

CENÁRIO DE TRANSIÇÃO SOCIOTÉCNICA PARA O SETOR ENERGÉTICO EM SANTA CATARINA: DA REGIÃO CARBONÍFERA AO HIDROGÊNIO VERDE¹

SOCIOTECHNICAL TRANSITION PATHWAY FOR THE ENERGY SECTOR IN SANTA CATARINA: FROM THE COAL REGION TO GREEN HYDROGEN

César Henrique Mattos Pires*  E-mail: cesarhmattos@gmail.com

Mauricio Uriona Maldonado*  E-mail: m.uriona@ufsc.br

Caroline Rodrigues Vaz*  E-mail: caroline.vaz@ufsc.br

*Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil

Resumo: A transição energética na região carbonífera de Santa Catarina rumo ao hidrogênio verde (GH2) representa uma mudança sociotécnica complexa, impulsionada por pressões climáticas, avanços tecnológicos e políticas ambientais. Com base na Perspectiva Multinível (MLP), o estudo analisa a substituição gradual do carvão pelo GH2 no cenário de transição Transformação. A metodologia envolve revisão bibliográfica e análise dos níveis de paisagem, regime e nicho do MLP. Os resultados são apresentados a partir de uma transição progressiva entre 2025 e 2055. De 2025 a 2035, regulamentações e incentivos financeiros desafiarão o regime do carvão, enquanto o GH2 despontará em projetos-piloto. De 2035 a 2045, avanços tecnológicos e redução de custos tornarão o GH2 mais viável, estimulando a realocação de investimentos e a reconfiguração ou desativação de termelétricas. Entre 2045 e 2055, o GH2 tende a se consolidar como fonte dominante, com mineradoras adaptadas, trabalhadores requalificados e queda nas emissões da geração elétrica e do transporte. Na discussão, é analisada a comparação entre o sistema sociotécnico pré e pós-transição nos três níveis da MLP. Por fim, conclui-se que a adoção do GH2 exige o alinhamento entre políticas públicas, investimentos privados e capacitação profissional.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Carvão Mineral. Transição energética. Perspectiva Multinível. Cenário de Transição.

Abstract: The energy transition in the coal region of Santa Catarina toward green hydrogen (GH2) represents a complex sociotechnical change driven by climate pressures, technological advances, and environmental policies. Based on the Multi-Level Perspective (MLP), this study analyzes the gradual replacement of coal with GH2 under the Transformation transition pathway. The methodology involves a literature review and analysis of the landscape, regime, and niche levels proposed by the MLP. The results indicate a progressive transition between 2025 and 2055. From 2025 to 2035, regulations and financial incentives will challenge the coal regime, while GH2 will emerge in pilot projects. Between 2035 and 2045, technological advances and cost reductions will make GH2 more viable, encouraging investment reallocation and the reconfiguration or deactivation of thermoelectric plants. From 2045 to 2055, GH2 is expected to consolidate as the dominant energy source, with adapted mining companies, retrained workers, and a decrease in emissions from electricity generation and transportation. The

¹ Trabalho aprovado no III Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS), que ocorreu nos dias 30, 31 de julho e 01 de agosto de 2025, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC.

discussion analyzes the comparison between the pre- and post-transition sociotechnical systems across the three levels of the MLP. Finally, it is concluded that the adoption of GH2 requires alignment among public policies, private investments, and workforce training.

Keywords: Green hydrogen. Coal. Energy transition. Multi-Level Perspective. Transition pathway.

1 INTRODUÇÃO

Em nível mundial, as emissões de CO₂ são provenientes do setor de energia, responsável por 75,5% das emissões de gases de efeito estufa (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. No nível subsetorial, considerando todos os setores, o Transporte é o subsetor que mais emite, com 12,4% das emissões, sendo seguido do subsetor Geração de Eletricidade, com 7,7% (SEEG, 2025). O estado enfrenta o desafio de ainda gerar eletricidade a partir do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), em Capivari de Baixo – responsável pelas emissões de 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 progresso para a região, como o desenvolvimento de uma economia local estabilizada e a geração de empregos, porém também ocasionou diversos impactos socioambientais negativos. O ciclo do carvão, que vai da lavra à 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 considerada obsoleta. Além das emissões de GEE que contribuem para as mudanças climáticas, a exploração do carvão mineral ocasiona outros impactos ambientais na região (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 vão além de migrar para um novo regime sociotécnico de baixo carbono, pois precisam também garantir equidade a partir da distribuição de custos, riscos e benefícios 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 (GH2) 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 GH2 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 compreender como se daria uma transição sociotécnica nas próximas décadas do setor energético catarinense, focando na implementação do GH2 como uma alternativa sustentável ao uso do carvão mineral a partir do cenário de transição Transformação.

