



Novos Cadernos NAEA

v. 28, n. 1 • jan-abr. 2025 • ISSN 1516-6481/2179-7536



DINÂMICA ESPACIAL DAS OCUPAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NA CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

SPATIAL DYNAMICS OF TECHNICAL-SCIENTIFIC OCCUPATIONS ON LOW-CARBON CHAIN PRODUCTION IN BRAZIL

Mabel Diz Marques Mota  

Universidade SENAI CIMATEC, Salvador, BA, Brasil

Raphael de Oliveira Silva  

Universidade SENAI CIMATEC, Salvador, BA, Brasil

Gabriel Alves de Pinho  

Universidade SENAI CIMATEC, Salvador, BA, Brasil

RESUMO

Este artigo investiga a dinâmica espacial das ocupações técnico-científicas associadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, com foco no período entre 2006 e 2021. A pesquisa utiliza microdados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) para analisar 64 ocupações técnico-científicas (PoTec) nas indústrias extrativa, de transformação e nos setores de eletricidade e gás. Os resultados apontam para um aumento nas ocupações até 2013, seguido por uma retração até 2018, com uma recuperação modesta após esse período. A pesquisa também revela a forte concentração de ocupações em regiões com infraestrutura industrial consolidada, como São Paulo e Minas Gerais, e destaca a ampliação da participação do Nordeste. O estudo é inédito no país ao articular qualificação profissional, transição energética e território, e reforça a importância de políticas públicas voltadas à descentralização da base técnico-científica e ao fortalecimento regional das capacidades em energias renováveis e hidrogênio de baixa emissão.

Palavras-chave: hidrogênio de baixo carbono; economia sustentável; mapeamento ocupacional; transição energética; desenvolvimento regional.

ABSTRACT

This article investigates the spatial dynamics of technical-scientific occupations within the low-carbon hydrogen production chain in Brazil, from 2006 to 2021. The research uses microdata from the Annual Social Information Report (RAIS) to analyze 64 technical-scientific occupations (PoTec) in the extractive and manufacturing industries, as well as in the electricity and gas sectors. The results indicate an increase in these occupations up to 2013, followed by a decline until 2018, with a modest recovery afterward. The research also reveals a strong concentration of occupations in regions with consolidated industrial infrastructure, such as São Paulo and Minas Gerais, and highlights the growing participation of the Northeast. This study is unprecedented in the country for linking professional qualification, energy transition, and territory aspects, and it reinforces the importance of public policies aimed at decentralizing the technical-scientific base and strengthening regional capabilities in renewable energy and low-emission hydrogen.

Keywords: low-carbon hydrogen; sustainable economy; occupational mapping; energy transition; regional development.

1 INTRODUÇÃO

No atual contexto de transição para um sistema energético sustentável, torna-se crucial buscar alternativas que possam mitigar os desafios das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e das limitações enfrentadas pelos setores com dificuldades na redução de carbono. Nesse cenário, o hidrogênio de baixo carbono, em particular o hidrogênio verde (H2V), emerge como uma opção promissora para a descarbonização da economia (Oliveira; Beswick; Yan, 2021; Clark II; Rifkin, 2006; Shen *et al.*, 2023; Lara; Richter, 2023).

O termo “hidrogênio verde” refere-se ao hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renovável, como solar e eólica. Essa designação é atribuída à sua produção livre de emissões de GEE e outros poluentes, tornando-o uma alternativa viável aos combustíveis fósseis durante a transição para uma economia de baixo carbono. Essa transição é considerada necessária e estratégica, visando limitar o aquecimento global a um nível seguro e prevenir impactos mais graves das mudanças climáticas, como eventos climáticos extremos, aumento do nível do mar e perda de biodiversidade (GIZ, 2021).

Conforme evidenciado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) e pela Agência Internacional para as Energias Renováveis (Irena, 2023), a economia do hidrogênio de baixo carbono como vetor energético vem ganhando cada vez mais importância e se alinhando às estratégias globais de energia e sustentabilidade já adotadas em muitos países. A adoção estratégica do uso e produção do hidrogênio de baixo carbono visa diversificar a matriz energética, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e fomentando a transição para uma economia de baixo carbono. Além disso, a implementação dessa tecnologia promove investimentos em infraestrutura e em tecnologias correlatas, com impactos diretos na geração de empregos qualificados e no desenvolvimento de toda a cadeia produtiva do hidrogênio.

No Brasil, esforços têm sido empreendidos nesse segmento. O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) busca acelerar a economia do hidrogênio de baixo carbono no país e aproveitar as oportunidades do mercado global de produtos de baixa emissão de carbono e sua cadeia de suprimentos. Ademais, o Brasil almeja tornar o hidrogênio de baixa emissão de carbono competitivo no país e prover alternativas para setores de difícil abatimento de emissões de GEE (Brasil, 2023).

As expectativas em relação ao avanço tecnológico e ao crescimento econômico sustentável da cadeia do hidrogênio são acompanhadas por previsões/projeções igualmente altas quanto à criação de novos empregos. Por exemplo, a União Europeia prevê a criação de 5,4 milhões de novos empregos até 2050 na produção de hidrogênio, infraestrutura técnica, maquinário e indústrias associadas (GIZ, 2021). De maneira similar, a Alemanha planeja empregar cerca de 800.000 pessoas na economia do hidrogênio verde até 2050 (GIZ, 2021). Devido à amplitude do mercado e à transição para uma economia de baixo carbono ser um processo global, é esperado que haja incentivos significativos em outros países, incluindo o Brasil (Hoppe *et al.*, 2023).

