

Transição Energética, Estrutura Produtiva e Desenvolvimento Verde: Tipologia Setorial da Indústria de Transformação e Estratégias de Política Industrial

Caroline Giusti de Araújo 

Instituto E+ Transição Energética, São Paulo, Brasil

✉ caroline.giusti@emaenergia.org

RESUMO: A transição energética tem redefinido as bases da competitividade industrial contemporânea e lançado nova luz sobre a importância do desenvolvimento produtivo verde como elemento central das estratégias de transformação estrutural. Nesse contexto, as pressões por descarbonização, eficiência energética e reorganização das cadeias produtivas tornam ainda mais relevante compreender a posição relativa dos diferentes segmentos industriais. À vista disso, este trabalho propõe uma tipologia setorial da indústria de transformação brasileira construída a partir de variáveis associadas à exposição internacional, à intensidade energética e ao nível de qualificação do trabalho. Com base nesse conjunto de indicadores, identificam-se seis perfis industriais distintos, cada qual marcado por desafios estruturais e oportunidades específicas de inserção na transição energética. Os resultados demonstram que a agenda energética constitui condição necessária, mas não suficiente, para promover o desenvolvimento produtivo verde. Esse processo requer políticas industriais diferenciadas e coordenadas, capazes de articular inovação tecnológica, transição justa do trabalho e fortalecimento da competitividade internacional.

Palavras-chave: Desenvolvimento Produtivo Verde; Transição Energética; Competitividade.

Códigos JEL: O13; O31.

ABSTRACT: The energy transition is redefining the foundations of industrial competitiveness and shedding new light on the importance of green productive development as a central element of structural transformation strategies. In this context, increasing pressures for decarbonization, energy efficiency, and the reorganization of production chains make it even more relevant to understand the relative position of different industrial segments. In light of this, this paper proposes a sectoral typology of the Brazilian manufacturing industry based on variables related to international exposure, energy intensity, and workforce qualification. Using this set of indicators, six distinct industrial profiles are identified, each characterized by specific structural challenges and opportunities for integration into the energy transition. The results show that the energy agenda constitutes a necessary but not sufficient condition for promoting green productive development. This process requires differentiated and coordinated industrial policies capable of articulating technological innovation, a just transition for workers, and the strengthening of international competitiveness.

Keywords: Green Productive Development; Energy Transition; Competitiveness.

JEL codes: L52, L60, Q01, F18.

1 Introdução

O debate contemporâneo sobre desenvolvimento produtivo verde deslocou-se da discussão normativa sobre sustentabilidade para uma agenda analítica centrada em transformação estrutural, coordenação institucional e direcionalidade tecnológica. Em economias caracterizadas por heterogeneidade produtiva e vantagens energéticas relativas, como o Brasil, essa agenda assume relevância particular. A elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica e a existência de uma base industrial diversificada criam condições potenciais para o reposicionamento competitivo em cadeias globais de valor de baixo carbono. Contudo, a conversão dessas vantagens potenciais em trajetória efetiva de desenvolvimento produtivo depende de como a estrutura industrial interage com o desenho das políticas públicas orientadas à transição energética.

A literatura recente sobre política industrial verde tem avançado significativamente na compreensão da transição energética como processo de transformação produtiva de longo prazo. Mazzucato e Rodrik (2024) enfatizam a centralidade da direcionalidade estratégica e das condicionalidades como instrumentos de alinhamento entre investimento público e mudança estrutural; Chang e Andreoni (2019) destacam a necessidade de coordenação interinstitucional e intertemporal para superar falhas sistêmicas; e Lebdioui (2020) argumenta que a transição energética constitui, essencialmente, um projeto de política industrial. Em comum, esses autores deslocam o foco do “quanto investir” para o “como direcionar e coordenar” a transformação produtiva.

Apesar desse avanço, permanece uma lacuna analítica relevante. A literatura tem enfatizado o desenho institucional, os instrumentos de política e as trajetórias tecnológicas, mas dedica atenção limitada à forma como características estruturais da base produtiva condicionam, de maneira diferenciada, as estratégias de política industrial verde. Em outras palavras, embora se reconheça que a transição energética é um processo industrialmente orientado, ainda é insuficientemente explorado como distintos perfis setoriais — definidos por intensidade energética, inserção internacional e qualificação da força de trabalho — moldam tanto as oportunidades como os constrangimentos para políticas de transformação verde. A ausência de um enquadramento tipológico que articule estrutura produtiva e direcionalidade de política constitui o hiato teórico que este artigo busca enfrentar.

O objetivo do trabalho é, portanto, conectar a estrutura produtiva da indústria de transformação brasileira às estratégias de política pública necessárias à transição energética e ao desenvolvimento produtivo verde. Para isso, desenvolve-se uma tipologia setorial construída a partir de variáveis de exposição internacional, intensidade energética, dispêndios com eficiência energética, valor bruto da produção industrial e qualificação da força de trabalho. Ao identificar perfis industriais estruturalmente distintos, a tipologia permite mapear heterogeneidades que são frequentemente tratadas de forma agregada na literatura sobre política industrial verde.

A primeira contribuição do artigo é analítica. Ao combinar indicadores de inserção internacional, intensidade energética e capacidade de absorção de trabalho qualificado, a tipologia ultrapassa classificações descritivas e explícita como atributos produtivos centrais condicionam necessidades diferenciadas de política pública. Em contextos nos quais a disponibilidade de energia de matriz limpa constitui vantagem potencial, tais atributos tornam-se determinantes para a definição de estratégias de transformação produtiva orientadas à descarbonização.

A segunda contribuição é de natureza teórico-metodológica. Diferentemente das taxonomias clássicas — como a de Pavitt (1984), as tipologias baseadas na relação entre emprego e inovação (Bogliacino e Pianta, 2010), ou entre emprego e manufatura (Castellacci, 2008), bem como as classificações por intensidade tecnológica (OCDE, 2016) — o presente trabalho desloca o foco da trajetória tecnológica e da intensidade de P&D para o potencial produtivo associado à intensidade energética e à qualificação da força de trabalho. Esses elementos são tratados como

dimensões constitutivas do desenvolvimento produtivo verde, oferecendo um enquadramento analítico diferenciado, mas adequado às economias com heterogeneidade estrutural e matriz energética predominantemente limpa. Ao fazê-lo, o artigo amplia o escopo das taxonomias setoriais ao incorporá-las a uma agenda orientada pela transição energética.

Além desta introdução, o artigo apresenta um referencial teórico atualizado sobre política industrial e transição energética, descreve a metodologia adotada para a construção da tipologia setorial e, por fim, discute os resultados empíricos e suas implicações para o desenho de políticas públicas voltadas à transformação produtiva verde.

2 Política industrial e direcionalidade verde: transformação estrutural em contexto de transição global

O retorno da política industrial ao centro do debate econômico contemporâneo não constitui mero revivalismo institucional, mas uma inflexão paradigmática na compreensão do desenvolvimento. Após décadas de hegemonia do receituário liberal associado ao chamado Consenso de Washington, a combinação entre estagnação produtiva, crise financeira global e emergência da mudança climática recolocou a questão estrutural no núcleo da agenda econômica. Nesse novo contexto, o Estado deixa de ser concebido como agente restrito à correção de falhas de mercado e passa a ser interpretado como coordenador estratégico de transições tecnológicas, produtivas e ambientais (Rodrik, 2004; Aiginger e Rodrik, 2020; Mazzucato e Rodrik, 2024).

Esse “renascimento da política industrial”, na formulação de Aiginger e Rodrik (2020), envolve uma redefinição simultânea de objetivos e instrumentos. Inovação, competitividade e sustentabilidade deixam de ser dimensões separadas da política econômica e passam a compor um mesmo processo de transformação estrutural. A agenda verde, nesse sentido, não aparece como política ambiental periférica, mas como eixo constitutivo da nova política industrial. A transição climática redefine o escopo da intervenção estatal ao exigir reorientação coordenada da estrutura produtiva, da base tecnológica e dos padrões de inserção internacional.

A reconfiguração proposta por Aiginger e Rodrik (2020) apoia-se em três deslocamentos estruturais. Primeiro, a política industrial amplia seu escopo para além da manufatura tradicional, incorporando serviços intensivos em conhecimento, digitalização e atividades tecnológicas modernas. Segundo, abandona-se a visão estritamente *top-down* em favor de processos institucionais de interação contínua entre Estado e setor privado, em linha com a noção de *embedded autonomy*. Terceiro, reconhece-se que a política industrial não opera isoladamente: sua efetividade depende da articulação com políticas de concorrência, inovação, comércio, desenvolvimento regional e regulação ambiental.

A incorporação da agenda verde intensifica essa dimensão direcional. Políticas orientadas por missão implicam definição explícita de trajetórias tecnológicas desejadas, mobilizando instrumentos diversos sob uma lógica comum. Mazzucato e Rodrik (2024) aprofundam esse argumento ao introduzir o papel das condicionalidades: subsídios, crédito público e incentivos fiscais devem estar associados a contrapartidas que assegurem criação de valor público, inclusive ambiental. A direcionalidade, contudo, não equivale a planejamento centralizado. Sua eficácia depende de um equilíbrio delicado entre definição estratégica clara — como metas de neutralidade climática — e manutenção de espaço para experimentação, aprendizado e competição tecnológica.

Essa reinterpretção da política industrial também desafia a tradicional oposição entre fomento e concorrência. Ahuja e Hausmann (2025) demonstram que competitividade não emerge espontaneamente da eficiência de mercado, mas pode ser institucionalmente construída. O Estado pode estruturar mercados competitivos, combinando instrumentos de apoio — crédito,

subsídios, P&D, compras públicas — com mecanismos que induzem rivalidade, eficiência e inovação. Política industrial e política de concorrência tornam-se, assim, instrumentos complementares de coordenação econômica, especialmente em setores caracterizados por economias de escala, aprendizado cumulativo e forte intensidade tecnológica.

