A Armadilha da Exergia e o Mito da Transição Verde: os Custos Biofisicos da Descarbonização

Anderson Henrique dos Santos Araújo
Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Campus Arapiraca anderson.henrique@arapiraca.ufal.br
Daniel Caixeta Andrade
Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Instituto de Economia e Relações Internacionais
daniel.andrade@ufu.br

Resumo

Este artigo examina a relevância contemporânea do pensamento estruturalista de Celso Furtado diante dos desafios da ecologia política, revisitando especificamente a tese de *O Mito do Desenvolvimento Econômico*. Argumenta-se que a crescente demanda por minerais estratégicos — concentrada no Triângulo do Lítio (Argentina, Bolívia e Chile) — não constitui uma ruptura com o modelo de desenvolvimento periférico, mas sim a reiteração da dependência estrutural via pilhagem entrópica. Metodologicamente, o estudo realiza uma contabilidade biofísica da "corrida verde", integrando o arcabouço furtadiano à "Lei do Minério" termodinâmica e à análise da dissipação de exergia. Os resultados empíricos revelam que a elevada intensidade material das tecnologias de baixa emissão (com a demanda de lítio projetada para crescer 1.300% até 2050) impõe limites físicos intransponíveis à universalização do modo de vida imperial. Conclui-se que a sustentabilidade interna das economias centrais é subsidiada pela transferência de entropia para o Sul Global. Assim, a crítica de Furtado à mimese cultural permanece essencial para desmascarar o "ilusionismo técnico" e fundamentar estratégias regionais de autonomia pautadas na resiliência metabólica.

Palavras-chave: Celso Furtado; pegada material; Exergia; Intercâmbio Ecológico Desigual; neoextrativismo.

Abstract

This paper examines the contemporary relevance of Celso Furtado's structuralist thought in light of the challenges of political ecology, specifically revisiting the thesis of The Myth of Economic Development. It argues that the surging demand for strategic minerals — centered in the Lithium Triangle (Argentina, Bolivia, and Chile) — does not constitute a departure from the peripheral development model, but rather a reiteration of structural dependence through entropic plundering. Methodologically, the study provides a biophysical accounting of the "green race," integrating Furtado's framework with the thermodynamic "Law of the Ore" and exergy dissipation analysis. Empirical results reveal that the high material intensity of low-carbon technologies (with lithium demand projected to grow by 1,300% by 2050) imposes insurmountable physical limits on the universalization of the imperial way of life. It is concluded that the sustainability of central economies is subsidized by the transfer of entropy to the Global South. Thus, Furtado's critique of cultural mimesis remains essential for unmasking "technical illusionism" and grounding regional strategies of autonomy guided by metabolic resilience.

Keywords: Celso Furtado; Lithium Triangle; Material Footprint; Exergy; Unequal Ecological Exchange; Neo-extractivism.

Introdução

A crise socioambiental contemporânea, longe de se restringir a uma fenomenologia puramente ecológica, constitui a expressão material das contradições inerentes ao paradigma de acumulação global. No horizonte latino-americano, tal cenário é tensionado pela persistência de estruturas de dependência que agudizam o conflito entre o imperativo do crescimento e os limites biofísicos da biosfera.

A materialidade dessa tensão é corroborada por projeções que indicam um incremento de 294% na tonelagem total de minerais requeridos para a transição energética até 2050, com o lítio apresentando uma expansão projetada da ordem de 1300%. Tal pressão material concentra-se de forma aguda no chamado 'Triângulo do Lítio' — região andina que abrange os desertos de sal (salares) da Argentina, Bolívia e Chile e detém mais de 50% das reservas mundiais do mineral. Este território torna-se, portanto, o epicentro das disputas entre a descarbonização do Norte Global e a integridade ecológica do Sul. (Collins et al., 2024).

Sob este prisma, o presente ensaio resgata a densidade crítica de Celso Furtado, especificamente em sua obra O Mito do Desenvolvimento Econômico (1974), para investigar as metamorfoses do subdesenvolvimento na alvorada do século XXI. Não obstante a relevância de contributos recentes sobre a maturação da consciência ambiental na trajetória de Furtado, como Saes (2025) e Schincariol (2023b), identifica-se a necessidade de operacionalizar esse arcabouço frente à rematerialização da economia global.

Observa-se que a inserção externa das economias periféricas transcende a clássica deterioração dos termos de troca monetários, revelando um fluxo líquido de energia e materiais de baixa entropia que subsidia o metabolismo social do Centro, enquanto os passivos socioambientais são internalizados nos territórios extrativos.

A análise aqui empreendida fundamenta-se na teoria do Intercâmbio Ecológico Desigual (IED) e incorpora os marcos da termodinâmica para compreender como a infraestrutura técnica do Centro mascara a apropriação de exergia da Periferia. O problema de pesquisa indaga: em que medida a crítica furtadiana ao "mito" do desenvolvimento, aliada aos conceitos de Lei do Minério e Armadilha da Exergia, fornece o instrumental necessário para desvelar o neoextrativismo contemporâneo. Para tanto, o presente estudo privilegia a análise dos custos biofísicos e das intensidades materiais da transição, utilizando dados empíricos para testar a validade da hipótese estruturalista.

Visando responder tais questionamentos, o presente trabalho está estruturado em três seções, além desta introdução. A segunda seção estabelece a fundamentação teórica ao traduzir o modelo centro-periferia para uma gramática exergética, discutindo o dreno de sintropia e a fratura metabólica sob a lógica do capital. A terceira seção constitui o núcleo analítico do ensaio, onde se examina o

papel do Estado, a intensidade material das tecnologias de baixa emissão e a inviabilidade física da compensação financeira diante da irreversibilidade termodinâmica. Por fim, as Considerações Finais apontam que a sustentabilidade do Norte é subsidiada pela transferência de entropia para o Sul, reafirmando a urgência de estratégias de autonomia pautadas pela resiliência metabólica regional.

2. A Matriz Estruturalista e a Transição Biofísica: Do Valor de Troca à Entropia

O modelo Centro-Periferia, conforme formulado originariamente por Raúl Prebisch (1949) e Celso Furtado (1961), estabelece que o excedente econômico produzido na periferia é sistematicamente drenado para o centro, obstaculizando a acumulação interna e a consolidação de um desenvolvimento autônomo. Conforme assevera Furtado (1974, p. 148): "a forma de utilização do excedente de produção e a posição social do grupo que dele se apropria constituem elementos basilares do processo social que engendra o desenvolvimento". Esta dinâmica de subordinação, analisada inicialmente sob a ótica da deterioração dos termos de troca monetários, encontra na Economia Ecológica contemporânea uma potente tradução biofísica através do conceito de Intercâmbio Ecologicamente Desigual (IED).

Para Celso Furtado (1974;1981), o excedente econômico nas formações subdesenvolvidas deriva dos ganhos de produtividade gerados, sobretudo, pelo setor primário-exportador. Esse excedente é historicamente apropriado por uma minoria privilegiada local para financiar o mimetismo cultural — a imitação dos padrões de consumo sofisticados dos países cêntricos —, inserindo a periferia no sistema industrial pela via da diversificação do consumo, e não pela formação de capital interno. Furtado radicaliza essa crítica ao denunciar a limitação da ciência econômica baseada exclusivamente no valor de troca e ataca métricas como o Produto Interno Bruto (PIB). Conforme aponta Cavalcanti (2001), a mensuração monetária do progresso como um "labirinto de espelhos" e um "ilusionismo", uma vez que tal medida contabiliza a geração de riqueza ignorando sistematicamente o custo da destruição da natureza e a exaustão de recursos não renováveis.