O artigo está estruturado em quatro seções principais, além desta introdução. A Seção 2 apresenta o referencial teórico, abordando as transições sociotécnicas, a Perspectiva Multinível, os cenários de transição e o hidrogênio verde nesse contexto. A Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. Na Seção 4, são apresentados os resultados, incluindo a caracterização do regime vigente e a descrição do possível cenário de transição para o GH2 na região carbonífera de Santa Catarina, com base no cenário de transformação. Por fim, a Seção 5 discute os achados, comparando o cenário de transformação com o regime atual, de modo a identificar os principais desafios, potencialidades e oportunidades para a consolidação do hidrogênio verde na região.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Perspectiva Multinível

As transições sociotécnicas (TS) referem-se às 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).

Essa abordagem aprofunda a compreensão dos impactos e influencia as inovações na sociedade. As TS são processos complexos e coevolutivos, envolvendo múltiplas dimensões e diversos atores – como movimentos sociais, formuladores de políticas e associações industriais. De longo prazo e não lineares, enfrentam resistência de indústrias estabelecidas e buscam objetivos ambientais, exigindo mudanças institucionais, políticas e regulatórias. Além disso, são marcadas por incerteza e múltiplos cenários possíveis (Geels, 2002; Hofman; Elzen; Geels, 2004), tornando a análise dessas transições complexas.

As principais abordagens utilizadas para entender as transições incluem a Gestão de Transições (Transition Management), a Gestão de Nichos Estratégicos (Strategic Niche Management), sistemas de inovação tecnológica (Technological Innovation Systems) e a Perspectiva Multinível (Multi-Level Perspective – MLP). A gestão de transições integra os estudos sobre transições tecnológicas com a teoria de sistemas complexos e abordagens de governança, focando na maneira como as transições podem ser intencionalmente promovidas. Em contrapartida, a gestão estratégica de nicho foca na criação e no apoio deliberado a nichos como um caminho para desencadear mudanças nos regimes sobre transições sustentáveis. Sistemas de inovação tecnológica adotam uma abordagem sistêmica para analisar essas transformações nos regimes sociotécnicos estabelecidos e se preocupam com a emergência de novas tecnologias, além das mudanças institucionais e organizacionais necessárias para acompanhar o desenvolvimento tecnológico (Markard; Raven; Truffer, 2012; Sareen; Haarstad, 2018).

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).

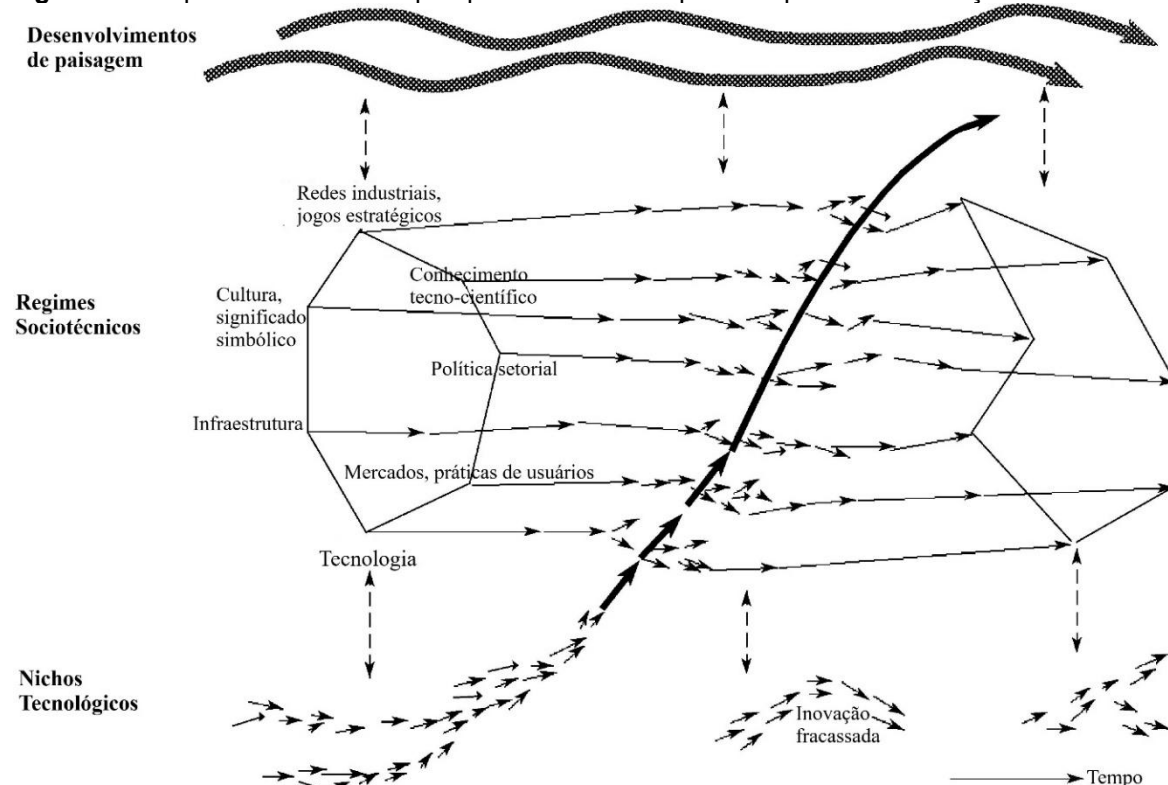
O MLP é dividido em três níveis que funcionam de forma hierarquizada (Geels, 2002; Rip; Kemp, 1998):