Essa dimensão direcional aproxima-se da tradição neo-schumpeteriana. Conforme argumentam Dosi (1982) e Perez (2002), grandes transformações econômicas estão associadas a mudanças de paradigma tecnoeconômico. Lema e Perez (2024) sustentam que a transição verde representa não apenas difusão tecnológica incremental, mas reorientação normativa e institucional do desenvolvimento capitalista. Diferentemente das revoluções anteriores, o “verde” carrega dimensão explicitamente normativa — sustentabilidade, inclusão e justiça ambiental — que redefine a direção do investimento, da inovação e da regulação. A possibilidade de um novo *golden age* verde depende da convergência entre direção política, inovação tecnológica e reorganização institucional em escala global.

Todavia, a literatura sobre industrialização tardia alerta que tais oportunidades não são automáticas. Amsden (2001) e Chang (2002) demonstram que processos de *catching-up* dependem de coordenação estratégica e acumulação de capacidades antes que mercados se consolidem. A transição verde cria janelas temporárias de reposicionamento produtivo, mas sua materialização requer ação estatal coordenada. A assimetria entre a velocidade de formação dos mercados verdes e a lentidão da adaptação industrial torna o desafio dos países *latecomers* particularmente agudo: na ausência de direcionalidade e investimento articulado, a transição pode aprofundar dependências tecnológicas e reforçar hierarquias globais nas cadeias de valor.

Nesse contexto, Anzolin e Lebdioui (2020) estruturam as políticas industriais verdes em três dimensões interdependentes: consumo, firma e transformação estrutural. Políticas focadas exclusivamente na demanda enfrentam limitações informacionais e distributivas; medidas centradas apenas na eficiência empresarial mostram-se insuficientes sem investimentos complementares em P&D e difusão tecnológica; a dimensão estrutural — transformação da base produtiva — revela-se decisiva e, simultaneamente, a mais desafiadora para economias em desenvolvimento. A evidência apresentada pelos autores sugere que, sem estratégia de longo prazo articulada, a transição energética tende a reproduzir padrões de dependência tecnológica e comercial.

A questão central, portanto, não reside apenas na existência de instrumentos de política industrial, mas na coerência entre eles. Chang e Andreoni (2019) demonstram que o impacto das políticas industriais depende da coordenação horizontal — entre instrumentos de oferta e demanda — e vertical — entre níveis de governança. Políticas fragmentadas podem gerar sobreposições, lacunas ou conflitos, reduzindo sua efetividade. A coordenação intertemporal e institucional emerge como condição para aprendizado cumulativo, estabilidade de expectativas e coerência estratégica, especialmente relevante no caso da agenda verde, que envolve múltiplas cadeias produtivas, elevada incerteza tecnológica e interdependências sistêmicas.

Assim, a literatura recente converge para a compreensão da política industrial verde como processo direcional e coordenado de transformação estrutural. Não se trata de simples ampliação de instrumentos ambientais, mas de reorganização estratégica da estrutura produtiva sob nova direção normativa e tecnológica. Para países como o Brasil, o desafio reside em traduzir essa direcionalidade em arranjos institucionais capazes de articular inovação, competitividade e sustentabilidade, evitando tanto a fragmentação das políticas quanto a reprodução passiva das hierarquias globais emergentes.

3 Uma breve análise do caso brasileiro

3.1 Desafios e oportunidades do Brasil na agenda de desenvolvimento produtivo verde

A retomada do debate sobre política industrial no contexto da emergência climática ampliou a relevância da compreensão do desenvolvimento produtivo verde. No caso brasileiro, esse desafio soma-se a um processo prolongado de desindustrialização, agora agravado por novas pressões competitivas, como exigências de rastreabilidade de cadeias produtivas, contabilização de carbono incorporado, sistemas de mensuração, relato e verificação (*Measurement, Reporting and Verification – MRV*), além de aumentos projetados de *CAPEX* e *OPEX*, em um cenário de escassez de recursos públicos para expansão de subsídios.

Uma dimensão frequentemente subestimada desse desafio refere-se ao acesso e ao desenvolvimento de tecnologias verdes. Com base na taxonomia de tecnologias verdes da World Intellectual Property Organization (WIPO, 2025), observa-se diferença expressiva no volume absoluto de patentes verdes. No acumulado entre 2014 e 2024, o Brasil representou apenas 0,16% do total chinês e 0,98% do total norte-americano. A Tabela 1 apresenta a distribuição percentual das famílias de patentes verdes (*single family*), segundo país de prioridade, para Brasil, China e Estados Unidos, no período acumulado entre 2014 e 2024.

No Brasil, observa-se maior concentração relativa nas áreas de biocombustíveis (26%), controle da poluição (15,3%) e mobilidade diária (10,1%), além de presença distribuída — ainda que menos expressiva — em segmentos como comércio de carbono, células de combustível, aproveitamento energético de resíduos, alternativas a pesticidas e veículos em geral. Nos Estados Unidos, identifica-se dominância relativa em deslocamentos diários (22,6%), acompanhada de distribuição mais equilibrada entre comércio de emissões, biocombustíveis, células de combustível e iluminação eficiente. A China, por sua vez, apresenta perfil parcialmente convergente ao norte-americano, com destaque para mobilidade (13,4%) e controle da poluição (20,1%), além de maior dispersão tecnológica em energia solar, comércio de carbono e aproveitamento energético de resíduos.

A leitura comparativa desses padrões sugere que a disponibilidade de recursos naturais, embora relevante, não constitui condição suficiente para a captura de valor no desenvolvimento produtivo verde, como evidencia a distribuição das patentes apresentada na Tabela 1. Países capazes de internalizar ganhos na economia verde são aqueles que convertem vantagens naturais em tecnologia proprietária e em capacidades produtivas estruturadas. Nesse sentido, o Brasil deve avançar a partir de sua base de capacidades domésticas — como biomassa, matriz energética renovável e minerais críticos — mas, simultaneamente, inserir-se nas rotas tecnológicas que sustentam a descarbonização global, tais como armazenamento de energia, materiais avançados, energia térmica, geoenergia, dispositivos elétricos, tecnologias nucleares, hidrogênio e captura, utilização e armazenamento de carbono, entre outras.

O desenvolvimento de rotas tecnológicas é um processo capital-intensivo, lento e que exige coordenação entre Estado, academia e setor produtivo. Por isso, o país precisa formular políticas públicas orientadas a evitar que se restrinja à condição de importador líquido de tecnologia. Nas rotas já constituídas, caracterizadas por elevadas barreiras à entrada, é necessário, ao menos, constituir capacidades domésticas de absorção tecnológica.

A agenda verde, quando compreendida como vetor de transformação produtiva, pode mobilizar as vantagens comparativas associadas à matriz energética brasileira, estimulando a diversificação produtiva — tanto em produtos quanto em processos — e a formação de novas especializações industriais de baixo carbono. O principal desafio, contudo, reside na superação de entraves conjunturais e na construção de uma governança integrada capaz de articular instrumentos de

Tabela 1: Distribuição percentual de invenções (*single family*) classificadas como verdes, com país de prioridade BR, CN e US (2014–2024)

Nível 2 da análise de tecnologias	BR	CN	US
Técnicas alternativas de irrigação	0,3%	0,7%	0,1%
Biocombustíveis	26,0%	6,6%	9,1%
Comércio de carbono/emissões	4,5%	6,2%	10,5%
Deslocamentos diários	10,1%	13,4%	22,6%
Consumo de resíduos por combustão	0,2%	0,6%	0,1%
Veículos cosmonautas movidos a energia solar	0,0%	0,0%	0,0%
Dispositivos para produção de energia mecânica a partir da energia muscular	0,0%	0,0%	0,0%
Técnicas florestais	0,2%	0,1%	0,0%
Células de combustíveis	4,5%	4,8%	8,5%
Usinas de turbina a gás, utilizando fonte de calor de origem nuclear	0,0%	0,0%	0,0%
Energia geotérmica	0,4%	0,7%	0,3%
Aproveitamento de energia a partir de resíduos produzidos pelo homem	4,6%	6,2%	1,6%
Energia hidrelétrica	0,8%	0,7%	0,5%
Iluminação de baixo consumo	1,1%	5,6%	8,9%
Propulsão de embarcações marítimas	0,0%	0,0%	0,0%
Medição do consumo de eletricidade	2,1%	4,5%	3,7%
Engenharia nuclear	0,4%	0,2%	0,2%
Outras formas de produção ou utilização de calor não derivadas da combustão	0,1%	0,3%	0,1%
Alternativas a pesticidas	4,2%	0,5%	0,5%
Controle da poluição	15,3%	20,1%	8,1%
Circuitos de alimentação elétrica	2,4%	4,8%	3,5%
Veículos ferroviários	1,4%	0,9%	0,5%
Recuperação de energia mecânica	0,1%	0,0%	0,0%
Recuperação ou processamento de materiais residuais	2,6%	1,0%	0,6%
Reutilização de materiais residuais	3,0%	0,9%	0,6%
Melhoramento do solo	0,0%	0,3%	0,0%
Energia solar	3,2%	5,9%	7,6%
Projeto de estruturas estáticas	0,3%	0,4%	0,1%
Armazenamento de energia elétrica	1,3%	3,0%	2,8%
Armazenamento de energia térmica	0,4%	0,4%	0,3%
Isolamento térmico de edifícios em geral	1,4%	2,4%	0,7%
Tratamento de resíduos	0,7%	1,2%	0,3%
Utilização de calor residual	0,6%	1,0%	0,5%
Veículos em geral	3,8%	3,7%	5,4%
Veículos que não sejam ferroviários	0,9%	0,7%	0,6%
Disposição de resíduos	0,6%	0,5%	0,1%
Energia eólica	2,4%	1,4%	1,2%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da WIPO (2025).

política energética, industrial e tecnológica.