Ao incorporar pioneiramente o paradigma termodinâmico de Nicholas Georgescu-Roegen (1971)[1], Furtado (1974; 1981) adverte que a criação de valor econômico é um processo físico parcial: o sistema ignora que a matéria-energia entra no processo em um estado de baixa entropia (recursos úteis) e sai em um estado irreversível de alta entropia, manifestado na forma de degradação e resíduos. Nesse sentido, o que Furtado descreve como dreno financeiro, autores contemporâneos como Saes

[1] Matemático e economista romeno, é considerado o pai da Bioeconomia e precursor da Economia Ecológica moderna. Em sua obra seminal, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), ele argumenta que o processo econômico não é um fluxo circular mecânico e reversível — como postula a teoria neoclássica —, mas um sistema aberto sujeito à Segunda Lei da Termodinâmica. Segundo a Lei da Entropia, a atividade econômica transforma irreversivelmente matéria e energia de baixa entropia (recursos naturais organizados e úteis) em alta entropia (resíduos dissipados e poluição).

(2025) e Schincariol (2023b) reconhecem como uma fase de maturação teórica que posiciona o economista como um precursor da Economia Ecológica, transformando a variável ambiental em um poderoso instrumento de crítica à teoria neoclássica.

Enquanto a entropia atua como uma lei física incondicional que determina a degradação direcional da energia e da matéria, a fratura metabólica representa o mecanismo social e produtivo que operacionaliza, direciona e acelera essa degradação sob a lógica do capital. Como define Foster (1999) em sua análise da ecologia marxiana, o conceito de "metabolismo" (*Stoffwechsel*) descreve a complexa interação e troca material entre os seres humanos e o ambiente natural, que é mediada e regulada pelo processo de trabalho. Contudo, as relações capitalistas de produção, impulsionadas pela separação antagônica entre a cidade e o campo, provocam uma "fratura irreparável" neste processo interdependente.

Foster (1999) demonstra que essa fratura metabólica rompe o ciclo de renovação vital entre sociedade e natureza ao impedir o retorno dos elementos constituintes essenciais (os nutrientes) ao solo, minando assim a condição natural e eterna de sua fertilidade duradoura. Em suma, ao substituir sistemas ecológicos historicamente circulares e resilientes por lógicas produtivas lineares e de espoliação, o sistema capitalista apropria-se da lei física da entropia e a converte em uma profunda crise socioambiental, esgotando a resiliência da terra em prol da acumulação contínua.

Martinez-Alier (2007) aprofunda essa crítica ao focar diretamente nos fluxos de energia e materiais, de modo que o excedente drenado da periferia é entendido primordialmente como um excedente ecológico, dada a apropriação líquida de biocapacidade e energia. Enquanto a economia tradicional avalia a troca comercial por meio dos preços, o autor analisa o intercâmbio pela lente da entropia, consolidando o conceito de Intercâmbio Ecologicamente Desigual (IED). Sob essa ótica, os países da periferia atuam como exportadores de "sintropia" (recursos naturais em estado de alta ordem e baixa entropia) para o centro do sistema, retendo em seus territórios a alta entropia gerada pela extração, expressa em degradação ambiental e passivos sociais.

Entretanto, a consolidação do IED como métrica de exploração enfrenta desafios teóricos no debate contemporâneo. Meran e Schwarze (2025) advertem que o uso de fluxos biofísicos como indicador unívoco de exploração ecológica pode incorrer em uma fragilidade metodológica ao transpor, de forma análoga e por vezes simplificada, a teoria do intercâmbio desigual de valores de trabalho de Emmanuel (1970) para a dimensão ecológica[2]. Para os autores, a tese de que a ausência de uma troca 1:1 de recursos naturais constitui, *per se*, exploração, carece de uma fundamentação que

[2] Sua tese central postula que a exploração internacional ocorre através do mecanismo de preços no comércio internacional, fundamentada na disparidade dos níveis salariais entre Centro e Periferia. Segundo o autor, o valor é transferido das nações de baixos salários para as de altos salários porque as mercadorias da periferia incorporam uma quantidade maior de tempo de trabalho em troca de mercadorias do centro que incorporam menos, mesmo sob condições de mobilidade de capital e equalização das taxas de lucro.

considere os ganhos de bem-estar (*welfare*) e as assimetrias na distribuição dos frutos do progresso tecnológico. Assim, a injustiça nas relações Norte-Sul não reside apenas na disparidade dos fluxos metabólicos, mas na ausência de uma 'propriedade conjunta' (*joint ownership*) sobre os ganhos de eficiência, o que desloca o debate da simples contabilidade material para a necessidade de novos arranjos institucionais de redistribuição da renda ambiental global.

Esta assimetria também é aprofundada por Hornborg (2011), que identifica a tecnologia do centro como um mecanismo de "fetiche" que mascara a apropriação de tempo de trabalho e espaço ecológico da periferia. O fetiche reside na percepção da tecnologia como uma força produtiva autônoma, ocultando o fato de que a eficiência técnica das economias centrais é indissociável da captura líquida de energia, materiais e horas de trabalho sub-remuneradas do Sul Global. Martinez-Alier (2007) também argumenta que os preços de mercado falham ao internalizar o desgaste ambiental e o esgotamento do capital natural, configurando uma Dívida Ecológica estrutural. Assim, o valor de troca funciona como um mecanismo ideológico de ocultação: ao focar apenas nos preços, a economia de mercado invisibiliza a destruição termodinâmica imposta ao Sul Global para manter a acumulação no Norte.

A convergência entre o “excedente econômico” furtadiano e o “excedente ecológico” revela um mecanismo único de reprodução da dependência. Como advertiu Furtado (1981, p. 75): “o desenvolvimento humano – a ideia de que os povos pobres podem algum dia desfrutar as formas de vida dos atuais povos ricos – é simplesmente irrealizável”. Esta impossibilidade física, pautada pela entropia e pelos limites da ecosfera, fundamenta a tese da Dívida Ecológica.

Em síntese, a periferia enfrenta uma descapitalização ambivalente: perde simultaneamente sua capacidade de acumulação monetária e sua resiliência metabólica, processo que se manifesta de forma aguda no atual neoextrativismo de recursos estratégicos.

3. A Materialidade da Dependência: os custos biofísicos da descarbonização

A transição da arquitetura teórica do intercâmbio desigual para a materialidade geográfica do neoextrativismo revela que a crise socioambiental contemporânea constitui a expressão física das contradições inerentes ao paradigma de acumulação global. No horizonte latino-americano, esse cenário é tensionado pela persistência de estruturas de dependência que agudizam o conflito entre o imperativo do crescimento e os limites biofísicos da biosfera, convertendo o território em um enclave de fornecimento de baixa entropia para o Norte Global.

