



Caminho para a Transição Sociotécnica Energética em Santa Catarina, Brasil – Da Região Carbonífera ao Hidrogênio Verde

Pathway for Socio-Technical Energy Transition in Santa Catarina, Brazil – From the Coal Region to Green Hydrogen

César Henrique Mattos Pires, Me., UFSC.

cesarhmattos@gmail.com

Mauricio Uriona Maldonado, Dr., UFSC.

m.uriona@ufsc.br

Caroline Rodrigues Vaz, Dra., UFSC.

caroline.vaz@ufsc.br

Número da sessão temática da submissão – [6 - Eficiência energética e energias alternativas]

Resumo

A transição energética da região carbonífera de Santa Catarina para o hidrogênio verde (H2V) representa uma mudança sociotécnica complexa, impulsionada por pressões climáticas, avanços tecnológicos e políticas ambientais. Utilizando a Perspectiva Multinível, este estudo analisa a transição do regime energético catarinense, destacando a substituição gradual do carvão pelo H2V, a partir do caminho de transição transformação. A metodologia inclui revisão bibliográfica e análise dos níveis de paisagem, regime e nicho. Os resultados indicam que, entre 2025 e 2055, o H2V pode se consolidar como alternativa energética dominante, promovendo mudanças econômicas e sociais, além de reduzir as emissões catarinenses na geração de energia e no transporte. Empresas de mineração migrarão para setores sustentáveis, enquanto trabalhadores serão requalificados, reduzindo impactos socioeconômicos. Conclui-se que políticas públicas e investimentos são essenciais para garantir uma transição justa e sustentável.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Carvão; Transformação; Perspectiva Multinível; Santa Catarina

Abstract

The energy transition of Santa Catarina's coal region to green hydrogen (GH2) represents a complex socio-technical shift, driven by climate pressures, technological advancements, and environmental policies. Using the Multi-Level Perspective, this study analyzes the transition of the state's energy regime, highlighting the gradual replacement of coal by GH2 through the transformation transition pathway. The methodology includes a literature review and an analysis of the landscape, regime, and niche levels. The results indicate that, between 2025 and 2055, GH2 may consolidate as the dominant energy alternative, driving economic and social changes while reducing Santa Catarina's emissions in energy generation and transportation. Mining companies will shift to sustainable sectors, and workers will be retrained, minimizing socio-economic impacts. It is concluded that public policies and investments are essential to ensuring a fair and sustainable transition.

Keywords: Green Hydrogen; Coal; Transformation; Multi-Level Perspective; Santa Catarina



1. Introdução

Em níveis mundiais, as emissões de CO₂ são advindos do setor de energia, responsável por 75,5% das emissões de GEE em 2021 (Climatewatch, 2025). De maneira semelhante, Santa Catarina tem o setor de energia como o responsável por 41,2% das emissões de GEE no estado. Em níveis subsetoriais considerando todos os setores, Transporte é setor que mais emite, com 12,4% das emissões, e Geração de Eletricidade, com 7,7% (SEEG, 2025). Contudo, Santa Catarina enfrenta um desafio por gerar eletricidade a partir do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), em Capivari de Baixo – responsável pelas emissões de gases de efeito estufa) GEE do subsetor de geração de eletricidade do estado.

A exploração desse carvão para geração elétrica ocorre há décadas na região sul de Santa Catarina. Essa atividade trouxe desenvolvimento para região, como um desenvolvimento de uma economia local estabilizada e geração de empregos, porém trouxe também diversos impactos socioambientais negativos. O ciclo do carvão, que inicia na lavra e finaliza na queima para geração elétrica, causa impactos e poluição tanto em níveis locais quanto em níveis regionais e globais, além de ser uma fonte energética não renovável, altamente poluente e já considerada obsoleta. Além das emissões de GEE que contribuem para as mudanças climáticas, a exploração do carvão mineral ocasiona outros impactos ambientais (Soares; Santos; Possa, 2008).

Dessa forma, é necessário que ocorra um profundo processo de transição no setor energético de forma gradual e que pode durar décadas, buscando modelos de baixo carbono e que englobe desde a produção até o consumo de energia (Gitelman; Kozhevnikov, 2023). Junto a isso, consideram-se também os efeitos socioeconômicos a partir das novas estruturas sociais, econômicas e políticas e suas interconexões, de forma que haja justiça neste processo de transição energética e em seus resultados (García-García; Carpintero; Buendía, 2020). Transições energéticas consideradas justas vai além de migrar para um novo regime sociotécnico de baixo carbono, pois precisam também garantir equidade a partir da distribuição de custos, riscos e benefício desse processo.