Nesse contexto, o Instituto E+ Transição Energética (2025) debate uma agenda relevante para o Brasil: o *powershoring*. O termo refere-se à realocação estratégica de atividades industriais intensivas em energia e recursos para regiões que combinam abundância e baixo custo de energia limpa com proximidade a insumos de menor pegada de carbono. O potencial brasileiro é evidenciado na Figura 1, que ilustra o grau de renovabilidade da matriz energética em dez setores energo-intensivos, revelando oportunidades para a realocação de cadeias produtivas para o Brasil.

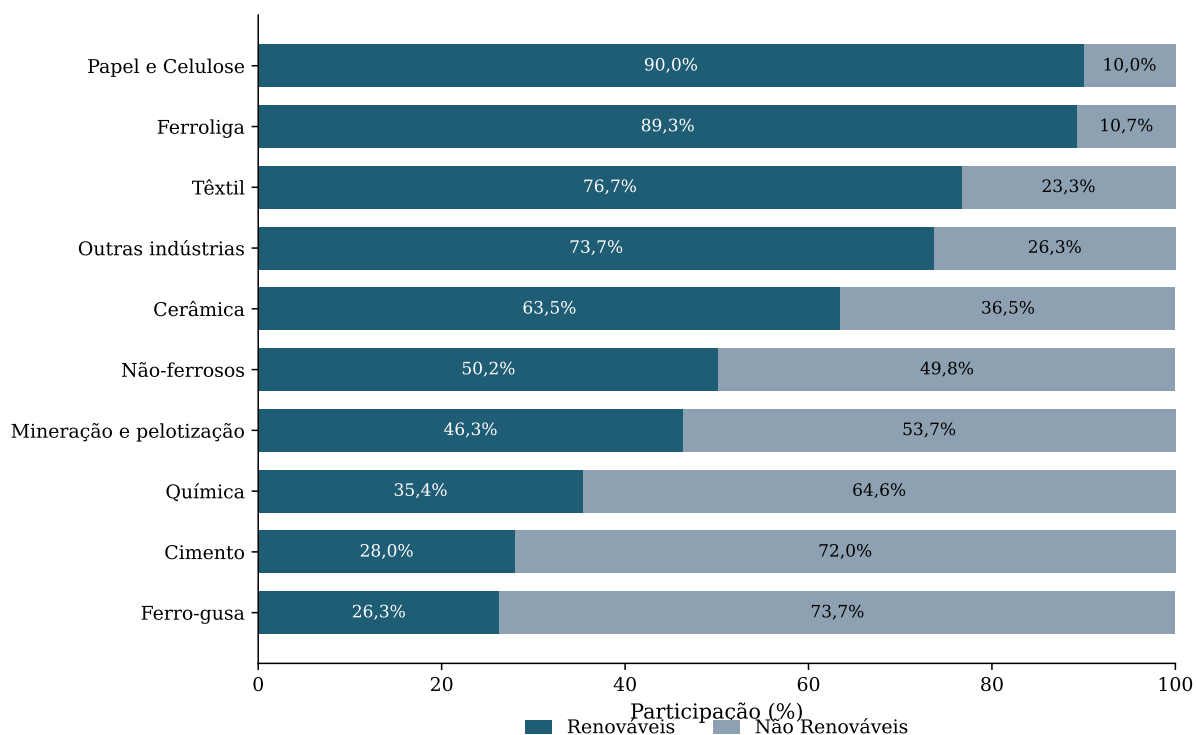


Figura 1: Consumo energético dos setores industriais brasileiros por fonte - 2024

Fonte: MME (2024)

Nota: (1) Renováveis incluem fontes associadas à eletricidade, solar e bioenergia. (2) Não Renováveis são fontes energéticas associadas ao gás natural, gás mineral e coque, derivados de petróleo e outras fontes.

A Figura 1 evidencia que há heterogeneidade estrutural entre as atividades industriais brasileiras no que se refere à composição de sua matriz energética. Setores como papel e celulose (90%) e ferroligas (89%) já operam com base majoritariamente renovável, o que lhes confere vantagem comparativa imediata em um contexto de crescente precificação de carbono, exigências de rastreabilidade e diferenciação ambiental nos mercados internacionais. Assim, pela ótica do consumo energético, esses segmentos encontram-se relativamente posicionados para atrair investimentos verdes e integrar cadeias produtivas com menor intensidade de emissões.

Em contraste, atividades como ferro-gusa (26%), cimento (28%) e química (35%) apresentam elevada dependência de fontes não renováveis, revelando gargalos estruturais relevantes para a transição produtiva. Nesses casos, a vantagem potencial não decorre da posição atual, mas da magnitude do espaço para descarbonização, o que aponta para áreas críticas de intervenção pública. A atuação coordenada de políticas energéticas, industriais e tecnológicas torna-se, portanto, condição necessária para converter vulnerabilidade energética em oportunidade estratégica no

âmbito do *powershoring*.

Lamby (2024), ao analisar o caso de Hermosillo, no México, demonstra como elevado potencial solar pode funcionar como fator locacional decisivo para a atração de atividades industriais intensivas em energia. O argumento central é que a disponibilidade de energia limpa e competitiva redefine critérios de localização industrial, deslocando a geografia produtiva em favor de regiões capazes de oferecer vantagens energéticas sustentáveis. O conceito de *powershoring* explicita, assim, o papel estratégico da transição energética na reorganização da geografia industrial global.

A centralidade dessa agenda reside na possibilidade de adensar cadeias produtivas a partir da vantagem comparativa da energia limpa, articulando setores já relativamente descarbonizados com aqueles em processo de transição. Trata-se da combinação entre dotação energética favorável e políticas industriais direcionadas, capaz de permitir que países do Sul Global não apenas atraiam a realocação de segmentos produtivos, mas também ampliem sua inserção tecnológica e produtiva nas cadeias globais de valor.

Nesse sentido, destacam-se também as intersecções entre as oportunidades apresentadas pelo *powershoring* e o conceito de big push ambiental, definido como um conjunto de investimentos capazes de gerar um ciclo virtuoso de crescimento econômico, criação de empregos, fortalecimento de cadeias produtivas e redução simultânea da pegada e dos impactos ambientais, acompanhado da recuperação da capacidade produtiva do capital natural (Gramkow, 2019). O big push enfatiza a articulação e coordenação de políticas públicas para alavancar investimentos nacionais e estrangeiros voltados ao desenvolvimento sustentável da economia brasileira. Em ambas as abordagens, o investimento é o motor da transformação produtiva verde.

Considerando a centralidade dos investimentos para a transformação produtiva e a relevância da capacidade de atração de capital externo, destaca-se a edição mais recente do *World Investment Report* (2025), que apresenta evidências importantes para o caso brasileiro. Apesar da retração de 8% nos fluxos de investimento estrangeiro direto (IED) recebidos entre 2023 e 2024, o Brasil manteve-se como o principal destino de IED na América Latina e no Caribe, alcançando US\$ 59 bilhões, com forte concentração em projetos associados à energia renovável (UNCTAD, 2025). O relatório indica, ainda, que o país atraiu US\$ 26 bilhões em financiamentos destinados a projetos nos setores de hidrogênio, biomassa e energia solar.

No âmbito regional, os anúncios de projetos *greenfield* registraram crescimento tanto em valor quanto em volume. Na América do Sul, o montante anunciado aumentou 17%, totalizando US\$ 113 bilhões, movimento impulsionado sobretudo pelo Brasil, cujo crescimento atingiu 33%, alcançando US\$ 50 bilhões. Esses números sugerem que o país ocupa posição relevante no atual ciclo de investimentos associados à transição energética.

Entretanto, a mera captação de recursos não assegura, por si, transformação estrutural. O desafio reside em direcionar estrategicamente esses fluxos de investimento, de modo a fortalecer capacidades produtivas e tecnológicas nacionais. Isso implica alinhar recursos internacionais e domésticos — incluindo instrumentos financeiros do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) — a uma estratégia consistente de desenvolvimento produtivo verde. Não se trata apenas de expandir o financiamento a projetos de geração solar e eólica, mas de articular investimentos voltados à modernização do *grid* elétrico, ao desenvolvimento de soluções de armazenamento, à consolidação de manufaturas verdes e à construção de infraestrutura industrial de baixo carbono. Tais frentes são decisivas para estruturar uma transição produtiva sustentável e de longo prazo.

Assim, embora o Brasil disponha de vantagens naturais significativas — como matriz energética majoritariamente renovável e abundância de biomassa — sua inserção na fronteira tecnológica verde permanece limitada e concentrada em poucos domínios, notadamente biocombustíveis e controle da poluição. A oportunidade estratégica consiste em converter vantagens estáticas em

capacidades dinâmicas, articulando recursos naturais, investimento e política industrial para adensar cadeias produtivas e integrar trajetórias tecnológicas verdes. Trata-se não apenas de participar de rotas globais já estabelecidas, mas de desenvolver rotas próprias a partir de soluções locais, consolidando uma inserção externa ativa e tecnologicamente qualificada na economia verde global.

3.2 Quadro das políticas públicas vigentes

A literatura recente sobre política industrial, anteriormente discutida, atribui ao Estado o papel de agente coordenador e estruturante da transformação produtiva, responsável por conferir direcionalidade às transições tecnológicas e alinhar instrumentos econômicos a objetivos sociais e ambientais. Autores como Chang e Andreoni (2019) e Mazzucato e Rodrik (2024) ressaltam que a efetividade da política industrial contemporânea depende menos do volume isolado de instrumentos mobilizados e mais da capacidade estatal de coordenar políticas, estruturar condicionalidades e induzir comportamentos privados compatíveis com metas públicas.