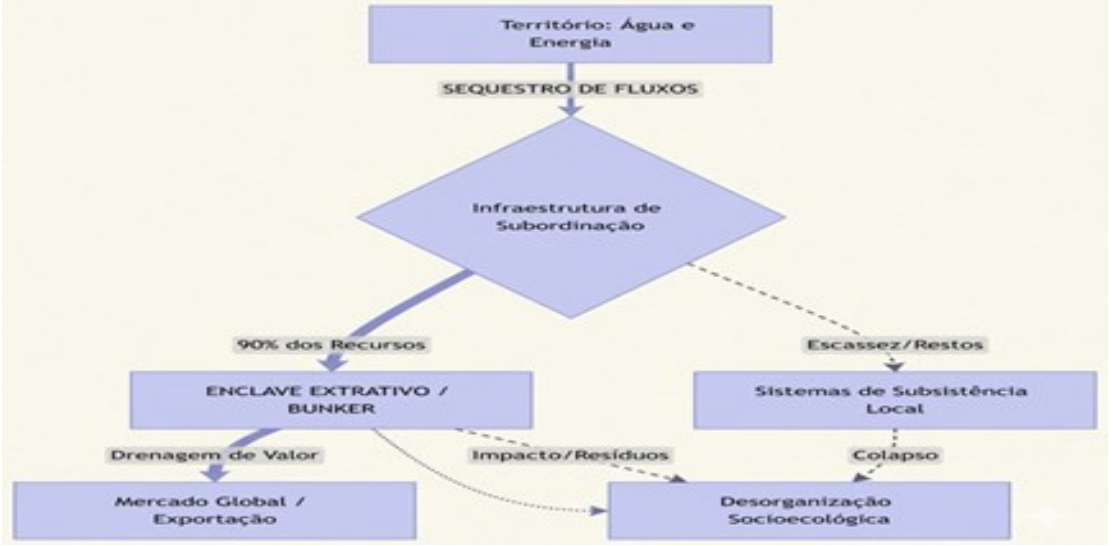
Embora as pesquisas de Bunker (1985) tenham focado primordialmente na exploração da Amazônia brasileira, seu modelo analítico sobre as economias extrativas fornece as bases teóricas exatas para explicar a desorganização socioecológica irreversível no contexto contemporâneo. Conforme elucida o autor, as regiões periféricas são inseridas no sistema mundial operando como

apêndices metabólicos, cujo dinamismo se apoia na retirada e exportação de recursos da natureza em detrimento da criação de valor por meio do trabalho local.

3.1 O Papel do Estado e a Infraestrutura de Subordinação

Para viabilizar a exportação em escala global, o capital impõe a construção de uma pesada infraestrutura logística e tecnológica (ferrovias, complexos portuários e usinas) que não serve à integração do território, mas à sua simplificação metabólica. A tese da desorganização socioecológica (Figura 1) revela que a imposição dessa megaestrutura substitui os sistemas metabólicos locais, historicamente circulares, baseados no lugar e capazes de automanutenção, por sistemas lineares, alienados e inerentemente insustentáveis, voltados a alimentar os fluxos de consumo nos centros globais.

Figura 1: Fluxograma da Infraestrutura de Subordinação (Diagrama de Bunker)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), baseado em Bunker (1985).

Essa engrenagem de drenagem metabólica é legitimada por uma mudança qualitativa no papel do Estado na América Latina. Sob governos de diferentes matrizes ideológicas, consolidou-se a figura do Estado compensador (Gudynas, 2012), que atua como garantidor da infraestrutura extrativa para captar rendas destinadas a financiar amplos programas sociais e garantir estabilidade política.

Contudo, é fundamental compreender que esse Estado não opera como um bloco monolítico, mas como um terreno de luta estruturado permeado por profundas contradições e disputas de hegemonia (Brand, 2008). Observa-se uma marcante heterogeneidade de interesses dentro do aparato estatal, explicitada pelos conflitos institucionais assimétricos entre os ministérios produtivos (como os de Minas e Energia ou Agricultura) e as pastas de salvaguarda do Meio Ambiente.

Para viabilizar o avanço da fronteira extrativa, os órgãos ambientais sofrem pressões sistêmicas, flexibilização de licenciamentos e esvaziamento político, evidenciando que as lógicas de proteção ecológica perdem repetidas batalhas para os imperativos de atração de investimentos, como as constantes tensões no Peru e no Brasil (Alayza & Gudynas, 2012; Gudynas, 2020).

No Peru, um desdobramento crítico é a implementação da *Ventanilla Única Digital* (VUD) para o setor de mineração (2023-2024). Sob o pretexto de agilizar investimentos através da obtenção de permissões e autorizações para exploração e exploração mineira, essa medida centralizou a gestão de permissões no Ministério de Minas e Energia (MINEM), reduzindo a autonomia fiscalizadora de órgãos vinculados ao Ministério do Ambiente (MINAM), SENACE[3]. Além disso, o Congresso peruano tem sido palco de intensas pressões do *lobby* minerador para a prorrogação sucessiva do REINFO (Registro Integral de Formalização Mineira), o que, na prática, enfraquece a aplicação de sanções ambientais e territoriais sobre a mineração em zonas sensíveis (Ancieta, 2026).

No Brasil, o exemplo mais contundente da institucionalização desse esvaziamento é a aprovação da Lei Geral do Licenciamento Ambiental (Brasil, 2025). O novo marco legal introduziu modalidades de licenciamento "autodeclaratório", como a Licença por Adesão e Compromisso (LAC) para empreendimentos de médio impacto, baseada na autodeclaração do empreendedor, e criou a Licença Ambiental Especial (LAE) para projetos considerados estratégicos pelo Conselho de Governo. Esta última modalidade permite ritos sumários com dispensa de etapas e prazos de análise comprimidos (máximo de um ano), priorizando a viabilidade política sobre o rigor técnico.

Recentemente, o conflito em torno da exploração de petróleo na Margem Equatorial (Foz do Rio Amazonas) ilustra o esvaziamento político mencionado: o Ibama sofreu pressões diretas da Casa Civil e do Ministério de Minas e Energia para autorizar perfurações em áreas de alta sensibilidade biológica. O próprio discurso presidencial, ao classificar o rigor técnico do Ibama como "lenga-lenga" burocrático (Fearnside, 2025a), exemplifica a deslegitimação das instâncias de controle frente aos imperativos da fronteira extrativa. Outro caso emblemático é a pavimentação do "Trecho do Meio" da BR-319, cuja licença prévia foi concedida apesar de alertas técnicos sobre sua inviabilidade ambiental, sendo posteriormente objeto de sucessivas batalhas judiciais que opõem a racionalidade desenvolvimentista à preservação da integridade da Amazônia (Fearnside, 2025b; O Globo, 2025)

Essa subordinação das políticas ambientais aos interesses corporativos ganha maior inteligibilidade crítica à luz da perspectiva do modo de vida imperial, que contrapõe à ilusão de que a expansão primário-exportadora visa unicamente ao desenvolvimento nacional. Essa abordagem revela que a própria estrutura do Estado se encontra internacionalizada (Brand e Wissen, 2021; Brand, 2011).

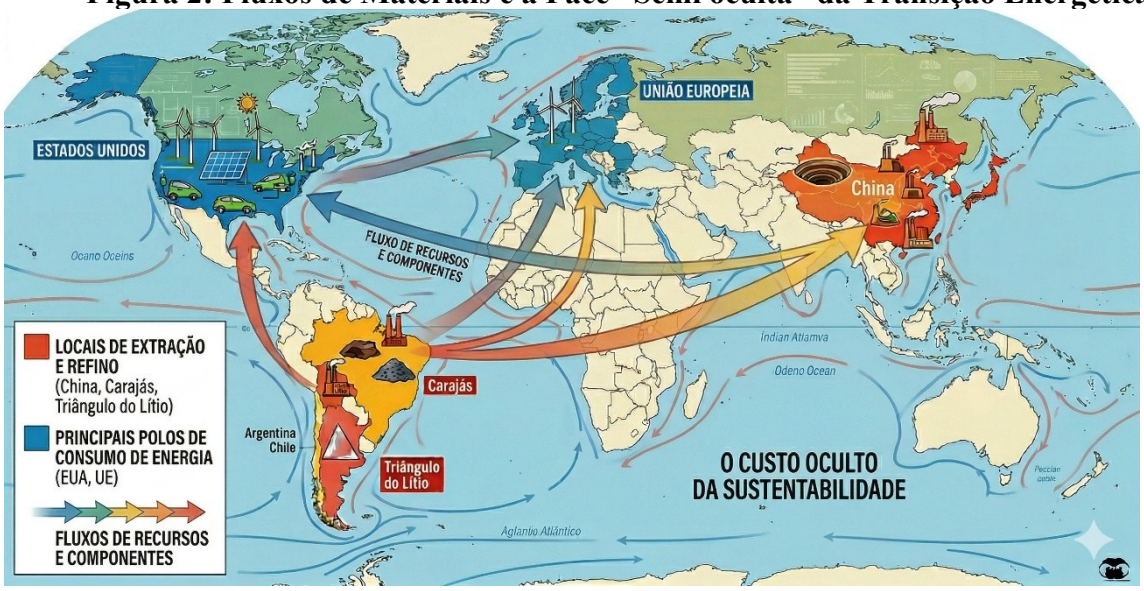
[3] Organismo público técnico especializado do Peru responsável por avaliar e aprovar os Estudos de Impacto Ambiental detalhados (EIA-d) dos maiores projetos de investimento do país.