O desenvolvimento dessa cadeia produtiva enfrenta diversos desafios. Há uma variedade de tecnologias, métodos de produção, modelos de negócios, regulamentações e, especificamente para este estudo, requisitos de qualificação emergentes. Neste caso, a educação e habilidades profissionais destacam-se pela importância em uma economia de hidrogênio de baixo carbono funcional e competitiva. Habilidades são necessárias para fabricar sistemas e equipamentos técnicos, para a produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio de baixo carbono, bem como para a integração de sistemas associados. Tais habilidades são igualmente essenciais para a qualificação e operação do pessoal.

Neste contexto, surge pelo menos três questões cruciais: qual é o perfil espacial da distribuição das ocupações com habilidades e qualificações necessárias para o funcionamento competitivo da cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil? Houve alguma mudança nessa distribuição ao longo das duas décadas dos anos 2000 a 2020? Existe uma correspondência entre a distribuição do perfil ocupacional associado à economia de baixo carbono e os recursos necessários para a produção de hidrogênio com baixo teor de carbono no Brasil, como água e energia renovável para o hidrogênio verde?

Num cenário de expansão do mercado e de busca pela neutralidade das emissões de carbono até 2050, projeta-se que o crescimento dos setores de hidrogênio e células de combustível irá gerar novas oportunidades de emprego. Essas oportunidades tendem a ser distribuídas por uma ampla variedade de setores, exigindo diferentes habilidades, tarefas e perfis de qualificação, o que reforça a importância da força de trabalho técnico e científico nesse processo de transição energética.

O objetivo do estudo foi analisar a dinâmica espacial das ocupações tecnológicas e científicas associadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil. Além disso, o estudo busca identificar a distribuição e evolução dessas ocupações no território brasileiro no âmbito da indústria (extrativa e de transformação) e Eletricidade de Gás no Brasil. Para tanto, a pesquisa utiliza dados oficiais da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS/MTE), classifica 64 ocupações técnico-científicas (PoTec) (Suzigan *et al.*, 2006) com base no SENAI Nacional (Hoppe *et al.*, 2023) e na Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) de 2002, nos anos de 2006 e 2021.

O Artigo foi estruturada em três seções, além desta introdução e as considerações finais. Na próxima seção, revisitam-se os aspectos relacionados à transição energética e sustentabilidade. Na sequência, apresentam-se os aspectos metodológicos inerentes à pesquisa. Por fim, os principais resultados.

2 CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO E SUSTENTABILIDADE

A transição energética é um desafio global urgente, pois é crucial reduzir as emissões GEE e tornar a matriz energética mais sustentável. No caso brasileiro, a economia do hidrogênio de baixo carbono surge como uma alternativa promissora, dado o potencial solar significativo, com uma média de 6,5 kWh/m² por dia em muitas regiões, e um potencial instalável de 143 GW de energia eólica em todo o país (EPE, 2021). Além disso, as rotas de produção do hidrogênio de baixo carbono, especialmente por meio da eletrólise alcalina, podem garantir uma eficiência energética superior a 80%, além de fornecer alta pureza do hidrogênio e minimizar a geração de subprodutos indesejados (Lara; Richter, 2023). Isso confere ao Brasil uma vantagem competitiva na produção de hidrogênio de baixo teor de carbono, tal como o hidrogênio verde.

A viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde, por exemplo, está intimamente relacionada ao custo de produção e à eficiência das tecnologias envolvidas. Estimativas apontam para uma significativa redução nos custos da eletrólise com o avanço tecnológico, com projeções otimistas de uma redução adicional de 70% até 2030 em comparação com os custos atuais (IEA, 2022). Essa tendência é confirmada por experiências em países pioneiros nessa tecnologia, tais como na Alemanha, onde os

custos de produção de hidrogênio verde diminuíram substancialmente nos últimos anos (BMW, 2020).

A infraestrutura e logística relacionadas à produção e distribuição de hidrogênio verde são elementos críticos para a consolidação dessa cadeia produtiva emergente. O Brasil apresenta um potencial significativo, podendo alcançar uma capacidade de produção de 115 GW de hidrogênio verde até 2050 (EPE, 2021). No entanto, para atingir esse potencial, serão necessários investimentos consideráveis na expansão da infraestrutura de transporte e distribuição, a fim de viabilizar essa escala (EPE, 2022).

Neste contexto, a introdução do hidrogênio de baixo carbono na matriz energética brasileira desempenha um papel crucial na diversificação e no aumento da resiliência do sistema energético nacional (Lara; Richter, 2023). Atualmente, o Brasil depende fortemente da geração de energia hidrelétrica, o que o torna vulnerável a eventos climáticos extremos e variações sazonais (EPE, 2021). A integração do hidrogênio de baixo carbono em uma matriz energética mais diversificada pode mitigar esses riscos, proporcionando uma fonte de energia complementar e estável.

A transição para a economia do hidrogênio de baixo carbono também implica avaliação dos impactos socioeconômicos e ambientais. Estudos indicam a criação de empregos diretos e indiretos significativos, além de potenciais ganhos na balança comercial devido à exportação da cadeia produtiva do hidrogênio (EPE, 2022). No entanto, é imperativo considerar os aspectos ambientais, como a gestão sustentável da água e a pegada de carbono associada à produção (IEA, 2022).

Apesar do potencial evidente, a implementação da cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil enfrenta desafios significativos (Fernandes *et al.*, 2023). Dentre eles, destaca-se a necessidade de políticas públicas e de regulamentações que incentivem investimentos e promovam a competitividade do setor (BMW, 2020). A integração com a matriz energética existente e a resolução de questões logísticas são pontos cruciais a serem considerados (EPE, 2022), especialmente para evitar que a inserção internacional se limite à exportação em formato de *commoditie*, sem agregação tecnológica.