A síntese apresentada na Figura 2 — construída a partir de uma análise não exaustiva das políticas implementadas no período de 2022 a 2025 — indica que o Brasil avançou significativamente na consolidação de um arcabouço normativo e programático alinhado à agenda de desenvolvimento produtivo verde, articulando instrumentos industriais, energéticos e climáticos. Entretanto, a coexistência de múltiplas estratégias, planos e programas revela desafios estruturais de operacionalização que são constitutivos da economia política da política industrial.

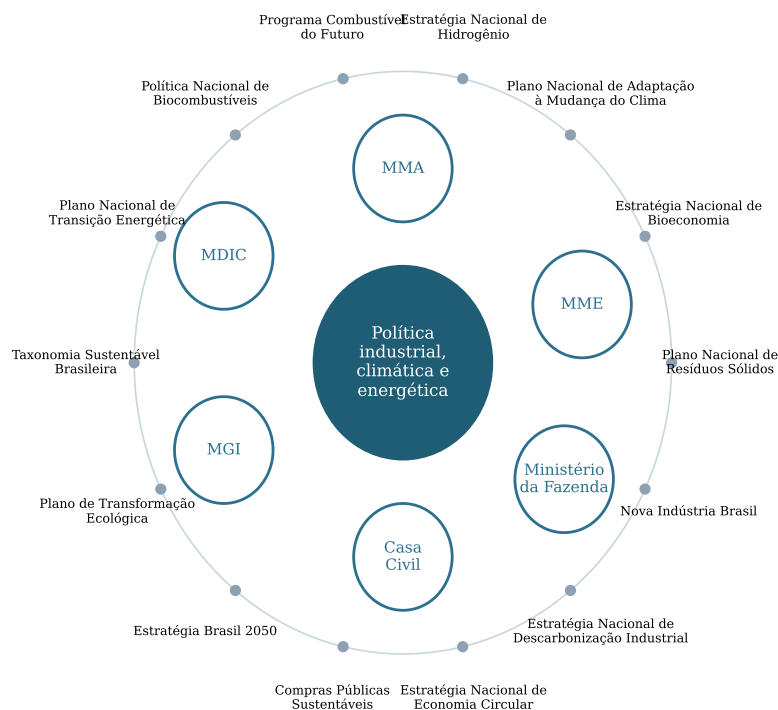


Figura 2: Políticas públicas em vigor para indústria, energia e clima

Fonte: Elaborado pela autora.

Em primeiro lugar, as restrições fiscais impõem a necessidade de focalização e priorização, tornando inviável uma atuação simultânea e abrangente sobre todos os setores e rotas tecnológicas.

Esse contexto reforça a centralidade de mecanismos de seleção estratégica e de coordenação intertemporal dos investimentos públicos. Em segundo lugar, a implementação efetiva de condicionalidades — elemento central nas abordagens contemporâneas de política industrial — requer capacidades estatais específicas, tais como monitoramento, avaliação e *enforcement*. A ausência ou fragilidade desses mecanismos reduz a capacidade do Estado de vincular subsídios, crédito ou compras públicas a metas verificáveis de desempenho produtivo, tecnológico ou ambiental, comprometendo a efetividade dos instrumentos disponíveis.

Adicionalmente, a fragmentação institucional observada entre políticas industriais, energéticas, climáticas e de inovação evidencia dificuldades de coordenação interministerial e riscos de sobreposição de instrumentos. A inexistência de arranjos consolidados de governança transversal dificulta a articulação sinérgica entre políticas de oferta e demanda, bem como o alinhamento entre incentivos financeiros, regulação e estratégias tecnológicas de longo prazo.

No plano operacional, a evidência internacional sugere que a adaptação industrial à competição verde é um processo inerentemente gradual, dependente de investimentos, aprendizado e transformação produtiva acumulativa. Em contraste, a implementação de normas, regulamentos e mecanismos de formação de mercados para bens e serviços verdes tende a ocorrer de forma relativamente mais célere. Essa assimetria temporal torna o *timing* da preparação do setor produtivo um elemento decisivo para a captura das janelas de oportunidade associadas à transição verde. Enfrentar esse descompasso exige o fortalecimento da governança e maior integração entre as políticas industriais, energéticas, climáticas e de inovação, conforme sintetizado na Figura 2. Ademais, devem ser reconhecidas as limitações institucionais e restrições operacionais anteriormente discutidas, que condicionam a efetividade da estratégia nacional de desenvolvimento produtivo verde.

4 Metodologia

Nesta seção, descrevem-se as etapas metodológicas empregadas na formação dos agrupamentos setoriais da indústria de transformação brasileira, com base em técnicas de análise multivariada e clusterização híbrida. Inicialmente, apresenta-se um breve *framework* analítico para o desenvolvimento produtivo verde, a fim de embasar a descrição das etapas da clusterização, justificando a escolha do cluster como método de análise do trabalho — utilizado como instrumento exploratório de identificação de padrões estruturais, não como método inferencial ou preditivo. Em seguida, são detalhadas as variáveis e dimensões analíticas consideradas, bem como suas fontes de informação e critérios de padronização que asseguram a comparabilidade entre indicadores oriundos de bases distintas.

4.1 Um *framework* analítico para o desenvolvimento produtivo verde

Em conjunto, a literatura apresentada converge para a compreensão da transição verde como um processo de transformação estrutural que exige coordenação produtiva, institucional e tecnológica. Entretanto, apesar do avanço conceitual, permanece limitada a operacionalização empírica dessas dimensões em diagnósticos setoriais capazes de informar políticas diferenciadas. Nesse espaço analítico, insere-se a tipologia proposta no presente artigo.

Por conseguinte, a análise organiza-se em três dimensões centrais: desenvolvimento produtivo verde, transição justa e competitividade internacional. Essas dimensões são operacionalizadas por meio de variáveis observáveis que capturam aspectos estruturais da indústria de transformação, mesmo em nível agregado. A dimensão de industrialização mais limpa é representada por indicadores de consumo energético e de esforços em eficiência energética; a dimensão de transição

justa é capturada pela qualificação da força de trabalho; e a dimensão de competitividade internacional é medida pela participação dos setores nas exportações mundiais. O valor bruto da produção industrial é incorporado como indicador do peso econômico relativo dos setores na estrutura produtiva, permitindo contextualizar essas dimensões no conjunto da indústria de transformação.

A combinação dessas dimensões permite explorar *trade-offs* estruturais fundamentais da agenda de desenvolvimento produtivo verde. À luz desse *framework*, este artigo operacionaliza a análise por meio da clusterização dessas dimensões. Ao examinar conjuntamente a relação entre intensidade energética, qualificação da força de trabalho e inserção internacional nos diferentes setores industriais, a abordagem adotada contribui para apontar os limites de leituras excessivamente normativas da agenda climática, bem como de fragmentações institucionais na formulação e implementação de políticas industriais, energéticas, climáticas e de inovação.

Ao tratar essas relações de forma integrada, a clusterização permite revelar padrões estruturais não lineares e heterogeneidades relevantes entre setores, fornecendo uma base analítica para a identificação de desafios e oportunidades da política industrial no contexto da transição verde.

4.2 Aplicação do *cluster* como método de análise

As etapas operacionais da análise de clusterização, de caráter mais procedimental, são apresentadas de forma detalhada no Apêndice. Essas etapas incluem: os testes de verificação da existência de estrutura de agrupamento nos dados (estatística de Hopkins); os critérios estatísticos adotados para a definição do número de clusters — evitando escolhas arbitrárias pelo pesquisador —; o algoritmo de clusterização utilizado, que combina abordagens hierárquicas e não hierárquicas; bem como os testes de robustez realizados.

A análise de cluster é particularmente adequada quando o objetivo é identificar grupos de observações internamente homogêneos e externamente heterogêneos. No contexto deste trabalho, a homogeneidade interna refere-se ao agrupamento de unidades setoriais da indústria de transformação que apresentam comportamentos semelhantes em relação às variáveis consideradas na análise. Por sua vez, a heterogeneidade entre os clusters decorre da identificação de padrões setoriais distintos, caracterizados pela combinação da intensidade energética, valor bruto da produção industrial, qualificação da força de trabalho e exposição internacional, capturadas como similares dentro dos grupos e distintas entre eles.

Vale ressaltar que, por se tratar de uma técnica exploratória e não supervisionada, a análise de cluster não possui caráter preditivo para observações fora da amostra. Seu propósito é revelar padrões estruturais latentes no conjunto de dados analisado, em linha com o objetivo do artigo: examinar *trade-offs* estruturais entre energia, qualificação e inserção externa, em vez de estimar relações causais ou realizar exercícios de previsão.

4.3 Descrição das dimensões e das variáveis da clusterização

As variáveis utilizadas na análise, bem como suas respectivas fontes de dados, finalidades analíticas e as dimensões às quais se vinculam — industrialização mais limpa, transição justa e competitividade internacional — encontram-se sistematizadas no Quadro 1. Os dados contemplam exclusivamente os setores da indústria de transformação, correspondentes às divisões CNAE 10 a 33. O setor 33 (“Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos”) foi excluído da amostra por não apresentar inserção comercial externa, o que inviabiliza a mensuração da dimensão de competitividade internacional.