Além disso, o maior desafio de uma transição energética para uma economia de baixo carbono seria a perda de empregos na economia de alto carbono e a criação de novas oportunidades na nova realidade. Dessa forma, o hidrogênio verde (H₂V) está emergindo como uma alternativa de destaque para essa transição, pois possui um potencial significativo para a criação de empregos e o crescimento de economias locais, como o caso da região carbonífera catarinense. Sendo um portador de energia livre de carbono, o H₂V pode ser produzido a partir de diversas fontes renováveis e utilizado em vários setores, incluindo indústria, transporte e aplicações residenciais. Dessa forma, este estudo tem como objetivo é compreender como se daria uma transição sociotécnica nas próximas décadas do setor energético catarinense, focando na implementação do H₂V como uma alternativa sustentável ao uso do carvão mineral a partir de dois processos de transição.

2. Referencial Teórico

2.1. Perspectiva Multinível

Transições sociotécnicas (TS) referem-se a transformações profundas na forma como funções sociais, como transporte e comunicação, são realizadas. Indo além das inovações tecnológicas, as TS também envolvem mudanças em práticas dos usuários, regulamentações, redes industriais, infraestrutura e valores simbólicos associados, e representam a passagem de

uma configuração sociotécnica para outra, implicando tanto a substituição de tecnologias quanto alterações nos demais elementos que compõem o sistema. No entanto, tecnologias radicalmente novas enfrentam desafios para se consolidar, pois regulamentações, infraestruturas, práticas usuais e redes de manutenção estão alinhadas às tecnologias já estabelecidas (Geels, 2002; Hofman; Elzen; Geels, 2004).

As abordagens principais utilizadas para entender as transições incluem a gestão de transições, a gestão de nichos estratégicos, sistemas de inovação tecnológica e a perspectiva multinível (MLP). Dentre essas abordagens, a mais predominante é a MLP, tendo Frank Geels como o seu principal criador. A MLP é um modelo teórico que analisa as transições tecnológicas como processos evolutivos e de reconfiguração. Essas transições envolvem grandes mudanças tecnológicas de longo prazo, que não apenas transformam as tecnologias, mas também impactam práticas de usuários, regulamentações, redes industriais, infraestrutura e significados culturais. Ela integra conceitos da economia evolucionária e dos estudos de tecnologia (Rip; Kemp, 1998; Geels, 2002; Köhler *et al.*, 2019).

O MLP é dividido em três níveis que funcionam de forma hierarquizada (Geels, 2002; Rip; Kemp, 1998): nicho, regime e paisagem (Figura 1). O nicho é o nível micro, onde surgem inovações radicais em espaços protegidos do regime dominante. Isso permite aprendizado, desenvolvimento tecnológico e a criação de redes de apoio. O regime é o médio, composto por regras, práticas e infraestruturas que estabilizam o desenvolvimento tecnológico e permitem inovações incrementais dentro de uma estrutura já estabelecida. A paisagem é o nível macro, representando tendências estruturais amplas, como crescimento econômico e normas culturais. Ela muda lentamente e influencia o contexto em que as trajetórias tecnológicas se desenvolvem.