A reprodução sistêmica do 'modo de vida imperial' (Brand e Wissen, 2021) exige que o aparato estatal atue como garantidor do acesso desproporcional e ilimitado aos recursos naturais do Sul Global, o que se manifesta na nítida assimetria institucional entre as agendas de energia e mineração em detrimento das salvaguardas ambientais. Sob essa ótica, a hegemonia burocrática dos setores extrativos sobre os órgãos de preservação reflete uma ordem que necessita converter territórios latino-americanos em zonas de sacrifício, externalizando as contradições ecológicas do Centro para postergar o colapso de seu próprio padrão de acumulação e consumo.

Cria-se, assim, um paradoxo, onde o Estado distribui rendas para mitigar a pobreza monetária no curto prazo, enquanto autoriza a destruição irreversível dos ecossistemas que garantem a sobrevivência autônoma das populações. A brutalidade da implantação dessa infraestrutura é operacionalizada pelo conceito de *extrahección* (Gudynas, 2013), caracterizado pela extração imposta de forma violenta e acompanhada por sistemáticas violações dos direitos humanos e ambientais.

A voracidade do Norte Global por minerais críticos (Figura 2) estrutura o que se define como o Consenso das *Commodities*: um acordo político-ideológico que assume o extrativismo como um destino irresistível e silencia os conflitos de distribuição ecológica (Svampa, 2019).

Figura 2: Fluxos de Materiais e a Face "Semi oculta" da Transição Energética



Fonte: Elaborado pelo autor, gerado por IA (Gemini/Nano Banana 2).

Essa arquitetura nacional é retroalimentada por uma engrenagem geopolítica maior. Sob essa lógica, as resistências territoriais são criminalizadas como óbices ao progresso, enquanto o Sul Global é reconfigurado nas chamadas zonas de sacrifício, onde a degradação biótica é mascarada pelo discurso da sustentabilidade corporativa e da descarbonização sistêmica.

3.2 A Rematerialização da Transição Energética: Intensidade Mineral e Deslocamento Metabólico

A corrida verde contemporânea caracteriza-se como um processo de reconfiguração geopolítica e geoeconômica em que as economias centrais buscam garantir o suprimento de minerais críticos indispensáveis à infraestrutura de baixa emissão de carbono. Sob a ótica da Economia Ecológica, tal fenômeno não representa um desacoplamento, mas uma intensificação do metabolismo social que desloca a carga termodinâmica da transição para a periferia, consolidando o neoextrativismo da descarbonização.

Em essência, esse movimento é hiper material e sinaliza a rematerialização da economia global: dados da Agência Internacional de Energia (AIE, 2021, 2024) corroboram que o setor energético transita de um modelo intensivo na extração contínua de combustíveis fósseis para um paradigma essencialmente dependente de minerais estratégicos.

Nesse cenário, a materialidade do dreno extrativista consolida a Fratura Metabólica, na qual a infraestrutura monopoliza os fluxos vitais do ambiente físico (Foster, 1999). No caso específico do lítio, a extração em salmouras rompe permanentemente a capacidade de recarga dos aquíferos, gerando uma irreversível anemia territorial. A magnitude desse impacto é evidenciada pelo fato de que a obtenção de uma tonelada de carbonato de lítio, insumo com demanda projetada para crescer 1300% até 2050, exige a evaporação de aproximadamente 2,1 milhões de litros de água em regiões de extrema aridez (Collins et al., 2024; Hund et al., 2023).

Para compreender a magnitude dessa mudança, é necessário analisar a intensidade mineral exigida tanto para a construção da infraestrutura quanto para a efetiva geração de energia ao longo do ciclo de vida das diferentes tecnologias. A Tabela 1 estima a tonelagem necessária de minerais críticos (incluindo, mas não se limitando a cobre, zinco, níquel, terras raras e silício, excluindo metais estruturais básicos como aço e alumínio) para o comissionamento de 1 *megawatt* (MW) de capacidade de geração.

Os dados demonstram que as tecnologias de geração renovável, devido à natureza difusa de captura da energia (vento e radiação solar), exigem infraestruturas fisicamente mais extensas e complexas. Consequentemente, a construção de plantas eólicas e solares demanda de 7 a 15 vezes mais minerais críticos por *megawatt* do que uma usina termelétrica a gás natural.

Tabela 1: Toneladas de Minerais por MW de Capacidade Instalada

Fonte de Energia	Tipo de Infraestrutura	Toneladas de Minerais por MW[1]
Renovável	Eólica *Offshore* (Oceano)	~ 15 t/MW
Renovável	Eólica *Onshore* (Terra Firme)	~ 10 t/MW
Renovável	Solar PV((Fotovoltaica)	~ 7 t/MW
Baixo Carbono	Nuclear	~ 5 t/MW
Fóssil	Carvão	~ 2,5 t/MW
Fóssil	Gás Natural	~ 1 t/MW

Fonte: Elaborado pelo autor. A partir dos relatórios da IEA. 1) os valores foram convertidos para toneladas por MW (onde 1.000 kg = 1 tonelada)

Todavia, fontes renováveis possuem fatores de capacidade inerentemente menores devido à sua intermitência meteorológica, operando em sua capacidade nominal por uma fração do tempo quando comparadas a usinas térmicas despacháveis.

Portanto, utiliza-se a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), conforme estabelecido pelas normas internacionais ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), uma estrutura metodológica sistematizada para a quantificação e avaliação dos aspetos ambientais e dos impactos potenciais associados a um sistema-produto ao longo da sua existência (ISO, 2006).

A principal distinção desta abordagem reside na sua perspectiva holística, que assegura a contabilização de fluxos de matéria e energia desde a extração de matérias-primas até ao processamento, distribuição, fase de utilização e gestão de fim de vida, incluindo a disposição final ou recuperação (Hauschild, 2018).

Para estabelecer uma base de comparação focada na entrega final do serviço energético, a Tabela 2 projeta a tonelagem mineral necessária para gerar 1 *Terawatt*-hora (TWh)[4] ao longo da vida útil da instalação. Esta estimativa assume parâmetros industriais padronizados para o fator de capacidade (Solar: 20%; Eólica *Onshore*: 35%; Eólica *Offshore*: 45%; Gás: 60%; Carvão: 70%) e para a vida útil projetada de cada tecnologia[5].

Tabela 2: Estimativa de tonelagem mineral requerida para a geração de 1 TWh (Análise de Ciclo de Vida)

Fonte de Energia	Intensidade Base	Capacidade Necessária para 1 TWh	Toneladas Totais por 1 TWh Gerado
Gás Natural (Fóssil)	1,0 t/MW	~ 6,3 MW	~ 6,3 toneladas
Carvão (Fóssil)	2,5 t/MW	~ 4,0 MW	~ 10,0 toneladas
Eólica Onshore (Renovável)	10,0 t/MW	~ 13,0 MW	~ 130,0 toneladas
Eólica Offshore (Renovável)	15,0 t/MW	~ 10,1 MW	~ 151,0 toneladas
Solar PV (Renovável)	7,0 t/MW	~ 22,8 MW	~ 160,0 toneladas

Fonte: Elaborado pelo autor. Projeções derivadas da ponderação dos dados da AIE (2021) por fatores de capacidade e vida útil médios do setor elétrico.