Além disso, o perfil ocupacional qualificado representa um elemento significativo na efetividade no fomento e integração da cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono nos países emergentes. Observa-se uma maior escassez de mão-de-obra qualificada na fabricação de eletrolisadores, na engenharia de sistemas de armazenagem do hidrogênio e de manutenção de

células de combustível, sobretudo em países africanos e da América do Sul (Olajide; Oluwafunmise; Olusola, 2023). Esses mesmos aspectos agravam-se quando analisados na perspectiva de grupos minoritários e de gênero, cujos percentuais são pouco representativos na população empregada na cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono (Sovacool *et al.*, 2020; MEC; GIZ; SENAI, 2023; Hoppe *et al.*, 2023; Olajide; Oluwafunmise; Olusola, 2023).

Estudos empíricos recentes têm reforçado o papel da qualificação da mão-de-obra para não só o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono e, portanto, do setor industrial associado às energias renováveis, como também do crescimento econômico de um determinado país. Ao se analisar os efeitos dos Gases de Efeito Estufa e de desempenho econômico em uma amostra de 35 países europeus com produção energética baseada em hidrogênio de baixo carbono, Xu, Chou e Zhang (2019) inferiram que a variável de mão-de-obra empregada foi elemento-chave para o crescimento econômico, robustecida principalmente quando envolvidas as variáveis *dummy* de estabilidade política e de valor agregado.

Por sua vez, o caso chinês é um demonstrativo de sucesso na agregação de valor à cadeia produtiva de energia renovável. Em mais de três décadas, o país deu suporte ao desenvolvimento dos setores de energias eólica e solar através de substanciais subsídios, de estabilidade política, de segurança jurídica aos investimentos produtivos e do desenvolvimento de uma mão-de-obra qualificada necessária à transição energética em sinergia com as demandas industriais, fatores esses que favoreceram a adoção de uma economia de baixo carbono também associada ao hidrogênio (Chen; Lees, 2016; Eicke; De Blasio, 2022; Sarsar, 2025).

Considerado como um dos países com maior potencial exportador de hidrogênio de baixo carbono no mundo, a Austrália apresentou mais de 100 projetos de investimento produtivo no setor (Irena, 2022). Para tratar-se de um setor estratégico para o governo australiano, e para contribuir para a redução de lacunas tanto de mão de obra quanto tecnológica, a percepção industrial tem se direcionada à produção e manutenção de eletrolisadores, ao armazenamento de células de combustível de hidrogênio e seus subprodutos, bem como à implantação de estações de abastecimento (Beasy *et al.*, 2023). No entanto, ainda não há consenso entre os industriais do país quanto à proporção dessa mão de obra comprometida que será afetada no horizonte de cinco anos, sobretudo diante das incertezas relacionadas aos perfis técnico-tecnológicos necessários (Beasy *et al.*, 2023).

À luz da literatura empírica internacional recente, é imperativo que o Brasil disponha de profissionais devidamente capacitados e especializados para atuar nessa cadeia produtiva. Esses indivíduos devem possuir um nível de qualificação compatível com as exigências técnicas e operacionais inerentes à produção e distribuição do hidrogênio de baixo carbono. Tal perfil habilita não apenas a eficiência e segurança dos processos, como também impulsiona a inovação e a competitividade no mercado de energia renovável. Portanto, a formação e capacitação de profissionais com expertise específica na economia do hidrogênio de baixo carbono emerge como um componente estratégico para o sucesso e a sustentabilidade dessa transição energética. Entretanto, a falta de programas padronizados de treinamento e de plataformas de certificação podem criar entraves na migração da mão-de-obra presente no setor energético tradicional à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono (Worley, 2022). Quando trazidos à realidade dos países emergentes, esses mesmos entraves agravam-se por conta do *gap* tecnológico e de uma infraestrutura mais fragilizada (Olajide; Oluwafunmise; Olusola, 2023).

Assim, a economia do hidrogênio de baixo carbono apresenta um potencial transformador para a sustentabilidade energética em países do Sul Global. Analogamente, na África do Sul, estima-se que o potencial econômico de se desenvolver uma cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono pode gerar 650 mil novos empregos diretos e indiretos, seja em atividades com viés exportador ou ainda em uso doméstico de seus subprodutos (DHET, 2024). Com recursos abundantes e uma trajetória de redução de custos, o Brasil está bem posicionado para liderar nessa transição (IEA, 2022). No entanto, é importante superar desafios regulatórios e logísticos para efetivar plenamente esse potencial. A literatura empírica internacional contribuiu para evidenciar o papel fundamental da qualificação do capital humano em prol do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio (Xu; Chou; Zhang, 2019; Sovacool *et al.*, 2020; Beasy *et al.*, 2023; Hjeij *et al.*, 2023).

Porém, ainda há lacunas quanto ao entendimento da mão-de-obra existente migrar para atividades relacionadas à cadeia produtiva do hidrogênio (Worley, 2022; Beasy *et al.*, 2023; Olajide; Oluwafunmise; Olusola, 2023), como também quanto à mão-de-obra em potencial a ser desenvolvida para atender às demandas industriais, considerando os diferentes perfis técnicos e tecnológicos (Veras, 2023), e os aspectos regionais (Bezerra, 2021). O artigo, portanto, visa colaborar para melhor compreensão dos aspectos citados e avançar na agenda de pesquisa para promoção e desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio renovável no Brasil.

3 FONTE DE INFORMAÇÕES E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A emergência da economia do hidrogênio de baixo carbono como vetor estratégico da transição energética global tem impulsionado transformações estruturais na organização das cadeias produtivas e nas exigências ocupacionais dos sistemas industriais. Tais transformações envolvem a crescente demanda por força de trabalho qualificada, sobretudo em ocupações de perfil técnico-científico capazes de operar e desenvolver tecnologias relacionadas à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do hidrogênio (Irena, 2022; IEA, 2021).