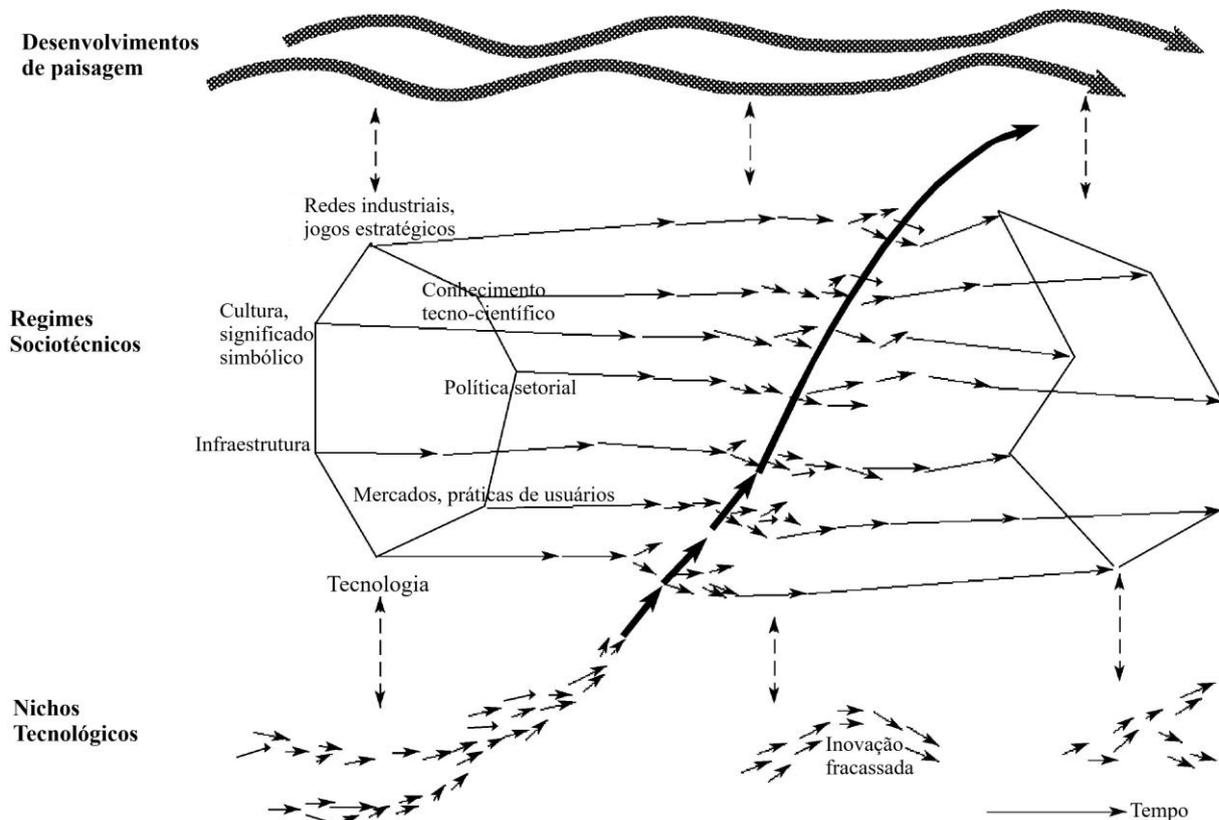


Figura 1: MLP dinâmico de uma TS. Fonte: adaptado de Geels (2002, p. 1263).



2.2. Caminhos de Transição

Dentro dos estudos sobre transições sociotécnicas, os caminhos de transição (CT) são conceituados como o desdobramento de padrões de mudança em sistemas sociotécnicos à medida que esses evoluem para atender às necessidades humanas de forma alinhada a metas de baixo carbono (Rosenbloom, 2017). Entretanto, a abordagem utilizada de análise das transições sociotécnicas utilizada neste trabalho é a partir da MLP, na qual a sua estrutura inicial enfrentou críticas que apontaram a necessidade de refinamento em várias dimensões. Essas críticas destacaram a dificuldade de operacionalizar os níveis analíticos, especialmente o regime, e indicaram um viés excessivo no papel das inovações de nicho, em detrimento das dinâmicas do regime e da paisagem. Além disso, foi ressaltada a rigidez das interações entre os níveis, sem considerar adequadamente as variações temporais e as diferentes naturezas dessas interações ao longo do processo de transição. Também foi apontada a necessidade de compreender como as transições influenciam e são influenciadas por diferentes grupos de atores (Geels; Schot, 2007).

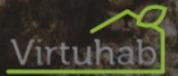
Devido a isso, foram desenvolvidas tipologias de CT para superar esses vieses. Primeiramente, foi construída por Smith e outros em duas categorias diferentes de regimes sociotécnicos como resultado (1) das pressões sociais, econômicas e de inovações de nicho, combinadas a mudanças na paisagem; e da (2) coordenação de recursos internos e externos para adaptação. Isso se baseou em duas dimensões: a origem dos recursos (interna ou externa ao regime) e o grau de coordenação na sua aplicação (Smith *et al.*, 2005; Foxon; Hammond; Pearson, 2010).