É possível aferir o aspecto crítico do metabolismo socioeconômico da transição energética. Quando ajustada para a geração real de energia (TWh), a discrepância na intensidade material entre

[4] Equivale à energia consumida por cerca de 1 milhão de casas em um mês.

[5] A comparação de intensidade mineral baseia-se na normalização de dados de ciclo de vida (LCA) para a entrega de uma unidade comum de trabalho (1TW*h*). Diferente das plantas de combustão fóssil, cujos limites de eficiência são definidos pela termodinâmica do Ciclo de *Carnot*, a infraestrutura renovável é limitada pela densidade de potência superficial (W/M^2) e por fatores de capacidade (*CF*) estocásticos (intermitência). Para este cálculo, adotou-se o método de Estoque de Material de Ciclo de Vida, considerando: (i) CF diferenciados: Solar (≈ 20%), Eólica *Onshore* (≈ 35%), Eólica *Offshore* (≈ 45%), Gás Natural (≈ 60%) e carvão (≈ 70%), o que exige uma sobrecapacidade instalada nominal para equivalência de entrega; e (ii) a discrepância na obsolescência programada/física, onde ativos fósseis operam por L ≈ 40-50 anos, enquanto ativos renováveis possuem vida útil de L ≈ 20-25 anos, implicando em uma taxa de reposição de capital fixo (e, portanto, de extração mineral) de 2,0x a 2,5x maior no mesmo horizonte temporal.

fontes renováveis e fósseis é ampliada. Para entregar a mesma quantidade de eletricidade, as infraestruturas de energia solar e eólica requerem (de forma estimada) uma mobilização de minerais críticos de 13 a 25 vezes superior à geração a gás natural.

O presente cenário configura um deslocamento metabólico onde a descarbonização das matrizes energéticas no Centro Global é subsidiada pela desestruturação biótica do Sul. Projeções indicam um incremento de 294% na tonelagem total de minerais requeridos pela infraestrutura energética até 2050 (Valero et al., 2018; Calvo; Valero, 2021). A materialidade dessa pressão (Tabela 3) pode ser sistematizada pela pegada hídrica e a carga de resíduos dos três pilares minerais da transição contemporânea: o Lítio, as Terras Raras e o Ferro.

Tabela 3. Dimensões da Fratura Metabólica: Intensidade Hídrica e Carga de Rejeitos (2024-2025)

Indicador Técnico	Lítio (Carbonato - Salmoura)	Terras Raras (Óxidos Separados)	Ferro (Pelotas/Finos)
Evasão Hídrica Direta (m^3/ton.) [1]	400 - 1.600(Evaporação líquida)	120 - 180 (Processo químico)	3 – 8 (Uso em flotação)
Resíduos químicos (kg/ton.) [2]	800 - 1.200 (Sais de magnésio/Boro)	1.500 - 2.500 (H_2SO_4, HCL, Amônia)	150 - 300 (Floculantes e Aminas)
Atividade Radioativa (Bq/kg)[3]	Desprezível (< 0,5)	7.000 - 11.000 (Th-232 e Ra-228)	Traços geológicos (< 20)
Volume de Rejeito Sólido (t/t)[4]	1,5 - 2,2 (Sais e impurezas)	8,0 - 12,0 (Lamas ácidas/radioativas)	0,4 - 0,6 (Areias e siltes)

1) Representa a retirada líquida de água do sistema hidrológico por tonelada produzida: no Lítio, a evasão (até 1.600 m^3/t) ocorre majoritariamente por evaporação em salares (desertos de sal ou lagos secos) de extrema aridez, o que constitui um dano crítico e muitas vezes irreversível ao interromper a recarga de aquíferos fósseis; nas Terras Raras, a intensidade hídrica (até 180 m^3/t) é exigida pelo complexo refino químico, elevando o risco de escassez hídrica local e contaminação sistémica; no Ferro, embora a intensidade unitária seja menor (3-8 m^3/t), o impacto reside na escala colossal da extração, que pressiona a disponibilidade de água em bacias hidrográficas saturadas para fins de flotação, isto é, a utilização massiva de água e reagentes químicos para separar o mineral de interesse (ferro) da "ganga" (impurezas como sílica/areia). **2)** Refere-se à carga química residual e aos reagentes mobilizados no processo de beneficiamento: no Lítio, a elevada concentração de sais de magnésio e boro (até 1,2 t/t) agrava a salinização de ecossistemas frágeis e aquíferos em zonas áridas; nas Terras Raras, o uso intensivo de ácidos e amónia (até 2,5 t/t) gera efluentes de extrema toxicidade e risco crítico de acidificação hídrica; no Ferro, a presença de floculantes e aminas nos rejeitos introduz compostos químicos persistentes que comprometem a recuperação biótica de bacias hidrográfica. **3)** A atividade radioativa (Bq/kg) mede a emissão de partículas por segundo. Enquanto no Ferro os valores são basais (nível natural do solo), o refino de Terras Raras gera resíduos NORM (material radioativo natural concentrado pela indústria) que superam em até 11 vezes o limite de segurança internacional de 1.000 Bq/kg. **4)** O volume de rejeito (t/t) indica a massa descartada para cada tonelada de produto final; enquanto no Ferro predominam areias e siltes (rocha moída), nas Terras Raras a fratura biótica é evidenciada pela geração de até 12 toneladas de lamas ácidas/radioativas (rejeito químico concentrado) por unidade produzida.
Fontes: Elaborado pelo autor (2026). *Lítio*: *Argonne National Laboratory* (2024); SQM – *Sociedad Química y Minera de Chile* (2024) *Terras raras*: IAEA – *International Atomic Energy Agency (2024)*; *Lynas Rare Earths Ltd.* (2024). Ferro: *U.S. Geological Survey* (2025); Vale S.A. (2024**).**

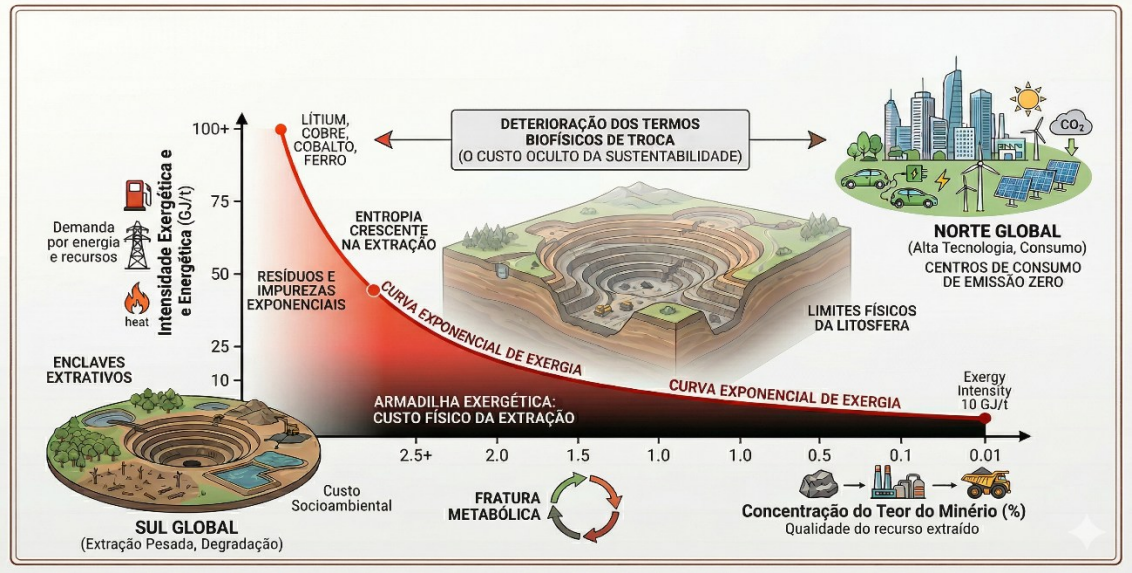
Os indicadores sistematizados na tabela anterior revelam a face oculta e fisicamente exauriente da descarbonização global, transpondo o debate para além das métricas puramente monetárias ou climáticas. A pegada hídrica e a carga de rejeitos tóxicos e radioativos evidenciam que a transição energética opera uma transferência líquida de danos ambientais, transformando biomas estratégicos em repositórios de alta entropia.