Quadro 1: Variáveis de estudo e fontes de dados, por setores agregados, segundo a CNAE 2.0

Dimensão	Variável	Fonte	Objetivo
Industrialização mais limpa	Percentual de empresas que realizam dispêndio em práticas ambientais de eficiência energética no total de empresas que responderam essa pergunta	PINTEC – módulo temático	Identificar os segmentos com maior potencial para impulsionar o desenvolvimento produtivo verde
	Participação do valor bruto da produção (VBP) setorial no VBP da indústria de transformação	PIA Empresa (IBGE)	Dimensionar o peso econômico de cada setor na estrutura produtiva industrial
Transição justa	Percentual de pessoas empregadas com ensino superior, mestrado e doutorado nos empregos totais por setor	RAIS	Identificar os segmentos com maior capacidade de geração de empregos qualificados
Competitividade internacional	Participação das exportações do setor nas exportações mundiais	OCDE – dados bilaterais de comércio	Mapear os segmentos com maior potencial de inserção externa
	Percentual do consumo energético do setor industrial acumulado de jan.–dez. no total da indústria de transformação	EPE	Avaliar o consumo energético dos setores industriais

Fonte: Elaborado pela autora.

A escolha do ano-base de 2023 decorre de restrições de disponibilidade de dados. Em particular, a variável “dispêndio em práticas ambientais de eficiência energética” é proveniente de um módulo temático específico da PINTEC/IBGE, com informações disponíveis apenas para esse ano. A adoção de 2023 assegura, portanto, consistência temporal entre as variáveis utilizadas. Reaplicações da metodologia para outros anos recentes são possíveis, desde que essa variável seja excluída ou substituída por indicadores equivalentes. Considerando que a formação de clusters é sensível ao conjunto de variáveis selecionadas, eventuais alterações podem modificar a composição dos grupos, sem que isso gere alterações substantivas na interpretação.

No que se refere ao tratamento de dados faltantes (*missing values*), a amostra foi construída de modo a preservar apenas setores para os quais havia informação disponível e consistente para todas as variáveis consideradas, evitando a necessidade de imputações artificiais. Essa opção privilegia a transparência metodológica e a robustez da análise exploratória.

Para mitigar possíveis vieses decorrentes da heterogeneidade das bases de dados — algumas de natureza censitária e outras amostrais —, todas as variáveis foram padronizadas em torno de média zero e desvio-padrão igual a um. Essa padronização assegura a comparabilidade entre indicadores de diferentes escalas e unidades de medida, preservando a variabilidade relativa entre os setores industriais. Consequentemente, evita-se que variáveis com maior magnitude exerçam peso desproporcional na formação dos clusters.

A definição da unidade de análise constitui outra escolha metodológica relevante e envolve trade-offs importantes. Neste trabalho, a análise é conduzida no nível setorial agregado, implicando, por um lado, a perda de heterogeneidade intra-setorial existente entre firmas ou produtos. Dados mais granulares — como informações no nível da firma (CNPJ) ou do produto (HS ou NCM) — seriam, em princípio, mais adequados para capturar diferenças estruturais finas associadas a tecnologias específicas, estratégias empresariais e padrões de inserção internacional. No entanto, a utilização de dados mais desagregados enfrenta limitações empíricas para a interoperabilidade entre bases de dados. Não há, por exemplo, uma base pública que permita integrar, de forma consistente, informações sobre consumo energético por empresa com dados de valor bruto da produção industrial, exportações e qualificação da força de trabalho. Essa limitação restringe análises intrassetoriais mais detalhadas e afeta a possibilidade de desenho de instrumentos de política pública baseado em evidência microeconômica.

Apesar dessas restrições, a abordagem setorial adotada mostra-se particularmente adequada para a análise de políticas públicas em nível nacional. A leitura permite identificar padrões estruturais e grupos de setores com dinâmicas semelhantes em termos de intensidade energética, qualificação da força de trabalho e inserção externa, contribuindo para a organização do espaço decisório e para a coordenação interministerial. Ademais, a estrutura institucional da política industrial brasileira é predominantemente organizada em torno de setores, incidindo na atuação de associações setoriais e de instâncias de governança especializadas. Nesse sentido, ainda que apresente limitações para capturar heterogeneidade intrassetorial, a análise setorial constitui uma lente analítica consistente com o desenho e a implementação das políticas industriais.

5 Resultados e Discussão

5.1 Escolha do número de clusters

A aplicação da estatística de Hopkins à amostra produziu um valor de 0,32, inferior a 0,5, sugerindo a presença de estrutura de agrupamento nos dados, em contraste com uma distribuição aleatória. A determinação do número ótimo de clusters constitui etapa metodologicamente sensível, pois influencia diretamente a consistência estrutural da partição e a robustez interpretativa dos resultados. Conforme reportado na Tabela 2, no caso em análise, a própria configuração dos setores industriais impõe restrições à segmentação puramente estatística, dado o caráter difuso e interdependente das atividades produtivas.

Assim, a definição do número de grupos buscou conciliar critérios quantitativos e pertinência substantiva, combinando as métricas de Silhouette e Dunn com a inspeção das distâncias no dendrograma e a identificação de possíveis outliers. Nos testes realizados, o modelo com $k = 6$ apresentou *Silhouette* médio de 0,38 e índice de Dunn de 0,35, sem ocorrência de observações com $S_i < 0$, o que indica elevada coerência interna e ausência de pontos mal alocados. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,794$ (79,4%) reforça a capacidade explicativa da solução, combinando adequada separação geométrica entre grupos e consistência estatística.

Para $k = 7$, observa-se queda tanto no índice de Dunn quanto no *Silhouette* médio, sugerindo que partições adicionais não produzem ganhos efetivos de separação. Assim, a solução com seis *clusters* foi mantida como a mais adequada, por apresentar maior robustez no equilíbrio entre coesão interna e separação intergrupos, evitando fragmentações artificiais e assegurando consistência econômica e estatística na caracterização dos perfis setoriais (Tabela 2).

Tabela 2: Escolha do número de *clusters* com base nas estatísticas de ajuste

C_i	Híbrido
3	Tamanho: $n_1 = 2, n_2 = 16, n_3 = 5$. $R^2 = 50,3\%$. $\bar{S}_{(k=1)} = 0,04, \bar{S}_{(k=2)} = 0,41, \bar{S}_{(k=3)} = 0,21, \bar{S}_{m\u00e1dio} = 0,33$; há 2 observações com $\bar{S}_i < 0$. Dunn = 0,23.
4	Tamanho: $n_1 = 2, n_2 = 14, n_3 = 2, n_4 = 5$. $R^2 = 61,9\%$. $\bar{S}_{(k=1)} = -0,02, \bar{S}_{(k=2)} = 0,47, \bar{S}_{(k=3)} = 0,62, \bar{S}_{(k=4)} = 0,19, \bar{S}_{m\u00e1dio} = 0,38$; há 2 observações com $\bar{S}_i < 0$. Dunn = 0,135.
5	Tamanho: $n_1 = 1, n_2 = 14, n_3 = 2, n_4 = 5, n_5 = 1$. $R^2 = 71,1\%$. $\bar{S}_{(k=1)} = 0, \bar{S}_{(k=2)} = 0,47, \bar{S}_{(k=3)} = 0,62, \bar{S}_{(k=4)} = 0,17, \bar{S}_{(k=5)} = 0, \bar{S}_{m\u00e1dio} = 0,38$; há 1 observação com $\bar{S}_i < 0$. Dunn = 0,26.
6	Tamanho: $n_1 = 1, n_2 = 14, n_3 = 2, n_4 = 4, n_5 = 1, n_6 = 1$. $R^2 = 79,4\%$. $\bar{S}_{(k=1)} = 0, \bar{S}_{(k=2)} = 0,43, \bar{S}_{(k=3)} = 0,62, \bar{S}_{(k=4)} = 0,34, \bar{S}_{(k=5)} = 0, \bar{S}_{(k=6)} = 0, \bar{S}_{m\u00e1dio} = 0,38$; não há observações com $\bar{S}_i < 0$. Dunn = 0,35.
7	Tamanho: $n_1 = 1, n_2 = 4, n_3 = 2, n_4 = 10, n_5 = 4, n_6 = 1, n_7 = 1$. $R^2 = 84,3\%$. $\bar{S}_{(k=1)} = 0, \bar{S}_{(k=2)} = 0,33, \bar{S}_{(k=3)} = 0,61, \bar{S}_{(k=4)} = 0,25, \bar{S}_{(k=5)} = 0,30, \bar{S}_{(k=6)} = 0, \bar{S}_{(k=7)} = 0, \bar{S}_{m\u00e1dio} = 0,27$; não há observações com $\bar{S}_i < 0$. Dunn = 0,28.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 3 organiza os clusters industriais em uma representação que evidencia três vetores fundamentais ao desenvolvimento produtivo verde com transição energética justa: o consumo energético proporcional à indústria de transformação, a participação nas exportações globais e a qualidade dos empregos em relação ao total de postos de trabalho. A partir dessa disposição, torna-se possível interpretar o posicionamento relativo dos setores segundo intensidade energética, inserção externa e padrão ocupacional.

A leitura dos quadrantes permite identificar padrões distintos de especialização e desafios para a política industrial verde. Há setores com participação nas exportações globais acima da média geral e consumo energético elevado, como metalurgia (CNAE 24), produtos químicos (CNAE 20) e celulose, papel e produtos de papel (CNAE 17). Esses ramos já se encontram internacionalizados e, justamente por apresentarem alto consumo energético — proporcional à sua importância do consumo energético da indústria de transformação —, têm potencial para tornarem-se vetores de atração de investimento voltado ao esverdeamento de cadeias produtivas. São segmentos estratégicos para a descarbonização industrial e para o fortalecimento da competitividade verde brasileira.