A partir disso, Geels e Schot (2007) desenvolveram 4 tipologias diferentes de caminhos para transições sociotécnicas a partir da MLP. O CT transformação ocorre quando mudanças disruptivas no nível da paisagem pressionam o regime existente, mas as inovações no nicho ainda não estão totalmente maduras. Isso leva os atores do regime a ajustarem suas atividades e direções de desenvolvimento, acumulando mudanças graduais que resultam em uma nova configuração, sem alterar sua estrutura básica. Além da transformação, há outros três caminhos de transição: a substituição tecnológica, quando inovações maduras no nicho aproveitam a desestabilização do regime para substituí-lo; a reconfiguração, em que o regime incorpora inovações do nicho para solucionar problemas internos, gerando mudanças estruturais ao longo do tempo; e o desalinhamento e realinhamento, quando uma ruptura abrupta no regime gera competição entre inovações emergentes até que uma delas se torne dominante e estabeleça um novo regime. (2007; Foxon; Hammond; Pearson, 2010).

3. Procedimentos Metodológicos

Este estudo adotou uma abordagem metodológica baseada na revisão de literatura e na análise da transição sociotécnica da região carbonífera do sul catarinense. Inicialmente, a revisão de literatura foi conduzida para compreender a configuração dos nichos, regimes e paisagens no sistema sociotécnico atual baseado no carvão, bem como para examinar estudos sobre as transições para o H2V. Para estruturar a análise, utilizou-se a abordagem teórica MLP, conforme definida por Geels (2002). Essa abordagem permite examinar as dinâmicas de transição tecnológica e sociotécnica organizando os elementos da cadeia de suprimentos em três níveis analíticos: nichos, regimes e paisagens.

A metodologia foi desenvolvida em duas etapas principais. Na primeira etapa, caracterizou-se o regime vigente, analisando a indústria do carvão, a estrutura da cadeia de suprimentos, os atores-chave e as barreiras institucionais e tecnológicas que influenciam a transição para o H2V. Em seguida, na segunda etapa, foi utilizado o CT transformação para analisar a transição da



região baseada no carvão para H2V, pois. Segundo Thomsen (2023), é o CT que mais se encaixa na situação brasileira.

4. Resultados e Discussão

4.1. Regime Vigente

No nível de paisagem, pressões climáticas impulsionam mudanças na matriz energética (Dammann *et al.*, 2021; Öhman; Karakaya; Urban, 2022), exigindo substituir combustíveis fósseis por alternativas de baixo carbono. A redução dos custos de tecnologias renováveis viabiliza fontes limpas, como solar e eólica (Cho; Kim; Park, 2024; Schwabe, 2024). Regulamentações ambientais rigorosas limitam emissões e incentivam tecnologias sustentáveis. O potencial energético renovável brasileiro e o interesse público aumentam a viabilidade e aceitação social da transição (Cho; Kim; Park, 2024).

No regime vigente, o arcabouço legal para a transição energética justa na região carbonífera catarinense deveria minimizar impactos socioeconômicos, mas incentiva o carvão mineral e mantém incentivos fiscais até 2050 (Tigre *et al.*, 2022; Tigre; Setzer, 2023). Subsídios ao setor de energia limpa enfrentam resistência do lobby carbonífero. A influência cultural e histórica do carvão reforça a resistência, pois a mineração e geração termelétrica estão consolidadas há décadas. Previsibilidade econômica e segurança energética do carvão garantem estabilidade ao sistema elétrico. A infraestrutura existente facilita a integração de novas fontes, enquanto compensações financeiras incentivam a continuidade das operações. O setor gera empregos e atrai investimentos em P&D, fomentando inovação e adaptação tecnológica.

Nos nichos, surgem iniciativas para viabilizar a transição. O reaproveitamento de resíduos da indústria carbonífera (Acordi *et al.*, 2023) e tecnologias de captura e armazenamento de carbono reduzem emissões (Gomes, 2023). A gaseificação do carvão também é explorada (Domenico *et al.*, 2018). Simultaneamente, geração, armazenamento e transporte de H2V começam a ganhar espaço, exigindo investimentos em infraestrutura, pesquisa e regulamentação para sua expansão (Dincer; Acar, 2017).

4.2. Transformação

A transição da economia carbonífera do sul de Santa Catarina para o hidrogênio verde ocorrerá de forma gradual, impulsionada por pressões externas moderadas. Mudanças nas políticas ambientais, avanços tecnológicos e transformações no mercado global desafiarão o regime do carvão, enquanto o hidrogênio verde ainda estará em desenvolvimento. Nesse contexto, os atores do regime precisarão ajustar estratégias e redirecionar atividades de inovação, promovendo uma reconfiguração progressiva do sistema energético sem rupturas abruptas.