3.3 A Armadilha Exergética e a Inviabilidade da Compensação

O Sul Global também enfrenta um impasse que transcende a mera vontade política de subir na cadeia de valor (Figura 3). A tentativa de industrializar as etapas de refino e fabricação de baterias (Lítio) ou ímãs permanentes (Terras Raras) colide frontalmente com a Armadilha Exergética (o potencial de realizar trabalho útil). À medida que o teor do minério declina, a energia necessária para a purificação cresce de forma exponencial.

Como destaca Michaux (2021), a escassez mineral contemporânea transcende a métrica de volume geológico, situando-se na esfera da viabilidade exergética, isto é, demonstra que o verdadeiro limite não é o esgotamento físico do minério na Terra, mas sim o custo energético cada vez mais impeditivo para extraí-lo e refiná-lo.

Figura 3. A Lei do Minério e a Armadilha Exergética: assimetria biofísica na extração minera



Fonte: Elaborado pelo autor, gerado por IA (Gemini/Nano Banana 2).

Nesse sentido, a captura de etapas superiores da cadeia de valor no Sul Global pode representar, paradoxalmente, a internalização definitiva da entropia. Ayres e Warr (2009) fundamentam que a eficiência industrial não anula o custo físico da exergia dissipada ao basear-se na Segunda Lei da Termodinâmica, a qual estabelece que todo processo de produção econômica é inerentemente dissipativo e irreversível.

Embora o progresso tecnológico tenha aumentado a eficiência exergética, reduzindo a proporção de desperdício em relação ao trabalho útil, é fisicamente impossível converter matérias-primas em bens úteis sem a criação inevitável de calor residual e resíduos materiais. Assim, essa exergia dissipada é a própria gênese da poluição, impondo danos ambientais que nenhuma inovação técnica consegue extinguir por completo.

A proposição de uma propriedade conjunta sobre os ganhos de eficiência tecnológica esbarra na irreversibilidade dos processos biofísicos. Mesmo que mecanismos institucionais, como a elevação de *royalties* ou taxas de exportação, logrem redistribuir a renda monetária, eles permanecem incapazes de recompor a resiliência biótica perdida na extração. Essa ilusão de que a compensação financeira pode anular a degradação material constitui a essência do fetiche tecnológico (Hornborg, 2011), que mascara a apropriação de exergia e espaço ecológico do Sul Global para sustentar a infraestrutura técnica do Centro.

Sob a ótica da termodinâmica e do IED, o ganho de eficiência no Norte não é uma criação de riqueza autônoma, mas a captura de sintropia (recursos de baixa entropia) extraída da periferia[6]. O Centro importa esses recursos altamente organizados para manter sua tecnomassa (massa total de materiais imobilizados no ambiente construído e no parque industrial), exportando, em troca, produtos de elevado valor financeiro que biofisicamente representam energia degradada e potencial produtivo exaurido. Assim, a proposta de redistribuição falha ao tentar resolver um impasse físico com ferramentas monetárias, ignorando a incomensurabilidade entre o valor de troca subjetivo e o valor ecológico objetivo.

O fetiche tecnológico atua para ocultar a Segunda Lei da Termodinâmica: a conversão de exergia em entropia, manifesta na exaustão de aquíferos e solos, é um processo físico irreversível. Por conseguinte, os lucros e *royalties* podem equalizar planilhas financeiras, mas nenhuma quantidade de capital pode reverter a dissipação energética ou recompor a base material vital irremediavelmente drenada da periferia. Em suma, o dinheiro redistribui a renda, mas jamais reconstitui a natureza.

Essa limitação fundamental revela que a dívida ecológica não é um saldo contábil ajustável, mas um fluxo de sintropia não compensável que invalida a eficácia das políticas fiscais tradicionais. Sob essa ótica, a internalização de custos via tributação falha ao ignorar a impossibilidade de reciclagem perfeita e o caráter unidirecional do tempo termodinâmico. No Triângulo do Lítio, por exemplo, a reposição de aquíferos fósseis evaporados é economicamente proibitiva, tornando o passivo ambiental tecnicamente impagável e evidenciando a insuficiência do valor de troca como mediador da crise.

Essa lacuna é aprofundada pela crítica de Mayumi (2001) ao dogma energético: a crença de que energia abundante viabilizaria a reciclagem completa. Pela entropia de mistura, a recuperação de matéria altamente dissipada exige um esforço energético exponencial, tornando a pureza total fisicamente irrealizável no tempo histórico. Fundamentado no modelo fluxo-fundo de Georgescu-Roegen, o autor supracitado ressalta que os ecossistemas operam como fundos vitais que, uma vez

[6] Matéria e energia em alto estado de organização, que permitem a reprodução do capital com baixo custo energético local.

degradados irreversivelmente em sua matéria em massa (*matter in bulk*), não admitem substituição por capital financeiro.

Portanto, o estrangulamento geológico manifesta-se no declínio sistemático do teor do minério, uma vez que exige uma quantidade de energia cada vez maior para a purificação. Isso torna a industrialização no Sul Global uma internalização da entropia, onde o ganho monetário da etapa superior da cadeia é consumido pelo custo físico e ambiental da exergia dissipada no território.

Esse impasse biofísico também desmorona a retórica do Crescimento Verde e da Modernização Ecológica, vertentes que sustentam ser possível manter a expansão econômica infinita através da eficiência tecnológica e de ajustes de mercado. Tais teorias postulam a viabilidade de um desacoplamento (*decoupling*) absoluto, ou seja, um cenário em que o crescimento do PIB ocorreria em paralelo a uma redução real (e não apenas proporcional) no consumo de recursos naturais e energia (Hickel e Kallis, 2019; Vadén et al., 2020).

O desacoplamento configura-se, nesse cenário, como um ilusionismo estatístico: a evidência empírica demonstra que, embora o Norte Global e os países de alta renda pareçam estabilizar ou reduzir seu Consumo Material Doméstico (DMC)[7], esse aparente sucesso desaparece assim que se contabiliza a Pegada Material (*Material Footprint*), indicador que inclui os fluxos indiretos de recursos embutidos nos bens importados (Wiedmann et al., 2015; Hickel e Kallis, 2019).

Na prática, o Norte Global descarboniza sua economia interna e torna seu PIB limpo por meio da financeirização, da desindustrialização e da terceirização de sua produção, o que passa uma falsa impressão de sustentabilidade interna, isto é, indicadores ambientais dentro de níveis aceitáveis dentro de suas próprias fronteiras geográficas, negligenciando o impacto que ela causa fora delas (Vadén et al., 2020). Enquanto isso, o Sul Global é compelido a carbonizar seu balanço metabólico para fabricar esses bens e fornecer os minerais críticos necessários à transição verde, assumindo o peso material da produção global (Schandl et al., 2017).