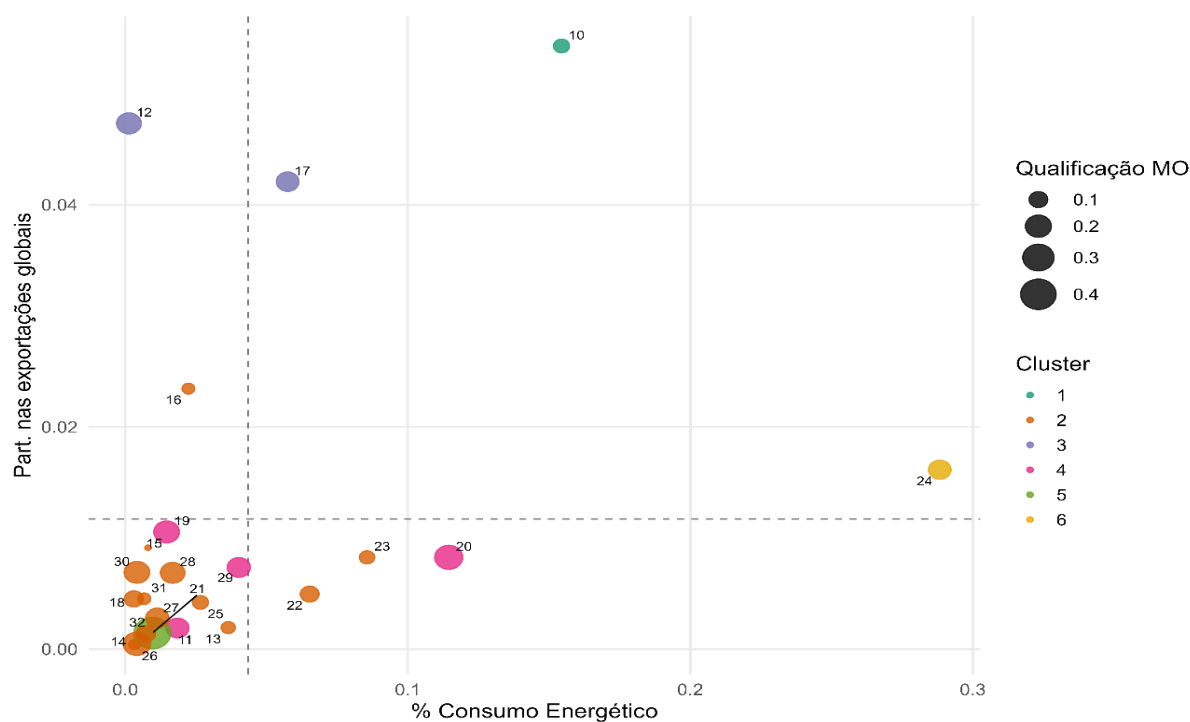


Figura 3: Matriz de competitividade verde

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: alimentos (10); bebidas (11); fumo (12); têxteis (13); vestuário e acessórios (14); couros, artefatos e calçados (15); madeira (16); celulose, papel e produtos de papel (17); impressão e reprodução de gravações (18); coque, derivados do petróleo e biocombustíveis (19); produtos químicos (20); farmacêuticos (21); borracha e plástico (22); minerais não metálicos (23); metalurgia (24); produtos de metal (25); informática, eletrônicos e ópticos (26); materiais elétricos (27); máquinas e equipamentos (28); veículos automotores, reboques e carrocerias (29); outros equipamentos de transporte (30); móveis (31); produtos diversos (32); e manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos (33).

Outros setores, como fabricação de produtos do fumo (CNAE 12) e fabricação de produtos de madeira (CNAE 16), não são grandes consumidores energéticos, mas apresentam presença internacional relevante. Assim, podem intensificar sua inserção externa por meio da adaptação

de processos e produtos a padrões ambientais internacionais, redirecionando-se para cadeias produtivas verdes. Como exemplos, incluem-se a produção de materiais de base biológica, embalagens sustentáveis e produtos certificados, que podem ampliar sua competitividade em mercados sensíveis à pegada ambiental. A agenda verde, para esses casos, parece estar mais relacionada à inovação de produto para manutenção da sua competitividade externa.

Observa-se, ainda, setores com maior consumo energético, mas baixa presença externa, como borracha e plástico (CNAE 22), produtos de minerais não metálicos (CNAE 23) e químicos (CNAE 20). Esses segmentos são fornecedores centrais de insumos para diversas cadeias da economia e, portanto, centrais para a constituição de cadeias produtivas verdes. Investimentos em eficiência energética, circularidade, substituição de matérias-primas e aproveitamento de soluções locais podem gerar ganhos de produtividade para a descarbonização de todas as cadeias produtivas downstream nesses setores.

Por fim, a maioria dos setores apresenta baixo consumo energético e baixa inserção internacional. Nesse grupo, há segmentos com elevada capacidade de geração de empregos qualificados, funcionando como alavancas para transições justas. É o caso da fabricação de produtos farmacêuticos e farmoquímicos (CNAE 21), cuja produção está fortemente associada ao mercado doméstico, tendo o SUS como vetor relevante. Ressalte-se, ainda, setores como equipamentos de informática e eletrônicos (CNAE 26), os quais geram empresas de elevada qualidade e demandam políticas em elos específicos da cadeia produtiva, considerando a concorrência global. O cuidado na análise desses setores torna-se crucial por representar desafios para além do verde, ligados à resiliência global das cadeias produtivas a fim de reduzir vulnerabilidades, como no caso da doença infecciosa causada pelo vírus SARS-CoV-2 – a covid-19.

Há segmentos que precisam ser reorientados, pois têm importância estratégica para o país, como o petróleo. Entretanto, terão que ser parte do processo de transição para economia verde, impulsionando investimentos estratégicos, como nas rotas em transição. Nesse mesmo grupo, há ainda segmentos de baixa qualificação e reduzida inserção externa, como têxteis (CNAE 13), vestuário (CNAE 14) e móveis (CNAE 31), os quais, embora não tenham expressividade na participação internacional, não sejam intensivos em energia e não atraiam investimentos verdes de grande porte, evidenciam relevância territorial. São setores intensivos em emprego, fundamentais para o desenvolvimento regional e para a transição justa, demandando políticas de reconversão produtiva e diversificação local voltadas à economia circular, à agregação de valor e à diversificação dos insumos. Por exemplo, mencione-se o setor têxtil, com mudanças da fibra sintética para fibras naturais da região amazônica, como o caruá.

5.2 Análise dos perfis setoriais e propostas de políticas públicas

A partir da leitura dos quadrantes de participação nas exportações globais e consumo energético, é possível compreender as posições relativas dos setores na matriz de competitividade verde. No entanto, essa análise bidimensional não captura toda a complexidade da indústria de transformação brasileira. Por isso, nesta etapa, retoma-se a abordagem multivariada dos *clusters*, a qual sintetiza simultaneamente as dimensões de industrialização mais limpa, transição justa e competitividade internacional, permitindo caracterizar perfis setoriais mais robustos. Para a interpretação econômica do perfil dos *clusters*, três dimensões são utilizadas: *trade-off* dominante, restrição estrutural principal e risco de trajetória..

Na Tabela 3, são apresentados seis perfis setoriais, que refletem combinações distintas entre peso econômico (VBP setorial), grau de inserção internacional, dispêndio em eficiência energética, consumo energético e nível de qualificação da força de trabalho, configurando tipos diferenciados de desafios para a política de desenvolvimento produtivo verde.

Tabela 3: Composição dos perfis setoriais da indústria de transformação – 2023

CNAE	Indústria de Transformação	Dispêndio % Exp.	% VBP	% Emp. qualif.	% Cons. energ.	Perfil
10	Fabricação de produtos alimentícios	0.778	0.243	0.075	0.154	1
13	Fabricação de produtos têxteis	0.690	0.013	0.061	0.036	2
14	Confeção de artigos do vestuário e acessórios	0.659	0.010	0.047	0.003	2
15	Couro	0.701	0.010	0.035	0.008	2
16	Fabricação de produtos de madeira	0.456	0.008	0.052	0.022	2
18	Impressão e reprodução de gravações	0.712	0.003	0.104	0.003	2
22	Fabricação de artigos de borracha e plástico	0.558	0.034	0.100	0.065	2
23	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	0.707	0.028	0.070	0.086	2
25	Fabricação de produtos de metal	0.723	0.026	0.075	0.027	2
26	Fabricação de equipamento de informática, produtos eletrônicos e ópticos	0.532	0.026	0.224	0.004	2
27	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	0.722	0.029	0.155	0.011	2
28	Fabricação de máquinas e equipamentos	0.651	0.051	0.174	0.017	2
30	Fabricação de outros equipamentos de transporte	0.604	0.014	0.191	0.004	2
31	Fabricação de móveis	0.622	0.008	0.056	0.007	2
32	Fabricação de produtos diversos	0.603	0.007	0.105	0.007	2
12	Fabricação de produtos do fumo	0.690	0.005	0.178	0.001	3
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	0.716	0.033	0.149	0.057	3
11	Fabricação de bebidas	0.838	0.027	0.155	0.018	4
19	Fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis	0.807	0.124	0.192	0.015	4
20	Fabricação de produtos químicos	0.855	0.107	0.237	0.114	4
29	Fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias	0.937	0.092	0.156	0.040	4
21	Fabricação de produtos farmacêuticos e farmacêuticos	0.736	0.018	0.436	0.010	5
24	Metalurgia	0.835	0.076	0.146	0.288	6

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Percentual de empresas que realizaram dispêndios com eficiência energética em relação ao total de empresas, em cada setor, que responderam sim e não a esta pergunta na pesquisa.