Entre 2025–2035, a transição pode ser marcada por fortes pressões externas que pode desafiar o regime do carvão, como regulamentações ambientais mais rígidas, compromissos internacionais de descarbonização e restrições ao financiamento de projetos carboníferos. Grandes consumidores industriais devem começar a rever seus contratos, priorizando fontes de energia com menor pegada de carbono, enquanto um declínio pode afetar o mercado global do carvão (Meckling; Sterner; Wagner, 2017). Diante desse cenário, os atores do regime – mineradoras, termelétricas e governos locais – devem buscar alternativas para mitigar impactos sem abandonar completamente o carvão. Algumas usinas podem iniciar projetos de CCS para reduzir emissões, enquanto pesquisas sobre gaseificação do carvão e sua integração com H2 azul ganharão espaço. Essas soluções, no entanto, não devem ser suficientes para garantir a



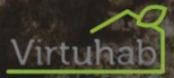
competitividade do setor a longo prazo. Ao mesmo tempo, iniciativas de H2V ainda podem estar em estágio inicial, limitadas por custos elevados e falta de infraestrutura. Pequenos projetos-piloto podem ser implementados, principalmente voltados à produção experimental de H2V utilizando eletricidade de fontes renováveis. Os governos federal e estadual devem começar a oferecer incentivos financeiros para a pesquisa e desenvolvimento do H2, mas sua adoção em larga escala ainda pode enfrentar desafios tecnológicos e econômicos. O setor carbonífero, por sua vez, pode perceber a necessidade de se adaptar, começando a investir em novas capacitações para sua força de trabalho, preparando os primeiros grupos de trabalhadores para atuar em segmentos emergentes da economia do H2.

De 2035–2045, o H2V pode se tornar mais viável economicamente, impulsionado por avanços tecnológicos que reduzem seus custos de produção – tornando mais visível do regime. Empresas que antes dependiam exclusivamente do carvão podem redirecionar investimentos para a infraestrutura de H2, adaptando antigas instalações de mineração e transporte para novas finalidades. As termelétricas a carvão passarão por uma reconfiguração, adotando misturas progressivamente maiores de H2 em seus processos de combustão. Algumas unidades menos eficientes serão desativadas, enquanto outras serão convertidas para operar exclusivamente com H2V, aproveitando a infraestrutura existente. A cadeia de suprimentos do carvão será parcialmente transformada, com empresas explorando novos usos para subprodutos da mineração, como materiais para construção e insumos industriais. Os impactos sociais da transição começarão a se intensificar, exigindo políticas públicas robustas para requalificação profissional e diversificação econômica. Municípios tradicionalmente dependentes da mineração buscarão atrair novos setores industriais, como a fabricação de eletrolisadores, baterias e componentes para energias renováveis. O governo ampliará incentivos para a conversão de empresas do setor carbonífero, garantindo que a transição ocorra sem rupturas socioeconômicas drásticas. A infraestrutura portuária da região, historicamente voltada à exportação de carvão, passará por projetos de modernização para se tornar um hub logístico de exportação de H2V, consolidando a região como um polo estratégico no mercado global de energia limpa.

De 2045–2055, o H2V pode se consolidar como a principal alternativa energética da região, e o carvão pode assumir um papel secundário. O mercado pode estar amplamente integrado à matriz energética, com produção, armazenamento e distribuição operando em larga escala. Empresas que antes atuavam na mineração podem estar completamente reconfiguradas, algumas operando infraestruturas de produção e distribuição de H2V, enquanto outras podem migrar para setores como tecnologias de captura de carbono e economia circular. A SCGás adaptada para transportar H2V até o Porto de Imbituba. Os trabalhadores do setor carbonífero podem estar requalificados e inseridos em novas cadeias produtivas, reduzindo significativamente os impactos sociais da transição. A economia local deve passar por uma transformação completa, com municípios antes dependentes da mineração diversificando suas atividades para o turismo e a produção de energia a partir de fontes renováveis, principalmente eólica. Além disso, a região pode se tornar um *hub* tecnológico, impulsionando inovações relacionadas ao H2V.

5. Discussão

A transição ocorre gradualmente nos três níveis da MLP, comparando o sistema vigente ao pós-transição e evidenciando desafios e oportunidades. O Quadro 1 apresenta essa comparação. Pressões climáticas e regulamentações ambientais exigem alternativas ao carvão. Com a queda dos custos das renováveis, o H2V se torna viável na matriz energética. No pós-transição, a



governança ambiental global estará consolidada, garantindo metas de descarbonização e fortalecendo políticas para fontes limpas.