Dessa forma, a infraestrutura zero emissões revela-se, em sua gênese, como um projeto hiper material, uma vez que a literatura demonstra que produzir 1 kWh de eletricidade a partir de energias renováveis exige 10 vezes mais metais do que a partir de combustíveis fósseis (Arnsperger e Bourg, 2017).

O que a literatura ecomodernista (defensora da salvação da natureza a partir da tecnologia e do crescimento económico) negligencia não é uma desmaterialização da riqueza, mas uma verdadeira

[7] O Consumo Material Doméstico (DMC, na sigla em inglês para *Domestic Material Consumption*) é um indicador de fluxo de materiais que mede a quantidade total de matérias-primas extraídas diretamente em um território, acrescida das importações e subtraída das exportações físicas. Diferente de indicadores puramente financeiros, o DMC quantifica a base biofísica da economia (como uma espécie de "PIB Biofísico"), permitindo mensurar a intensidade material do crescimento e o grau de dependência de recursos naturais primários (Araújo, 2019; EUROSTAT, 2024). Assim, o DMC é utilizado para evidenciar a disparidade entre o volume de massa movimentada na periferia e o valor agregado retido localmente.

rematerialização da economia global, visto que no século XXI a economia mundial entrou em uma trajetória de intensificação do uso de materiais (Hickel e Kallis, 2019).

Portanto, a mudança do eixo produtivo para o Sul Global gerou uma tendência global de "reacoplamento" (*recoupling*), onde a extração e o consumo de materiais aceleraram a taxas superiores às do próprio crescimento do PIB global, impulsionados pela industrialização asiática. O mundo não está consumindo menos recursos; está simplesmente realocando o peso de sua extração por meio do comércio internacional (Araújo,2022; Krausmann et al., 2017; Schandl et al., 2017; Vadén et al., 2020).

Esse fenômeno meramente desloca o determinismo físico e a degradação ambiental para a periferia capitalista, uma vez que a nova extração mineral ocorrerá majoritariamente nas comunidades do Sul Global. Longe de representar uma solução ecológica definitiva, a dinâmica atual ameaça substituir a predatória indústria dos combustíveis fósseis por uma indústria de energias renováveis igualmente extrativista e injusta (Ajl, 2018).

O crescimento verde, portanto, mascara a transferência dos danos socioambientais, exigindo níveis insustentáveis de extração que acirram conflitos territoriais, disputas por recursos e poluição local, revelando-se incapaz de promover uma verdadeira justiça nas cadeias de suprimento (Li et al., 2014; Scheidel et al., 2020).

Essa engrenagem assegura que a acumulação por “desfossilização”, como descrevem Slipak e Argento (2022), preserve o modo de vida imperial do Norte através de uma sistemática pilhagem entrópica da periferia. Tal dinâmica reafirma a tese de Celso Furtado sobre o Desenvolvimento como um mito, evidenciando que a expansão do capital financeiro (valor de troca) é incapaz de restaurar ou compensar a irreversibilidade da resiliência biótica e exergética perdida (valor de uso/fundo vital).

Considerações Finais

O presente trabalho buscou demonstrar que a corrida verde contemporânea não constitui uma ruptura com o modelo de desenvolvimento periférico, mas sim uma sofisticada reiteração da dependência estrutural. Ao confrontar a mimese cultural do consumo (o "Mito" furtadiano) com as leis da termodinâmica, observa-se que a descarbonização do Centro Global não é um processo de desmaterialização, mas de transferência geográfica de pressões exergéticas para os setores de mineração e metalurgia. Diferente do que sugere a literatura ecomodernista, a transição contemporânea não rompe o determinismo físico; ela o desloca, promovendo uma rematerialização da economia que exige novas fronteiras de sacrifício.

Essa assimetria biofísica corrobora a perpetuação do IED. Como se buscou evidenciar, a periferia ainda aceita a destruição irreversível de seus ecossistemas em troca de renda financeira e de uma ilusão desenvolvimentista que não promove autonomia produtiva. O Mito do Desenvolvimento

ganha, assim, sua versão definitiva: a crença de que a tecnologia de baixo carbono pode universalizar o modo de vida imperial sem exaurir a base material do planeta.

Nesse sentido, o diagnóstico aqui apresentado pode oferecer subsídios para que o planeamento estatal e a tomada de decisão dos agentes não ignorem o balanço termodinâmico das cadeias produtivas. Uma vez que a noção de emissões zero ou de economia circular perfeita é fisicamente inviável, o custo da dissipação nunca é anulado; o sistema sempre exigirá fluxos contínuos de exergia nova para remediar a poluição inevitável. Sob a lente de Celso Furtado, a captura industrial de segmentos de refino no Sul não sinaliza progresso, mas a consolidação de um mecanismo de transferência de entropia.

Não obstante a robustez dos dados, reconhecem-se lacunas quanto à quantificação precisa da exergia dissipada por unidade de PIB exportado. Estudos futuros poderiam avançar na construção de indicadores que integrem o DMC à taxa de regeneração biótica perdida. Em última análise, a crítica furtadiana, agora municiada pela biofísica, revela que a sustentabilidade não é uma variável técnica de ajuste, mas um limite político. O reconhecimento desses limites é o primeiro passo para que o Sul Global deixe de ser o depositário da desordem termodinâmica alheia (como vem ocorrendo a mais de cinco décadas) e passe a pautar sua inserção internacional pela preservação de sua própria resiliência metabólica.

Referências Biográficas

AIE (Agência Internacional de Energia). **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**: World Energy Outlook Special Report. Paris: IEA, 2021 (Revisado em março de 2022).

AIE (Agência Internacional de Energia). **Global Critical Minerals Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024.

AJL, M. **Beyond the Green New Deal**. The Brooklyn Rail, 2018. (Citado em Mastini et al., 2021).

ANCIETA, W. (SPDA). **Alerta legislativa**: proponen flexibilización para mineros inscritos en el Reinfo que pone en riesgo la gestión ambiental en el Perú. Lima: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental, 2026.

ARAÚJO, A. H. D. S. **Avaliando a dimensão biofísica da economia brasileira**: uma análise sociometabólica no período 1970-2019. 2022. Tese (Doutorado em Economia) – [Local não especificado], 2022. Disponível em: tp://orcid.org/0000-0002-1461-4105.

_____. Crescimento econômico e fluxos de materiais no Brasil: estimando a curva de Kuznets ambiental. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 38, n. 1, p. 1-18, 2025.

ARAÚJO, A. H.; ANDRADE, D. C.; DE SOUZA, H. F. Metabolismo socioeconômico (mse): construção conceitual e convergência com a economia ecológica (ee). **REVIBEC - Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 31, n. 1, p. 127-143, 2019.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **GREET Model 2024**: Life Cycle Analysis of Vehicle Technologies, Fuel and Resources. Lemont, IL: U.S. Department of Energy, 2024. Disponível em: https://greet.anl.gov/. Acesso em: 21 mar. 2026.

ARNSPERGER, C.; BOURG, D. **Écologie intégrale**: Pour une société permacirculaire. Paris: Presses Universitaires de France, 2017.

AYRES, R. U. **Industrial Metabolism**: Restructuring for Sustainable Development. Tokyo: United Nations University Press, 1989.

AYRES, R. U.; WARR, B. **The economic growth engine**: how energy and work drive material prosperity. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2009.

BRAND, U.; GÖRG, C. Post-Fordist governance of nature: The internationalization of the state and the case of genetic resources – a Neo-Poulantzian perspective. **Review of International Political Economy**, v. 15, n. 4, p. 567-589, 2008. DOI: https://doi.org/10.1080/09692290802260713.