Estudos internacionais vêm destacando o papel central do hidrogênio na descarbonização de setores intensivos em energia, como o transporte pesado, a siderurgia e a indústria química (IEA, 2021). A *International Renewable Energy Agency* (Irena, 2022) ressalta que a transição para o hidrogênio verde poderá reconfigurar não apenas os mercados energéticos globais, mas também a geografia dos empregos industriais, com o surgimento de novas cadeias de valor e de centros produtivos especializados. Nesse contexto, a força de trabalho torna-se um elemento estratégico, sendo necessário antecipar demandas por competências e reorganizar sistemas de formação profissional.

De modo complementar, o World Economic Forum (WEF, 2020) alerta que a transição energética e digital deve gerar uma transformação profunda nas ocupações e qualificações demandadas. Tecnologias emergentes como o hidrogênio de baixo carbono requerem perfis profissionais com elevada densidade tecnológica e domínio de processos interdisciplinares, muitas vezes ainda ausentes nos perfis ocupacionais tradicionais. No âmbito nacional, Hoppe *et al.* (2023) propõem uma classificação das ocupações ligadas à cadeia do hidrogênio e destacam a urgência de alinhar as políticas de capacitação técnica às necessidades futuras do setor.

Entretanto, tal alinhamento deve considerar não apenas o cargo ocupado formalmente, mas também o conjunto de habilidades e competências que esse cargo permite desenvolver no interior das unidades produtivas. Nesse sentido, Suzigan *et al.* (2006) já haviam enfatizado a importância de investigar os perfis técnicos, tecnológicos e científicos das atividades produtivas, grupo de profissões que os autores denominaram como Pessoal Ocupado Técnico-Científico (PoTec). No esforço de investigação deste tipo de perfil os autores propõem uma tipologia que distingue três grandes grupos ocupacionais:

(i) **ocupações tecnológicas**, como engenheiros, físicos, químicos e biólogos, caracterizadas por elevados níveis de escolaridade formal e atuação em funções fundamentais para os processos inovativos;

(ii) **ocupações técnicas**, como técnicos especializados em áreas específicas, que, embora exijam níveis intermediários de escolaridade, desempenham papéis relevantes na estrutura hierárquica das unidades produtivas e nos processos de geração e difusão de conhecimento;

(iii) e **ocupações operacionais**, como montadores e operadores de máquinas, que, apesar de exigirem menor grau de formação formal, demandam capacidades técnicas elevadas e habilidades práticas associadas às rotinas produtivas.

A principal vantagem da abordagem analítica baseada no conceito de PoTec reside na possibilidade de realizar investigações a partir de microdados censitários da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), que abrangem o universo de aproximadamente 97% do emprego formal no Brasil (Albuquerque *et al.*, 2019). Essa abordagem permite a análise detalhada da força de trabalho a partir de variáveis estruturais relevantes, tais como a Classe da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) em que o trabalhador está inserido, a Classificação Brasileira de Ocupações (CBO), o nível de escolaridade, a faixa etária, a cor/raça, o sexo e a remuneração.

Nesse contexto, o primeiro passo para a construção dos resultados apresentados neste estudo consistiu na extração dos microdados da população ocupada formal com vínculos ativos em 31 de dezembro de cada ano, entre os anos de 2006 a 2021. A amostra foi delimitada às atividades econômicas pertencentes às seções B (Indústrias Extrativas), C (Indústrias de Transformação) e D (Eletricidade e Gás) da CNAE 2.0, que compõem os segmentos diretamente vinculados à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono, conforme delimitação proposta pelo Hoppe *et al.* (2023).

Na sequência da análise, foi aplicado um filtro com o objetivo de delimitar as ocupações vinculadas às atividades de baixo carbono. Para tanto, adotou-se a metodologia proposta pela Hoppe *et al.* (2023), utilizando a Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) em seu nível mais desagregado, de seis dígitos. A partir desse procedimento, foram identificadas 64 ocupações compatíveis com a lógica tecnológica da economia do hidrogênio de baixo carbono no Brasil.

Posteriormente, essas ocupações mapeadas na segunda etapa foram classificadas com base na tipologia do Pessoal Ocupado Técnico-Científico

(PoTec), conforme delineado por Suzigan *et al.* (2006), com o intuito de destacar os perfis ocupacionais de maior densidade tecnológica e científica. A relação completa das ocupações selecionadas, bem como sua respectiva classificação segundo a taxonomia PoTec, encontra-se disponível no Apêndice A.

Por fim, com base nos códigos de município dos estabelecimentos em que o trabalhador atua, os dados foram agrupados conforme a correspondência com sua respectiva microrregião geográfica, que consiste numa subdivisão territorial criada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) que agrupa municípios com características econômicas e sociais semelhantes, com o objetivo de facilitar a análise e o planejamento regional. Essas regiões são compostas por um conjunto de municípios vizinhos com interações relevantes, como fluxos de comércio, serviços, trabalho e infraestrutura (IBGE, 1990).

Para a execução dos procedimentos analíticos descritos, foi utilizado o *software* estatístico Stata 15, empregado nas etapas de extração, tratamento, correspondência e tabulação dos microdados utilizados na pesquisa. Adicionalmente, para a representação espacial das tendências regionais, recorreu-se ao *software* de geoprocessamento QGIS, na versão 3.4.3, permitindo a visualização dos resultados por meio da classificação regional em microrregiões geográficas do IBGE e por unidades da federação.