Em razão dessas singularidades, a recomendação de políticas considerou uma análise qualitativa dos setores que compõem cada agrupamento, explorando menos resultados médios. O objetivo foi traduzir resultados empíricos em propostas orientativas — ainda que não exaustivas — de políticas de desenvolvimento produtivo verde. Para apresentar uma síntese de tais resultados, inclui-se um gráfico no Apêndice. Isto posto, é importante ressaltar que há perfis *outliers*, formados por um único setor. Estes apresentam características muito específicas, o que justifica sua posição isolada.

O Perfil 1, representado apenas pela fabricação de produtos alimentícios, apresenta como *trade-off* dominante a combinação entre escala produtiva elevada e esforço em eficiência energética, com menor intensidade de qualificação da força de trabalho relativa a setores intensivos em conhecimento. A principal restrição estrutural desse perfil não está na competitividade ou na inserção externa, mas na limitada diversificação tecnológica ao longo da cadeia, ainda fortemente ancorada em *commodities* agroindustriais. O risco de trajetória reside em um *lock-in* produtivo baseado em vantagens naturais, que pode restringir o avanço para segmentos de maior valor agregado, se não houver políticas direcionadas à diversificação, bioeconomia e agregação tecnológica. A política pública pode apoiar o desenvolvimento do setor com ações para fortalecer a eficiência energética e a certificação ambiental das cadeias de suprimento.

O Perfil 2, que reúne as manufaturas tradicionais e diversificadas (têxteis, madeira, plásticos, metais leves, móveis), é marcado por um *trade-off* estrutural entre elevada capacidade de geração de emprego qualificado (estimulado principalmente pelos setores de informática, materiais elétricos, máquinas e equipamentos de transportes) e baixa eficiência energética e inserção internacional. O risco de trajetória é duplo: por um lado, a perda progressiva de competitividade frente a importações; por outro, a exclusão desses setores das novas cadeias verdes caso a reconversão produtiva não ocorra em tempo hábil. As políticas industriais, nesse grupo, devem priorizar a reconversão produtiva com condicionalidades ambientais, combinando incentivos fiscais e financeiros à redução de emissões e programas de difusão tecnológica.

O Perfil 3, formado pelos setores de fumo e de celulose, papel e produtos de papel, tem o *trade-off* decorrente da forte competitividade externa baseada em cadeias produtivas específicas e intensivas em recursos naturais, associada às limitações para a diversificação produtiva. A principal restrição estrutural reside na elevada dependência de mercados, insumos e arranjos produtivos concentrados, o que reduz a flexibilidade de adaptação a mudanças regulatórias e tecnológicas correlacionadas à transição verde. O risco de trajetória está na consolidação de especializações produtivas pouco diversificadas, que podem restringir ganhos de valor agregado e ampliar vulnerabilidades territoriais caso não sejam acompanhadas por políticas de diversificação produtiva e reconversão regional. A política industrial verde pode ser guiada pela promoção de integração com cadeias de base florestal certificada, adoção de tecnologias de baixo carbono, incentivos à bioeconomia florestal e fomento à substituição de insumos de origem fóssil.

O Perfil 4 reúne as indústrias de bebidas, produtos derivados do petróleo e biocombustíveis, produtos químicos e veículos automotores, apresentando como *trade-off* dominante a coexistência entre elevada escala produtiva e alto consumo energético, combinada com forte capacidade organizacional e institucional. A principal restrição estrutural não é tecnológica em sentido estrito, mas econômica: o elevado custo de transição para rotas de baixo carbono, que pode comprometer competitividade no curto e médio prazo. O risco de trajetória reside em um *lock-in* tecnológico em ativos intensivos em carbono, caso a transição seja postergada, ou em perda de competitividade internacional caso a transição ocorra sem instrumentos de mitigação de custos e compartilhamento de riscos. Esses segmentos devem ser o foco de instrumentos de política baseados na demanda por inovação verde e em compras públicas sustentáveis.

O Perfil 5, composto pela indústria farmoquímica e farmacêutica (CNAE 21), é caracterizado por um *trade-off* entre elevada qualificação da força de trabalho e baixo peso econômico e

produtivo relativo. A principal restrição estrutural reside na dependência de insumos importados, especialmente princípios ativos farmacêuticos. O risco de trajetória está na manutenção de uma inserção periférica nas cadeias globais de valor, se não houver políticas que promovam escala, integração produtiva e internalização de elos estratégicos. As políticas devem expandir parcerias público-privadas em P&D, certificação de cadeias biofarmacêuticas e integração com políticas territoriais de biodiversidade e bioindústria.

O Perfil 6, representado pela metalurgia (CNAE 24), evidencia um *trade-off* crítico entre elevada intensidade energética e relevância econômica, combinado a baixos níveis de qualificação da força de trabalho. A principal restrição estrutural é o elevado custo de adoção de tecnologias de baixo carbono, associado à exposição crescente a instrumentos de ajuste de carbono e disputas comerciais. O risco de trajetória é particularmente elevado: sem políticas industriais ativas, o setor pode enfrentar perda de mercados externos, desinvestimento produtivo e desindustrialização, aprofundando a dependência tecnológica e comercial. Nesse contexto, destacam-se compras públicas sustentáveis, contratos de diferença de carbono (*CCfDs*) e *hubs* industriais de descarbonização.

6 Considerações Finais

Este artigo teve como objetivo conectar a estrutura produtiva da indústria de transformação brasileira às estratégias necessárias para a transição energética e o desenvolvimento produtivo verde. A principal contribuição do trabalho reside na construção de uma tipologia setorial que articula, de forma integrada, dimensões de intensidade energética, qualificação da força de trabalho, inserção internacional e peso econômico relativo dos setores, além de permitir identificar perfis industriais com desafios e oportunidades distintos no contexto da transição verde. Ao fazê-lo, o artigo avança além de classificações descritivas tradicionais, oferecendo um instrumento analítico capaz de revelar *trade-offs* estruturais e heterogeneidades relevantes para a formulação de políticas industriais diferenciadas.

Além disso, a tipologia proposta permite situar a indústria brasileira frente a janelas contemporâneas de oportunidade associadas à transição verde, ainda que essas não sejam mensuradas diretamente no exercício empírico. Perfis caracterizados por maior qualificação da força de trabalho e inserção internacional tendem a apresentar melhores condições para absorção e difusão tecnológica, inclusive em atividades intensivas em conhecimento e inovação, como aquelas capturadas por indicadores de patentes. Da mesma forma, a intensidade energética combinada à elevada participação de fontes renováveis na matriz brasileira confere vantagens potenciais para a atração de investimentos produtivos e para estratégias de *powershoring*, em um contexto de reconfiguração geopolítica das cadeias globais de valor. Nesse sentido, a tipologia oferece uma lente analítica para identificar onde essas janelas de oportunidade são mais prováveis, ainda que sua exploração efetiva dependa de políticas complementares de inovação, financiamento e coordenação institucional.

Os resultados reforçam que a agenda energética constitui condição necessária, mas não suficiente, para o desenvolvimento produtivo verde. A transição produtiva de longo prazo exige articular competitividade energética com estratégias de inovação, diversificação produtiva e inclusão social. Nesse sentido, o desenvolvimento produtivo verde ultrapassa a dimensão estrita da descarbonização, implicando a reconfiguração da estrutura industrial em torno de novos setores, produtos e conhecimentos capazes de combinar sustentabilidade ambiental, sofisticação tecnológica e geração de emprego qualificado. Para o caso brasileiro, a tipologia evidencia ainda o papel estratégico de cadeias não ergo-intensivas — como aquelas associadas à sociobiodiversidade, à bioeconomia e

à agroindústria de base local — como pilares de uma transição justa e territorialmente enraizada.

Em consonância com Anzolin e Lebdioui (2020), os resultados indicam que não há transição verde sem industrialização, e que o reposicionamento das cadeias produtivas depende da capacidade do Estado de coordenar políticas, instrumentos e atores. Ao retomar as contribuições de Chang e Andreoni (2019), o artigo destaca que a efetividade da política industrial verde está menos associada à existência isolada de instrumentos e mais à sua coerência sistêmica, integrando fomento, inovação, regulação e mercado em um mesmo processo de aprendizado produtivo — precisamente a principal lacuna identificada no arcabouço de políticas atualmente em vigor no Brasil.

Como agenda de pesquisa futura, propõe-se: i) incorporar microdados no nível da firma, pois permitiria capturar heterogeneidades intrassetoriais relevantes, ampliando a capacidade de desenhar políticas públicas mais focalizadas; ii) explorar uma dimensão temporal, que possibilitaria analisar a dinâmica da transição verde e testar a consistência temporal dos perfis analisados; iii) avançar na interoperabilidade entre bases de produção, energia, comércio exterior e mercado de trabalho para viabilizar análises mais granulares e apoiar a organização do ciclo completo de política pública, do diagnóstico à implementação e ao monitoramento; iv) comparar a tipologia brasileira com classificações setoriais internacionais baseadas em estruturas produtivas distintas, o que exigiria bases de dados harmonizadas entre países; e, v) analisar hubs industriais compostos por cadeias produtivas com firmas de diferentes portes.

Referências

- [1] AHUJA, Ketan; HAUSMANN, Ricardo. Industrial policy for competitiveness in the energy transition. In: GRABBE, Heather; TAGLIAPIETRA, Simone (org.). *Intersections: the global embedding of climate change in policy*. Brussels: Bruegel, 2025. (Bruegel Blueprint Series). Disponível em: <https://www.bruegel.org/book/green-intersections-global-embedding-climate-change-policy>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [2] AIGINGER, Karl; RODRIK, Dani. The rebirth of industrial policy and an agenda for the twenty-first century. *Journal of Industry, Competition and Trade*, v. 20, p. 189–207, 2020. DOI: 10.1007/s10842-019-00322-3.
- [3] ANZOLIN, G.; LEBDIOUI, A. *Three dimensions of green industrial policy*. Geneva: Graduate Institute of International and Development Studies, 2020.
- [4] BOGLIACINO, F.; PIANTA, M. Innovation and employment: a reinvestigation using revised Pavitt classes. *Research Policy*, v. 39, n. 6, p. 799–809, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.02.017>.
- [5] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Relação Anual de Informações Sociais – RAIS*. Brasília, DF: MTE, diversas edições. Disponível em: <http://bi.mte.gov.br/bgcaged/login.php>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [6] CASTELLACCI, F. Technological paradigms, regimes and trajectories: manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation. *Research Policy*, v. 37, n. 6–7, p. 978–994, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.03.011>.