Quadro 1 – Componentes dos níveis da MLP

Nível	Componentes	
	Sistema Vigente	Sistema pós-transição
Paisagem	<ul style="list-style-type: none"> • Pressões climáticas para limitar o aquecimento global • Redução dos custos de tecnologias renováveis • Regulamentações ambientais mais rigorosas • Potencial energético • Interesse público sobre o meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Desaceleração das emissões de GEE • Manutenção das pressões climáticas para o aquecimento global • Governança ambiental global estabelecida • Interesse público sobre o meio ambiente
Regime	<ul style="list-style-type: none"> • Arcabouço legal para transição energética justa • Subsídios e benefícios governamentais para o setor carbonífero • Lobby forte do setor carbonífero • Presença histórica e influência cultural do carvão • Ciclo do carvão estabelecido • Mercados consolidados de mineração e termelétrica • Energia firme para sistema energético brasileiro • Infraestrutura de distribuição elétrica • Compensações financeiras para os municípios de exploração do carvão • Empregos diretos e indiretos no setor carbonífero • Investimentos em P&D para setor carbonífero • Transporte baseado em combustíveis fósseis 	<ul style="list-style-type: none"> • Lobby do H2V estabelecido • Matriz energética baseada em energias solar e eólica para geração de H2V • Motores a célula de combustível estabelecido • Economia do sul-catarinense baseada em energias renováveis e turismo • Investimentos em P&D para setores das energias renováveis • Estrutura da SC-Gás adaptado ao transporte de H2V • Transporte baseado no uso de H2V
Nicho	<ul style="list-style-type: none"> • Reaproveitamento dos resíduos da indústria carbonífera • Desenvolvimento de tecnologia de captura e armazenamento do carvão • Gaseificação do carvão • Geração, armazenamento e transporte de H2V 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos para novo reuso dos resíduos do carvão atendendo a economia circular • Novas tecnologias de geração e transporte de H2V

Fonte: Autores.

Atualmente, o setor carbonífero mantém influência por subsídios, infraestrutura e mercado estabelecido. No regime pós-transição, o lobby do H2V substitui o do carvão, alterando o poder econômico e político. A nova matriz energética se baseia em solar e eólica para produzir H2V, transformando a economia regional no sul de Santa Catarina, agora focada em energias renováveis e turismo. A infraestrutura se adapta, como a SC-Gás, que passa a transportar H2V. Os investimentos em P&D, antes voltados ao setor carbonífero, focam no avanço das tecnologias renováveis e do hidrogênio.

Nos nichos, a economia circular ganha força. Resíduos do carvão são reaproveitados, reduzindo passivos ambientais, enquanto o H2V se consolida na matriz energética, tornando-se



mais eficiente e competitivo. Em Santa Catarina, a transição para H2V enfrentará os subsetores de Transporte e Geração de Energia. A retirada do carvão reduzirá emissões na geração elétrica, enquanto o transporte, antes baseado em combustíveis fósseis, adotará veículos movidos a célula de combustível.

6. Conclusões

A análise da transição da matriz energética da região carbonífera catarinense demonstra que a mudança para o H2V não se trata apenas de uma substituição tecnológica, mas de uma transformação profunda do sistema sociotécnico. As pressões climáticas, a necessidade de redução das emissões de CO₂ e os avanços tecnológicos impulsionam essa transição, mas desafios estruturais, como subsídios ao carvão, infraestrutura limitada para o H2V e resistência política e cultural, ainda dificultam sua implementação.

A transição da matriz energética da região carbonífera catarinense para o H2V representa uma transformação sociotécnica profunda, não apenas uma substituição tecnológica. Pressões climáticas, redução de emissões de CO₂ e avanços tecnológicos impulsionam essa mudança, mas subsídios ao carvão, infraestrutura limitada e resistência política e cultural ainda dificultam sua implementação.

O cenário de transformação analisado sugere uma transição sob forte pressão regulatória e de mercado, forçando mudanças abruptas na matriz energética, considerado mais realista para o Brasil. No entanto, futuras análises sobre um cenário de reconfiguração podem indicar um caminho mais estável e menos dependente dessas pressões.