4 RESULTADOS

Ao longo desta seção, apresentam-se os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos indicados anteriormente. Inicialmente, na subseção 4.1, apresenta-se a trajetória das ocupações associadas à economia do hidrogênio no Brasil. Em seguida, na subseção 4.2, investiga-se a distribuição espacial dessas ocupações ao longo dos anos entre 2006 e 2021.

4.1 OCUPAÇÕES TÉCNICAS E CIENTÍFICAS NA CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

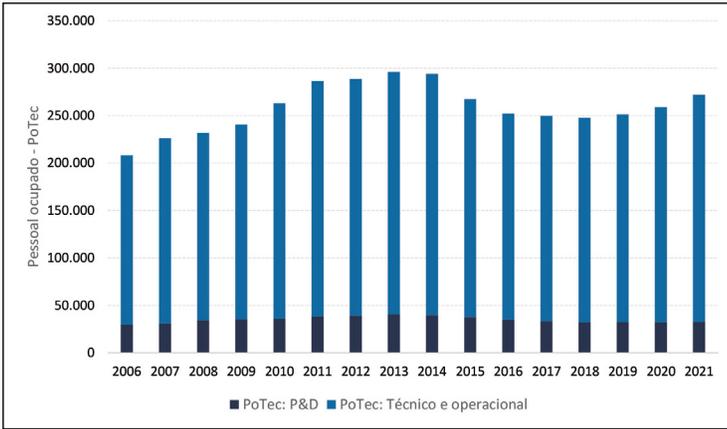
A trajetória da população formal ocupada em ocupações técnico-científicas vinculadas à cadeia produtiva da economia do baixo carbono apresentou um comportamento cíclico ao longo dos anos analisado. A partir de 2006, é percebido um movimento de crescimento contínuo até o ano de 2013, quando foi registrado o ápice de 295.832 vínculos empregatícios

formais. No período subsequente, teve início uma fase de retração, que se estendeu até 2018, ano em que o número de ocupações atingiu o ponto mais baixo da série, com 247.474 vínculos. A partir desse vale, iniciou-se uma recuperação gradual, embora ainda modesta, culminando em 271.757 vínculos em 2021.

Esse crescimento mais acelerado do primeiro momento, sugere um processo de convergência da implementação de importantes políticas públicas da primeira década dos anos 2000. Nesse período, o Estado brasileiro avançou significativamente na consolidação de instituições voltadas à Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), bem como na formulação de políticas de financiamento e na adoção de ampla legislação de incentivo. Adicionalmente, a conjuntura favorável caracterizada pelo crescimento da economia nacional e o comprometimento governamental como o Programa de Aceleração do Crescimento, a Política de Desenvolvimento Produtivo (2008-2010) e o Programa de Sustentação do Investimento (2009-2015) buscaram impulsionar o setor industrial e, conseqüentemente, o perfil ocupacional PoTec, que engloba atividades técnicas e operacionais relacionadas à economia e à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono. Parte dessa impulsão ao pessoal técnico ocupado deve-se aos programas de apoio à engenharia, como é o caso do BNDES Proengenharia, cujo aporte foi direcionado a empresas dos setores automobilístico, defesa, nuclear, energias renováveis, petróleo e gás e demais biocombustíveis, sendo um dos maiores aportes realizados pelo banco de desenvolvimento dentro dos programas de enfoque setorial (Machado; Roitman, 2015; Ellery; Nascimento; Sachsida, 2018).

Por outro lado, a redução do perfil ocupacional PoTec nos anos 2014-2021 pode ser atribuída a um conjunto de fatores interligados nos planos nacional e internacional. Destaca-se, nesse contexto, o cenário macroeconômico adverso, marcado por polícrises e recessões (Monteiro Neto; Colombo; Rocha Neto, 2023), que comprometeu a capacidade de absorção da mão de obra qualificada, inclusive em áreas estratégicas como energia e hidrogênio. Soma-se a isso a instabilidade institucional e regulatória, agravada pela descontinuidade das políticas industriais e pela retração dos investimentos públicos em Ciência, Tecnologia e Inovação – C,T&I (Arbix, 2019; Pinho, 2022), que desestruturaram os mecanismos de indução tecnológica e limitaram a expansão de projetos inovadores. Por fim, a concentração geográfica dessas ocupações pode ter gerado entraves à mobilidade profissional, reduzindo a difusão regional das oportunidades no segmento técnico-científico vinculado à economia de baixo carbono.

Gráfico 1 – Trajetória do pessoal ocupado Técnico-científico (PoTec) associado à economia do hidrogênio de baixo carbono para Indústria (extrativa e de transformação) e Eletricidade de Gás no Brasil, 2006-2021



Fonte: Elaboração própria com base nos dados brutos da RAIS (2023).

Do ponto de vista dos grupos ocupacionais PoTec, em média, foram empregados 34.888 profissionais associados à pesquisa e desenvolvimento na cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, enquanto as ocupações ligadas às atividades técnicas e operacionais totalizaram 223.403 ocupações no mesmo período. As tendências observadas para essas ocupações refletiram o padrão geral, com um crescimento leve de 2006 a 2013, seguido por uma leve retração nos anos seguintes, especialmente no que diz respeito ao perfil ocupacional dos profissionais técnicos e operacionais.

Em síntese, esses resultados mostram que, em geral, a trajetória das ocupações técnicas e científicas associadas à economia do hidrogênio de baixo carbono no Brasil foram influenciadas por períodos de implementação de políticas públicas favoráveis ao desenvolvimento institucional na área de ciência, tecnologia e inovação, além de programas de estímulo econômico, especialmente em período de crescimento. Já a redução posterior pode ser explicada por fatores como crises econômicas, instabilidade política e incertezas regulatórias, que impactaram a demanda por profissionais qualificados. Essas flutuações indicam desafios na mobilidade e realocação desses profissionais, especialmente em regiões menos desenvolvidas, como o Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil.