- Nicho (*niche*) é o nível micro e refere-se a espaços protegidos onde surgem inovações radicais, permitindo o desenvolvimento de novas tecnologias longe das pressões do regime dominante. Isso permite que essas inovações passem por processos de aprendizado e construam redes sociais de apoio, como cadeias de suprimentos e parcerias entre usuários e produtores;
- Regime (*regime*) é o nível médio e funciona como conjunto de regras e práticas que orientam a engenharia, os processos de produção, as características de produtos, habilidades e procedimentos, todos embutidos em instituições e infraestruturas. É responsável pela estabilidade das configurações sociotécnicas, permitindo inovações incrementais dentro de uma estrutura dinâmica. Em termos evolutivos, os regimes funcionam como mecanismos de seleção e retenção, estabilizando o desenvolvimento tecnológico atual e gerando trajetórias de inovação incremental;
- Paisagem (*landscape*) é o nível macro e forma o conjunto de tendências estruturais profundas que moldam o contexto em que as trajetórias tecnológicas se desenvolvem, incluindo fatores como crescimento econômico, normas culturais, acordos ambientais, dentre outros. Ela é uma estrutura externa mais difícil de ser alterada e influencia as interações dos atores, englobando fatores externos que mudam lentamente e afetam as trajetórias tecnológicas.

As interações entre esses três níveis são ilustradas de forma esquemática na Figura 1. Esses níveis mantêm uma relação de interdependência, em que os regimes se encontram inseridos nas paisagens, enquanto os nichos se formam e evoluem no

interior dos regimes. As inovações surgem nos nichos em resposta às pressões e oportunidades geradas pelos regimes e pela paisagem.

Figura 1 – Esquema dinâmico da perspectiva multinível para uma transição sociotécnica



Fonte: Adaptado de Geels (2002, p. 1263).

2.2 Cenários de Transição

Dentro dos estudos sobre transições sociotécnicas, os cenários 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 desenvolveram 4 tipologias diferentes de cenários para transições sociotécnicas a partir da MLP (2007; Foxon; Hammond; Pearson, 2010):

- Transformação (Transformation) ocorre quando a pressão da paisagem – uma mudança disruptiva – incide sobre o regime, enquanto as inovações no nicho ainda não estão totalmente maduras. Isso leva os atores do regime existente a alterarem a direção dos caminhos de desenvolvimento e das atividades de inovação. Dessa forma, esses ajustes e reorientações se acumulam ao longo do tempo no nível do regime, resultando em uma nova configuração nesse nível que mantém a arquitetura básica;
- Substituição tecnológica (Technological Substitution) acontece quando há uma pressão sob o regime a partir do nível de paisagem em um momento em que as inovações no nível de nicho já estão maduras. As inovações aproveitam a janela de oportunidade causada pela paisagem e ganham impulso interno, alcançado o nível de regime. Isso causa uma desestabilização do regime vigente e surgimento de um novo regime;
- Reconfiguração (Reconfiguration) ocorre quando existem relações mútuas entre as tecnologias presentes no regime adotam inovações do nível de nicho para resolver problemas internos. Isso possibilita que os atores do regime experimentem ganhos econômicos a partir da combinação entre essas inovações. As sequentes incorporações das tecnologias de nicho

sob a pressão em nível de paisagem resultam em uma nova configuração a tecnologia existente que resulta em grandes reconfigurações e mudanças no regime ao longo do tempo;