BRAND, U.; WISSEN, M. **The imperial mode of living**: Everyday life and the ecological crisis of capitalism. London: Verso Books, 2021.

BRASIL. **Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15190.htm. Acesso em: 20 mar. 2026.

BUNKER, S. G. Modes of Extraction, Inequalities of Power, and History of the State in the Brazilian Amazon. **Archives Européennes de Sociologie**, v. 25, n. 1, p. 101-137, 1984.

BUNKER, S. G. **Underdeveloping the Amazon**: Extraction, Unequal Exchange, and the Failure of the Modern State. Chicago: University of Chicago Press, 1985.

CALVO, G.; VALERO, A. Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. **Environmental Development**, v. 38, 100640, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100640.

CAVALCANTI, C. **Celso Furtado e o mito do desenvolvimento econômico**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2001.

COELHO, M. C. N.; MONTEIRO, M. A. A economia política do extrativismo: a tese de Stephen Bunker. **Novos Cadernos NAEA**, v. 8, n. 2, 2005.

COLLINS, G. et al. Projecting demand for mineral-based critical materials in the energy transition for electricity. **Mineral Economics**, v. 37, p. 245-263, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13563-024-00424-3.

EMMANUEL, A. **O intercâmbio desigual**. Lisboa: Editorial Estampa, 1970.

EUROSTAT. **Economy-wide material flow accounts (EW-MFA)**: Handbook. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024.

FEARNSIDE, P. M. O Lula acordará para a crise climática?: 1 – A foz do Amazonas. **Amazônia Real**, [S. l.], 21 jan. 2025a. Disponível em: [link do site]. Acesso em: 20 mar. 2026.

FEARNSIDE, P. M. Por que o Brasil deveria abandonar seus planos de gás e petróleo na Amazônia. **Amazônia Real**, [S. l.], 22 jan. 2025b. Disponível em: [link do site]. Acesso em: 20 mar. 2026.

FOSTER, J. B. Marx's theory of metabolic rift: Classical foundations for environmental sociology. **American Journal of Sociology**, v. 105, n. 2, p. 366-405, 1999. DOI: https://doi.org/10.1086/210315.

FURTADO, C. **Desenvolvimento e subdesenvolvimento**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961.

_____. **Teoria e política do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Editora Nacional, 1974.

_____. **O mito do desenvolvimento**. 5. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1981.

_____. **Brasil: a construção interrompida**. São Paulo: Paz e Terra, 2000.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

GUDYNAS, E. Estado compensador y nuevos extractivismos. **Nueva Sociedad**, n. 237, p. 128-146, 2012.

_____. Extracciones, extractivismos y extrahecciones. **Observatorio del Desarrollo**, n. 18, p. 1-18, 2013.

_____. **Extrativismos**: ecologia, economia e política de um modo de entender o desenvolvimento e a natureza. Rio de Janeiro: Elefante, 2015.

HAN, S. et al. Global supply sustainability assessment of critical metals for clean energy technology. **Resources Policy**, v. 85, 103994, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103994.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life cycle assessment**. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3.

HICKEL, J.; KALLIS, G. Is Green Growth Possible? **New Political Economy**, v. 25, n. 4, p. 469-486, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1594524.

HORNBORG, A. **Global Ecology and Unequal Exchange**: Fetishism, Hyperspace, and the Mnemonics of Nature. London: Routledge, 2011.

HUND, K. et al. **Minerals for Climate Action**: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington, DC: World Bank, 2023.

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). **Safety Reports Series No. 117**: Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Rare Earths Industry. Vienna: IAEA, 2024.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 14040**: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 14044**: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006.

KRAUSMANN, F. et al. Global in-use material stocks in the 20th century. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 114, n. 8, p. 1880-1885, 2017. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1613777114.

LI, Z.; FOLMER, H.; XUE, J. To what extent does air pollution affect happiness? The case of the Jinchuan mining area, China. **Ecological Economics**, v. 99, p. 88-99, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.12.014.

LULA critica Ibama por falta de autorização para explorar petróleo na Foz do Amazonas: 'Parece órgão contra o governo'. **O Globo**, Rio de Janeiro, 12 fev. 2025. Economia. Disponível em: https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2025/02/12/lula-critica-ibama-por-falta-de-autorizacao-para-explorar-petroleo-na-foz-do-amazonas-parece-orgao-contra-o-governo.ghtml. Acesso em: 20 mar. 2026.

LYNAS RARE EARTHS LTD. **ESG Report 2024**: Managing NORM Residues and Chemical Processing. Perth: Lynas, 2024.

MARTINEZ-ALIER, J. **Los conflictos de ecología política**. Barcelona: Icaria, 2004.

MARTINEZ-ALIER, J. **O ecologismo dos pobres**: conflitos ambientais e linguagens de valoração. São Paulo: Contexto, 2007.

MASTINI, R.; KALLIS, G.; HICKEL, J. A Green New Deal without growth? **Ecological Economics**, v. 179, 106832, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106832.

MAYUMI, K. **The origins of ecological economics**: the bioeconomics of Georgescu-Roegen. London: Routledge, 2001.

MERAN, G.; SCHWARZE, R. Unveiling Ecological Unequal Exchange: The Role of Biophysical Flows as an Indicator of Ecological Exploitation in the North-South Relations. **Economics**, v. 19, n. 1, 20250149, 2025. DOI: https://doi.org/10.2478/economics-2025-0149.

MICHAUX, S. P. **The mining of minerals and the limits to growth**. Espoo: Geological Survey of Finland, 2021.

PREBISCH, R. **O desenvolvimento econômico da América Latina e alguns de seus principais problemas**. Santiago: CEPAL, 1949.

QUEIROZ, J. M. de. Desenvolvimento econômico, inovação e meio ambiente: a busca por uma convergência no debate. **Cadernos do Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 9, p. 143-170, 2018.

SAES, A. M. Celso Furtado: An ecological economist? **Ecological Economics**, v. 230, 108466, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108466.

SCHANDL, H. et al. Decoupling global environmental pressure and economic growth. **Journal of Cleaner Production**, v. 132, p. 45-56, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.114.

SCHEIDEL, A. et al. Environmental conflicts and defenders: a global overview. **Global Environmental Change**, v. 63, 102104, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102104.

SCHINCARIOL, V. E. Celso Furtado on natural resources, the environment and ecology. In: THE ROUTLEDGE handbook of the history of economic thought. London: Routledge, 2023b.

SECK, G. S.; HACHE, E.; BARNET, C. Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world. **Resources Policy**, v. 75, 102516, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102516.

SLIPAK, A. M.; ARGENTO, M. Accumulation by decarbonization and the missing link of lithium in the clean energy transition. **Journal of Political Ecology**, v. 29, n. 1, 2022. DOI: https://doi.org/10.2458/jpe.5111.

SQM (SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE). **Sustainability Report 2024**: Environmental Performance and Water Management in Salar de Atacama. Santiago: SQM, 2024.

SVAMPA, M. **As fronteiras do neoextrativismo na América Latina**: conflitos socioambientais, giro ecoterritorial e novas dependências. São Paulo: Elefante, 2019.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2025**: Iron Ore. Reston, VA: USGS, 2025.

VADÉN, T. et al. Decoupling for ecological sustainability: A categorisation and review of research literature. **Environmental Science and Policy**, v. 112, p. 236-244, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.016.

VALE S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2024**: Gestão de Recursos Hídricos e Indicadores ESG. Rio de Janeiro: Vale, 2024.

VALERO, A. et al. Global material requirements for the energy transition: An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. **Energy**, v. 159, p. 1175-1184, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.149.

WATARI, T. et al. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 91-103, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.002.

WIEDMANN, T. O. et al. The material footprint of nations. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 112, n. 20, p. 6271-6276, 2015. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1412094112.