4.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS OCUPAÇÕES POTEK ASSOCIADAS A CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO NO BRASIL

O Brasil é marcado historicamente pela heterogeneidade estrutural (Saboia *et al.*, 2018), o que se reflete na distribuição desigual das ocupações associadas à economia do hidrogênio de baixo carbono. Regiões menos desenvolvidas não só possuem uma base técnico-científica menos robusta, como também enfrentam desafios na transmissão de conhecimento e de tecnologia. Essa disparidade é crucial ao se considerar políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) para o desenvolvimento regional, especialmente diante da crescente importância dessas políticas em âmbito nacional. A capacidade de conciliar políticas regionalizadas de CT&I com critérios de excelência na alocação de recursos é fundamental para promover uma distribuição mais equitativa do desenvolvimento tecnológico e econômico entre as regiões brasileiras.

Do ponto de vista de distribuição local do perfil ocupacional PoTec, o Sudeste brasileiro apresenta historicamente a maior participação em ocupações PoTec vinculadas à economia do hidrogênio de baixo carbono, superando mais de 50% ao longo de toda série histórica. Em sequência, tem-se a região Sul (19,6%), Norte (10,2%), Nordeste (9,7%) e Centro-Oeste (3,4%), por ordem decrescente de absorção do perfil ocupacional.

Embora a região Sudeste se mantenha como a principal concentradora das ocupações, é notória a tendência gradativa de redução de sua participação relativa, especialmente nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Entre 2006 e 2021, a participação conjunta desses dois estados no total nacional apresentou uma redução de 8,3 pontos percentuais, passando de 50,5% em 2006 para 42,2% em 2021. Por outro lado, os estados que mais ampliaram sua participação relativa no período foram Santa Catarina, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, cuja participação conjunta evoluiu de 18,1% em 2006 para 23,5% em 2021, indicando uma reconfiguração gradual da geografia das ocupações de base tecnológica no país associada à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono.

A tendência de redução da participação relativa da região Sudeste, particularmente de São Paulo e de Minas Gerais, pode ser compreendida à luz de processos mais amplos de desconcentração espacial do desenvolvimento industrial e tecnológico no Brasil, fenômeno já observado por diferentes estudos (Diniz, 1993; Monteiro Neto; Silva; Severian, 2021, 2023).

No início da década de 1990, Diniz (1993) já sinalizava que o modelo de desenvolvimento brasileiro, historicamente concentrado na região Sudeste, encontrava-se em um processo de desconcentração territorial da atividade industrial. Segundo o autor, esse movimento era caracterizado pela expansão dos investimentos industriais para um polígono geoeconômico emergente, que tinha início na Região Metropolitana de Belo Horizonte, atravessava o Triângulo Mineiro, estendia-se pelo interior dos estados de São Paulo e Paraná, alcançava a Região Metropolitana de Porto Alegre e progredia até as regiões de Florianópolis e entorno da própria Região Metropolitana de São Paulo.

As tendências de desconcentração produtiva inicialmente apontadas por Diniz (1993) mantiveram-se ao longo das décadas seguintes e, em determinados contextos, ampliaram seu escopo. Essa dinâmica é confirmada pelos estudos de Monteiro Neto, Silva e Severian (2021), que analisaram o período de 1995 a 2015, evidenciando a continuidade do processo de difusão espacial das atividades industriais e tecnológicas.

Em uma análise mais recente, os mesmos autores (Monteiro Neto; Silva; Severian, 2023) estenderam a investigação para o período de 2015 a 2018, reiterando a persistência da desconcentração regional, embora com indícios de arrefecimento na intensidade do processo nos anos mais recentes. Tais resultados sugerem uma reconfiguração dinâmica e não linear da geografia produtiva nacional, condicionada por fatores macroeconômicos, institucionais e setoriais.

Adicionalmente, a ascensão do estado do Rio de Janeiro no contexto das ocupações técnico-científicas pode ser explicada pela vocação histórica do estado na indústria extrativa de petróleo e gás natural e à presença de grandes corporações nacionais, como a Petrobras, que exercem papel central no desenvolvimento, difusão de tecnologias no segmento e ocupação da população deste perfil. Tais elementos contribuem diretamente para a atração e ampliação destas ocupações no território fluminense.

Esses padrões de desconcentração também se manifestam no âmbito da atividade tecnológica, conforme demonstrado por Mota (2022) em seu estudo sobre a dinâmica espacial do esforço inventivo no Brasil entre 2000 e 2011. A autora identifica uma tendência de desconcentração progressiva da atividade tecnológica, anteriormente concentrada na Região Metropolitana de São Paulo, que se desloca, sobretudo, para as regiões Sul e Nordeste, como o Oeste Catarinense, Oeste Paranaense, Grande Florianópolis, Joinville, Leste Potiguar, Natal e Aracaju.

Entretanto, embora a descentralização da atividade inventiva seja evidente, a proeminência da região Sudeste permanece notória, especialmente em virtude de suas atividades econômicas, avanços tecnológicos e infraestrutura industrial no país. Esse cenário confere maior capacidade às regiões mais desenvolvidas e urbanizadas, como os estados do Sul, para atrair e absorver profissionais com perfil mais qualificado (Mota, 2022).

Além disso, as vantagens da proximidade geográfica e da aglomeração têm um papel crucial na formação de ocupações com níveis elevados de conhecimento técnico, científico e operacional. A ideia-chave aqui é que a distribuição regional de oportunidades e capacidades não são homogêneas e que as condições de apropriabilidade, de incentivos econômicos à atividade tecnológica e a natureza das atividades inventiva-inovativa também diferem entre as distintas estruturas regionais.