- Desalinhamento e Realinhamento (De-alignment/Re-alignment) acontecem quando há uma forte e súbita mudança no nível de paisagem que resulta na ruptura do regime existente – desalinhamento. Não havendo uma inovação madura no nível de nicho, as inovações em desenvolvimento coexistem e competem por recursos até que uma se torne dominante, ocasionado o realinhamento de um novo regime.

2.3 Hidrogênio Verde

A transição energética é um dos principais temas centrais nos estudos de cenários de energia do futuro, buscando expandir o uso de fontes renováveis – como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa. Entretanto, isso apresenta desafios em termos de compreensão e aceleração dessas mudanças, que são enfrentados por meio de políticas nacionais voltadas para impulsionar transições, com a implementação de incentivos financeiros e a definição de metas para o aumento de uso das energias renováveis (Hirt; Sahakian; Trutnevyte, 2021).

Dentre as fontes renováveis, a utilização de hidrogênio (H₂) é a que está mais em evidência. O H₂ utilizado para energia pode ser classificada de 4 formas: H₂ marrom – derivado de matéria-prima abundante em hidrocarbonetos por meio da gaseificação –, H₂ cinza – produzido por meio do processo de reforma a vapor do gás natural que leva à geração de H₂ e dióxido de carbono –, H₂ azul – procedimento do H₂ verde com a tecnologia em desenvolvimento de captura e armazenamento de carbono –, GH₂ – gerado a partir do uso de água e energia renováveis através da eletrólise (Sebbagh; Şahin; Beldjaatit, 2024) .

A cadeia de suprimento do GH₂ inicia com a produção por eletrólise da água, utilizando energia de fontes renováveis. As tecnologias existentes para esse processo mais utilizadas são eletrólise alcalina, membrana de troca de prótons e óxido sólido. Após a produção, o H₂ é purificado para remover impurezas – principalmente oxigênio e água – através de adsorção e purificação catalítica. Em seguida, o produto desse

processo é comprimido ou liquefeito para armazenamento, através de gás comprimido, H₂ liquefeito. O transporte varia conforme o volume e a distância, incluindo tubulações para grandes volumes, trailers para distâncias curtas e navios-tanque para transporte marítimo internacional. Na fase final, o H₂ pode ser transformado em energia elétrica por células de combustível ou turbinas a gás, ou aplicado diretamente como matéria-prima industrial ou combustível (Risco-Bravo *et al.*, 2024).

Devido ao agravamento das mudanças climáticas, o GH₂ acabou se destacando por ser uma fonte renovável de energia em um contexto de transição energética, apesar de desafios como altos custos de produção e infraestrutura limitada. Para isso, a inovação para sua produção se tornou extremamente necessária para enfrentar esses desafios ambientais, a partir de melhorias em sua eficiência, utilização de recursos, acessibilidade, proteção ambiental, segurança energética e projeto do sistema e análise de desempenho. Devido à essa gama de melhorias, entender como se desenvolve essa transição energética a partir dos estudos de inovação é extrema importância (Dincer; Acar, 2017).

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 GH₂. 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 GH₂. Em seguida, na segunda etapa, foi utilizado o CT Transformação para analisar a transição da região baseada no carvão para GH₂,

pois. Segundo Thomsen (2023), Transformação é o CT que mais se encaixa na situação brasileira.

4 RESULTADOS

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; Sete, 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 (CCS) reduzem emissões (Gomes, 2023). A gaseificação do carvão também é explorada (Domenico *et al.*, 2018). Simultaneamente, geração, armazenamento e transporte de GH2 começam a ganhar espaço, exigindo investimentos em infraestrutura, pesquisa e regulamentação para sua expansão (Dincer; Acar, 2017).

4.2 CT Transformação

A transição da economia carbonífera do sul de Santa Catarina para o GH2 dever ocorrer 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 GH2 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 podem 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 ao priorizar 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 começar a 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 GH2 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 GH2 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 e preparando os primeiros grupos de trabalhadores para atuar em segmentos emergentes da economia do H2.