- [7] E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. *E-Factsheet: Powershoring – Reindustrialization through clean energy abundance*. São Paulo: E+ – Energia & Clima, 2025. Disponível em: <https://maisenergia.org/wp-content/uploads/2025/05/EFactsheet-powershoring-en2025.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [8] EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEES, M.; STREINER, D. *Cluster analysis*. 5. ed. Chichester: Wiley, 2011.
- [9] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional – BEN*. Rio de Janeiro: EPE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-archive-bens>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [10] FÁVERO, L. P.; LIMA, P. A.; BELLO, L. H. *Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- [11] GRAMKOW, C. *Um big push ambiental: o investimento como motor do crescimento sustentável no Brasil*. Brasília: CEPAL, 2019. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/44553>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [12] HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. *Análise multivariada de dados*. 6. ed. São Paulo: ARTMED, 2009.
- [13] HOPKINS, B.; SKELLAM, J. G. A new method for determining the type of distribution of plant individuals. *Annals of Botany*, v. 18, n. 2, p. 213–227, 1954.
- [14] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa de Inovação – PINTEC*. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/pesquisa-de-inovacao>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [15] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Industrial Anual – Empresa (PIA Empresa)*. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/pesquisa-industrial-anual.html>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [16] KASSAMBARA, A. Practical guide to cluster analysis. In: *R: Unsupervised Machine Learning*. STHDA, 2017. Disponível em: <https://www.sthda.com/english/wiki/cluster-analysis>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [17] LAMBY, L. *Green growth opportunities for Hermosillo: “powershoring”*. Cambridge: Growth Lab, Harvard Kennedy School, 2024. (Growth Lab Working Paper Series, n. 243). Disponível em: <https://www.growthlab.cid.harvard.edu/publications/green-growth-opportunities-hermosillo-powershoring>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [18] MAZZUCATO, M.; RODRIK, D. *Shaping the economy of the future: the role of industrial policy and conditionalities*. Geneva: UNCTAD, 2024. Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/real-estate/publications/industrial-policy-conditionalities-taxonomy-sample-cases>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [19] OECD. *Bilateral Trade Database by Industry and End-Use Category (BTDIxE)*. Paris: OECD, [s.d.]. Disponível em: <https://data-explorer.oecd.org/>. Acesso em: 5 nov. 2025.

- [20] GALINDO-RUEDA, F.; VERGER, F. OECD taxonomy of economic activities based on R&D intensity. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, No. 2016/04, Paris: OECD Publishing, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/5j1v73sqqp8r-en>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- [21] PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, v. 13, n. 6, p. 343–373, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90018-0).
- [22] ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- [23] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). *World Investment Report 2025: International investment in the digital economy*. Geneva: United Nations, 2025. ISBN 978-92-1-003558-3. Disponível em: <https://unctad.org/publication/world-investment-report-2025-international-investment-digital-economy>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- [24] WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). *IPC Green Inventory*. Geneva: WIPO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/green-inventory/home>. Acesso em: 5 nov. 2025.

APÊNDICE A – METODOLOGIA

Estatística de Hopkins

A verificação da tendência de agrupamentos está associada à possibilidade de uma estrutura aleatória presente nos dados, o que poderia gerar conclusões enganosas sobre a existência de clusters. Para essa verificação, empregou-se o teste de Hopkins (HOPKINS; SKELLAM, 1954), cuja hipótese nula estabelece que os dados são uniformemente distribuídos.

O procedimento consiste em dividir o conjunto de dados D , de tamanho n , em duas amostras W e Z , ambas com p elementos ($p < n$). A amostra W contém observações reais, enquanto Z contém observações geradas aleatoriamente. Calculam-se as distâncias desses elementos aos vizinhos mais próximos em D .

A estatística de Hopkins é dada por:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^p w_i}{\sum_{i=1}^p z_i + \sum_{i=1}^p w_i} \quad (1)$$

onde w_i e z_i representam as distâncias dos elementos de W e Z , respectivamente, aos vizinhos mais próximos em D . Valores de H próximos de 0,5 indicam ausência de estrutura de agrupamento; valores próximos de zero sugerem presença de clusters.

Escolha do número de clusters

A escolha do número de clusters foi validada por meio dos índices de Silhueta (ROUSSEEUW, 1987) e de Dunn (DUNN, 1974).

O índice de Silhueta para cada observação i é definido como:

$$S_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)} \quad (2)$$

em que a_i representa a distância média intra-cluster e b_i a menor distância média inter-cluster. Valores próximos de 1 indicam boa separação; próximos de 0 indicam sobreposição; negativos indicam possível alocação inadequada.

O índice de Dunn é definido como:

$$D = \frac{\min.separation}{\max.diameter} \quad (3)$$

Valores elevados indicam clusters compactos e bem separados.

Algoritmo de clusterização

Procedimentos hierárquicos realizam $n - 1$ decisões sucessivas de agrupamento, iniciando com cada observação como um cluster individual. Já os procedimentos não-hierárquicos, como o método k -means (FÁVERO et al., 2009), exigem a definição prévia do número de grupos e utilizam a distância euclidiana como critério de similaridade.

Neste estudo, adotou-se uma abordagem híbrida implementada no pacote *hkmeans* do software *R*. O procedimento inicia-se com método hierárquico aglomerativo para definição preliminar dos grupos e, em seguida, aplica-se o algoritmo k -means para refinamento da alocação das observações, combinando robustez exploratória e eficiência computacional.

Análise de robustez

A robustez foi avaliada por procedimentos ex-ante e ex-post. Ex-ante, a estatística de Hopkins confirmou a existência de estrutura de agrupamento. Ex-post, aplicou-se análise de variância (ANOVA), que indicou diferenças estatisticamente significativas entre os clusters para todas as variáveis analisadas.

Adicionalmente, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, mais robusto a tamanhos amostrais desiguais e ausência de normalidade. Os resultados sustentam a validade da tipologia proposta como instrumento analítico para identificação de padrões estruturais multidimensionais, reconhecendo-se, contudo, limitações associadas ao tamanho reduzido e ao desbalanceamento de alguns agrupamentos.

APÊNDICE B – Análise dos resultados dos perfis setoriais

Médias padronizadas das variáveis por cluster

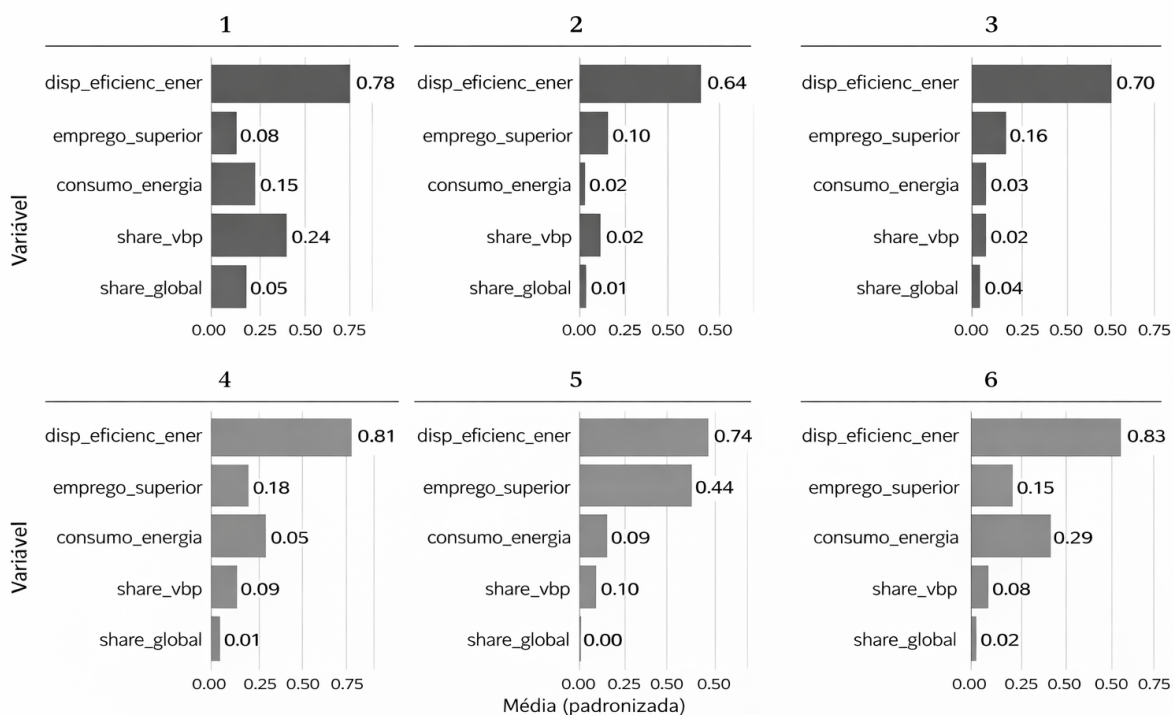


Gráfico 3: Síntese da composição dos perfis setoriais da indústria de transformação – 2023

Fonte: Elaboração própria.

Recebido: 05/12/2025 • Aceito: 24/02/2026 • Publicado: 15/03/2026