O desempenho do estado do Amazonas no perfil ocupacional PoTec, caracterizado por ocupações potencialmente adaptáveis à economia do hidrogênio, pode ser parcialmente atribuído à política histórica de desenvolvimento regional promovida pelo governo federal, materializada na criação e consolidação da Zona Franca de Manaus (ZFM). Desde a década de 1970, a ZFM tem proporcionado incentivos fiscais significativos com o objetivo de induzir a industrialização na região Norte, em especial por meio do Polo Industrial de Manaus (PIM), cuja estrutura produtiva foi fortemente marcada pela presença da indústria difusora de tecnologia e de bens duráveis (Diniz; Santos, 1995; Saboia; Kubrusly; Barros, 2014).

Essa base industrial consolidada pode ter contribuído para a manutenção do Amazonas como o principal estado da região Norte em termos absolutos e relativos no indicador apresentado na Tabela 1. Em 2021, o estado concentrou 21.517 ocupações, o que representa 7,9% do total nacional e 73% do total da região Norte, mantendo-se estável em relação às décadas anteriores. Essa resiliência estrutural reforça a hipótese de que políticas de industrialização regionais têm efeitos de longo prazo sobre a qualificação e alocação da força de trabalho, o que se traduz em maior capacidade de adaptação a novas fronteiras tecnológicas, como a economia do hidrogênio.

Por fim, prevalece a necessidade de mencionar a relativa expansão das ocupações PoTec na região Nordeste durante o período investigado. Em termos percentuais, a região ampliou sua participação de 8,2 pontos percentuais em 2006 para 11 pontos em 2021, conforme apresentado na Tabela 1. Esse resultado pode estar diretamente relacionado aos

investimentos em energias renováveis nas últimas décadas, como a implantação de parques eólicos e solares, que impulsionaram a demanda por profissionais com perfil técnico e operacional na região (Silva, 2015). Ademais, agendas de investimento público e privado, direcionadas ao enfrentamento das mudanças climáticas, impulsionaram a expansão dos investimentos na cadeia de valor de energias renováveis, consolidando o Nordeste como referência na geração e uso de energias limpas e sustentáveis no Brasil (Monteiro Neto; Colombo; Rocha Neto, 2023).

Tabela 1 – Brasil, Regiões e Unidades Federativas –Total da População Ocupada PoTec para indústria (extrativa e de transformação) e Eletricidade de Gás e participação relativa (%), em períodos selecionados

Região/UF	em termos absolutos (unidades)				em termos relativos (em%)			
	2006	2011	2016	2021	2006	2011	2016	2021
Sudeste	124.104	168.295	140.789	144.268	59,6	58,8	55,9	53,1
Minas Gerais	25.864	35.549	27.615	30.595	12,4	12,4	11,0	11,3
Espírito Santo	2.860	4.162	4.438	5.499	1,4	1,5	1,8	2,0
Rio de Janeiro	16.097	23.553	22.713	24.210	7,7	8,2	9,0	8,9
São Paulo	79.283	105.031	86.023	83.964	38,1	36,7	34,1	30,9
Sul	35.712	54.081	51.728	56.041	17,2	18,9	20,5	20,6
Paraná	14.059	18.123	16.322	16.335	6,8	6,3	6,5	6,0
Santa Catarina	10.244	19.732	18.505	22.257	4,9	6,9	7,3	8,2
Rio Grande do Sul	11.409	16.226	16.901	17.449	5,5	5,7	6,7	6,4
Norte	25.714	30.239	23.176	29.481	12,4	10,6	9,2	10,8
Rondônia	530	485	722	1.312	0,3	0,2	0,3	0,5
Acre	154	121	145	538	0,1	0,0	0,1	0,2
Amazonas	21.788	25.694	16.654	21.517	10,5	9,0	6,6	7,9
Roraima	156	164	237	148	0,1	0,1	0,1	0,1
Pará	2.613	2.850	3.988	4.429	1,3	1,0	1,6	1,6
Amapá	172	442	447	357	0,1	0,2	0,2	0,1
Tocantins	301	483	983	1.180	0,1	0,2	0,4	0,4
Nordeste	17.024	26.207	26.306	29.767	8,2	9,2	10,4	11,0
Maranhão	659	893	1.424	1.880	0,3	0,3	0,6	0,7
Piauí	356	503	603	713	0,2	0,2	0,2	0,3
Ceará	2.613	2.779	3.269	4.062	1,3	1,0	1,3	1,5
Rio Grande do Norte	1.042	2.267	1.965	2.354	0,5	0,8	0,8	0,9
Paraíba	663	1.960	1.906	2.048	0,3	0,7	0,8	0,8
Pernambuco	3.559	4.810	5.754	6.863	1,7	1,7	2,3	2,5
Alagoas	1.014	1.485	1.517	1.084	0,5	0,5	0,6	0,4
Sergipe	1.729	2.148	3.050	1.469	0,8	0,8	1,2	0,5
Bahia	5.389	9.362	6.818	9.294	2,6	3,3	2,7	3,4
Centro-Oeste	5.526	7.552	10.068	12.200	2,7	2,6	4,0	4,5
Mato Grosso do Sul	836	1.353	2.121	2.715	0,4	0,5	0,8	1,0
Mato Grosso	1.409	1.890	2.540	3.403	0,7	0,7	1,0	1,3
Goiás	2.645	3.563	4.285	5.062	1,3	1,2	1,7	1,9
Distrito Federal	636	746	1.122	1.020	0,3	0,3	0,4	0,4
Brasil	208.080	286.374	252.067	271.757	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria com base nos dados brutos da RAIS (2023).