De 2035–2045, o GH2 pode se tornar mais viável economicamente, impulsionado por avanços tecnológicos que reduzem seus custos de produção – tornando-o mais presente no regime. Empresas que antes dependiam exclusivamente do carvão podem realocar seus investimentos para a infraestrutura de H2, conseguindo, assim, adaptar 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 GH2, 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 agravar, demandando políticas públicas mais eficazes para requalificação profissional e diversificação econômica. Os municípios que são mais tradicionalmente dependentes da mineração deverão começar a atrair novos setores industriais – como a fabricação de eletrolisadores, baterias e componentes para energias renováveis. O governo precisará ampliar incentivos para a conversão de empresas do setor carbonífero, evitando rupturas socioeconômicas mais drásticas. A infraestrutura portuária da região poderá passar por projetos de modernização para se tornar um centro de exportação de GH2, auxiliando a região no processo de transição energética.

De 2045–2055, o GH2 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 GH2, enquanto outras podem migrar para setores como tecnologias de captura de carbono e economia circular. A SCGás poderá ser adaptada para transportar GH2 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 que já foram 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 GH2.

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 GH2 se torna viável na matriz energética. Já no pós-transição, a governança ambiental global estará consolidada, garantindo metas de descarbonização e fortalecendo políticas para fontes limpas.

Atualmente, o setor carbonífero mantém influência por subsídios, infraestrutura e mercado estabelecido. No regime pós-transição, o *lobby* do GH2 substitui o do carvão, alterando o poder econômico e político. A nova matriz energética se baseia em solar e eólica para produzir GH2, transformando a economia regional no sul de Santa Catarina, agora focada em energias renováveis e turismo. A infraestrutura se adapta, como a SCGás, que passa a transportar GH2. 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 GH2 se consolida na matriz energética, tornando-se mais eficiente e competitivo. Em Santa Catarina, a transição para GH2 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.

Quadro 1 – Componentes dos níveis da MLP

Nível	Componentes	
	Sistema Vigente	Sistema pós-transição
Paisagem	• 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	• Desaceleração das emissões de GEE • Manutenção das pressões climáticas para o aquecimento global • Governança ambiental global estabelecida • Interesse público sobre o meio ambiente
Regime	• Arcabouço legal para transição energética justa • Subsídios e benefícios governamentais para o setor carbonífero • <i>Lobby</i> 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	• <i>Lobby</i> do GH2 estabelecido • Matriz energética baseada em energias solar e eólica para geração de GH2 • 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 SCGás adaptado ao transporte de GH2 • Transporte baseado no uso de GH2
Nicho	• Reaproveitamento dos resíduos da indústria carbonífera • Desenvolvimento de tecnologia de captura e armazenamento do carvão • Gaseificação do carvão • Geração, armazenamento e transporte de GH2	• Estudos para novo reuso dos resíduos do carvão atendendo a economia circular • Novas tecnologias de geração e transporte de GH2

Fonte: Elaborado pelos autores.

6 CONCLUSÕES

A análise da transição da matriz energética da região carbonífera catarinense demonstra que a mudança para o GH2 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 GH2 e resistência política e cultural, ainda dificultam sua implementação.

A transição da matriz energética da região carbonífera catarinense para o GH2 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 GH2 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.

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.

DOMENICO, M. D. *et al.* Gasification of Brazilian coal-chars with CO2: effect of samples': properties on reactivity and kinetic modeling. **Chemical Engineering**

Communications, [S. l.], v. 206, n. 2, p. 158-168, 18 jun. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00986445.2018.1477763>.

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.; SCHOT, J. Typology of sociotechnical transition pathways. **Research policy**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 399-417, 2007.

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.

HIRT, L. F.; SAHAKIAN, M.; TRUTNEVYTE, E. What socio-technical regimes foster solar energy champions? Analysing uneven photovoltaic diffusion at a subnational level in Switzerland. **Energy Research & Social Science**, [S. l.], v. 74, p. 101976, abr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2021.101976>.

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 Netherlands' electricity domain. **Innovation**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 344-360, 2004.

KÖHLER, J. *et al.* An agenda for sustainability transitions research: state of the art and future directions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, [S. l.], v. 31, p. 1-32, 2019.

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. **Research Policy**, [S. l.], v. 41, n. 6, p. 955-967, jul. 2012.

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. Ohio: Battelle Press, 1998. p. 327-399.

RISCO-BRAVO, A. *et al.* From green hydrogen to electricity: a review on recent advances, challenges, and opportunities on power-to-hydrogen-to-power systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 189, p. 113930, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2023.113930>.