Para viabilizar a transição para o H2V em Santa Catarina, é essencial alinhar políticas públicas, investimentos privados e requalificação da força de trabalho. A experiência da região pode servir de modelo para outras áreas dependentes do carvão, demonstrando que uma transição equilibrada pode gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais a longo prazo.

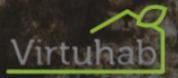
Os próximos passos incluem aprofundar estudos sobre outras transições energéticas baseadas na transformação e realizar entrevistas com atores locais para compreender suas perspectivas e garantir uma transição justa.

Referências

- ACORDI, J. et al. Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: a brazilian case study based on environmental and physicochemical features. **Resources Policy**, [S.L.], v. 80, p. 103243, 2023.
- CHO, A.; KIM, H.; PARK, S. Resurgence of the hydrogen energy in South Korea's government strategies from 2005 to 2019. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 65, p. 844-854, 2024.
- COPERNICUS (org.). **Copernicus: 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level**. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- DAMMAN, S. et al. A hybrid perspective on energy transition pathways: is hydrogen the key for norway?. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v. 78, p. 102116, 2021.
- DINCER, I.; ACAR, C. Innovation in hydrogen production. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 42, n.22, p. 14843-14864, 2017.



- FOXON, T. J.; HAMMOND, G. P.; PEARSON, P. J.G.. Developing transition pathways for a low carbon electricity system in the UK. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 77, n.8, p. 1203-1213, out. 2010.
- GARCÍA-GARCÍA, P.; CARPINTERO, O.; BUENDÍA, L. Just energy transitions to low carbon economies: a review of the concept and its effects on labour and income. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v.70, 2020.
- GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy**, [S.L.], v. 31, n.8-9, p. 1257-1274, 2002.
- GEELS, F.W. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. **Research Policy**, [S.L.], v. 33, n.6-7, p. 897-920, 2004.
- GEELS, F. W.; SCHOT, j. Typology of sociotechnical transition pathways. **Research policy**, 2007, 36.3: 399-417.
- GITELMAN, L. D.; KOZHEVNIKOV, M. V. New Approaches to the Concept of Energy Transition in the Times of Energy Crisis. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 6, 2023.
- GOMES, R.T. **Avaliação de viabilidade técnico-econômica de sistema CCS em uma termelétrica brasileira a carvão**. 2023. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Unicamp, 2023.
- HOFMAN, P.S.; ELZEN, B. E.; GEELS, F. W. Sociotechnical scenarios as a new policy tool to explore system innovations: co-evolution of technology and society in the Netherland's electricity domain. **Innovation**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 344-360, 2004.
- MECKLING, J.; STERNER, T.; WAGNER, G. Policy sequencing toward decarbonization. **Nature Energy**, [S.L.], v.2, n. 12, p. 918-922, 2017.
- ÖHMAN, A.; KARAKAYA, E.; URBAN, F. Enabling the transition to a fossil-free steel sector: the conditions for technology transfer for hydrogen-based steelmaking in europe. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v.84, p. 2022.
- RIP, A.; KEMP, R. Technological change. In: **Human choice and climate change**: Vol. II, resources and technology. Battelle Press, 1998. p. 327-399.
- ROSENBLOOM, D. Pathways: an emerging concept for the theory and governance of low-carbon transitions. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 43, p. 37-50, 2017.
- SCHWABE, J. Regime-driven niches and institutional entrepreneurs: adding hydrogen to regional energy systems in germany. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v. 108, p. 103357, 2024.
- SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- SMITH, A *et al.* The governance of sustainable socio-technical transitions. **Research Policy**, [S.L.], v. 34, n. 10, p. 1491-1510, dez. 2005.
- SOARES, P.S. M.; SANTOS, M.D.C.; POSSA, M.V. (Eds.). **O Carvão Brasileiro**: tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: ETEM/MCT, 2008.
- TIGRE, M.A.; SETZER, J. Human Rights and Climate Change for Climate Litigation in Brazil and Beyond: An Analysis of the Climate Fund Decision. **Geo. J. Int'l L.**, v. 54, p. 593, 202



TIGRE, M.A. *et al.* **Just Transition Litigation in Latin America: an initial categorization of climate litigation cases amid the energy transition.** New York: Sabin Center For Climate Change Law, 2023. 58p.

THOMSEN, M. **Developing a Green Hydrogen Economy in Brazil: obstacles and enablers.** 2023. 75 f. Dissertação (Doutorado) - International Management, Universidade Católica Portuguesa, Lisboa, 2023.