in the construction industry chain based on emergy accounting. *Ecological Indicators*, v. 158, p. 111481, 2024.