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.

SAREEN, S.; HAARSTAD, H. Bridging socio-technical and justice aspects of sustainable energy transitions. **Applied Energy**, [S. l.], v. 228, p. 624-632, out. 2018.

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.

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

TIGRE, M. A.; SETZER, J. Human Rights and Climate Change for Climate Litigation in Brazil and Beyond: An Analysis of the Climate Fund Decision. **Georgetown Journal of International Law**, Washington D.C., v. 54, n. 4, p. 593, 2023.

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.

Biografia do(s) autor(es)

César Henrique Mattos Pires

Bacharel em Oceanografia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desde julho de 2016. Foi bolsista de mestrado CAPES via Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF/INCT) no Curso de Pós-graduação em Oceanografia (UFSC) pela Linha de Pesquisa Dinâmica e Gestão de Sistemas Costeiros entre 2017 e 2019. Atuou como Bolsista DTI-B do INCT/INEOF e como pesquisador voluntário no Laboratório de

Dinâmica dos Oceanos (LABDINO/UFSC) durante dois anos. Foi bolsista pesquisador na área de Transição Energética Justa da Gerência de Clima e Energia na Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde de Santa Catarina. Atualmente é aluno de doutorado no Programa de Engenharia de Produção na UFSC com pesquisas na área de Recursos Renováveis e Transição Energética Justa e integrante do Grupo de Pesquisa Sinergia e atuou como pesquisador na área de Energia na Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde de Santa Catarina, iniciado em 11/2024.

Mestrado em Oceanografia, UFSC, Brasil. Especialidade do autor (temas de pesquisa): Energias Renováveis, Energia Eólica Costeira e Offshore, Transição Energética Justa, Mitigação de Gases de Efeito Estufa, Regimes Sociotécnicos e Inovação.

Mauricio Uriona Maldonado

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da UFSC e docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Atua nas áreas de políticas e planejamento energético, com foco em fontes alternativas de energia nos setores elétrico e de transportes. Entre 2022 e 2025, é Professor Associado Extraordinário na University of Stellenbosch (África do Sul). Doutor e Mestre em Engenharia e Gestão do Conhecimento pela UFSC, com co-supervisão na Duke University (EUA), e graduado em Engenharia Industrial pela Escuela Militar de Ingenieria (Bolívia), possui formações complementares no MIT e na University of Tampere (Finlândia). Tem experiência como consultor em inovação na FIESC e participou de projetos financiados por instituições como FAPESC, União Europeia, GIZ, DAAD, CNPq e CAPES. Foi professor visitante em universidades da Argentina, Alemanha, Finlândia e Espanha. Suas pesquisas são publicadas em periódicos e conferências nacionais e internacionais. Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento, UFSC, Brasil. Especialidade do autor (temas de pesquisa): Energias Renováveis, Eletromobilidade, Transição Energética, Tecnologia e Economia da Energia, Inovação, Dinâmica de Sistemas.

Caroline Rodrigues Vaz

Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC (Campus Florianópolis). Pós-doutora (PNPD/CAPES) e Doutora em Engenharia de Produção pela mesma instituição, com doutorado sanduíche na École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (França). Possui mestrado em Engenharia de Produção, especializações em Educação Científica e Tecnológica e em Gestão Industrial, além de graduação em Tecnologia em Alimentos pela UTFPR. É líder do grupo de pesquisa SINERGIA – Sustentabilidade e Inovação nas Energias Renováveis (UFSC) e pesquisadora do NGS/UFSC e do grupo “Desarrollo empresarial, gestión del conocimiento e innovación” da Universidad de Lima (Peru). Suas áreas de pesquisa incluem Sustentabilidade, Eco-inovação, Energias Renováveis e Logística Reversa, com destaque para análises bibliométricas, cientométricas e de conteúdo. Possui publicações em periódicos de alto impacto, como Journal of Cleaner Production, Sustainability e IEEE Latin America Transactions, além de livros, capítulos e apresentações em congressos nacionais e internacionais. Doutorado em Engenharia de Produção, UFSC, Brasil. Especialidade do autor (temas de pesquisa): Logística Reversa, Capital Intelectual, Energias Renováveis, Inovação Sociotécnica, Dinâmica de Sistemas, Inovação, Tecnologias Limpas, Eletromobilidade.



Artigo recebido em: 12/11/2025 e aceito para publicação em: 04/12/2025
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v26i1.5728>