Nesse contexto, apesar de um aumento significativo na participação da Região Nordeste, que passou de 8,2% para 11% das ocupações Potec associadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono entre 2006 e 2021, o eixo Sul-Sudeste manteve sua liderança, concentrando 63,9% do total nacional. Essa permanência se explica, em parte, pela infraestrutura já consolidada, como a elevada densidade de subestações que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), e pela relativa estagnação do Norte e Nordeste, cujos ganhos não acompanharam, em termos de pessoal qualificado, a expansão das fontes de energia eólica e solar no mesmo período (Cantane; Ando Junior; Hamerschmidt, 2020). O cenário reforça a necessidade de políticas públicas que promovam a qualificação profissional e a interiorização dos investimentos em renováveis como estratégia para ampliar os efeitos econômicos da transição energética de forma regionalmente equilibrada.

Por fim, ao aprofundar a análise das ocupações técnico-científicas voltadas à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), especificamente aquelas associadas à cadeia do hidrogênio de baixo carbono, constata-se uma elevada concentração espacial dessas atividades no território brasileiro (Figura 1). Regiões como Rio de Janeiro, São Paulo, Campinas, Macaé, Belo Horizonte e Curitiba se consolidam como polos de conhecimento e inovação, por abrigarem instituições de pesquisa, universidades de excelência e empresas líderes nos setores energético, petrolífero e de gás. A especialização produtiva e tecnológica desses territórios contribui para a centralização de ocupações PoTec voltada para funções de P&D nesse segmento emergente da economia de baixo carbono.

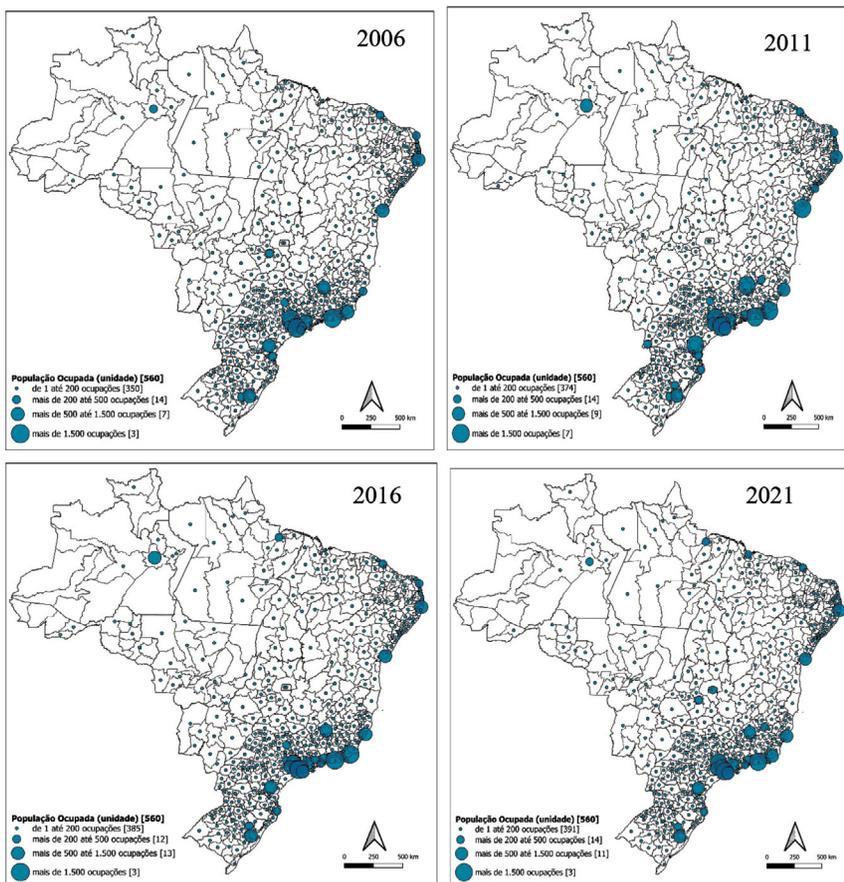
Além disso, essa concentração tende a estar intimamente relacionada à atratividade dessas regiões para investimentos em tecnologia e desenvolvimento, com a presença de incentivos fiscais, políticas de estímulo à inovação e investimentos governamentais em infraestrutura (Mota, 2022). Esses fatores estimulam a formação de uma mão de obra altamente qualificada, composta por pesquisadores, engenheiros e profissionais técnicos, especializados em tecnologias relacionadas à cadeia do hidrogênio.

Neste contexto, a interação entre instituições de pesquisa, universidades e indústrias estabelecidas nesses centros tende a fomentar um ambiente propício à cooperação e ao desenvolvimento de novas tecnologias, criando um ciclo virtuoso que favorece a concentração de profissionais qualificados nessas regiões. Isto porque essas regiões possuem tendência a concentrar organizações públicas e empresas privadas que

se beneficiam da co-localização, aglomeração e circulação localizada de conhecimento (Mieszkowski; Barbero, 2020). A aglomeração desses atores tende a estar associada aos sistemas institucionais que apoiam a difusão e troca de conhecimento, colaboração e interações fundamentais para os processos inventivos-inovativos (Mota, 2022).

Assim, a concentração de ocupações em P&D nas microrregiões analisadas revela-se como resultado de uma combinação de fatores estruturais e institucionais, destacando-se os incentivos governamentais, a qualificação da força de trabalho e a articulação entre os setores público e privado. Esses elementos contribuem para a formação de um ecossistema propício ao avanço tecnológico e à inovação, com destaque para a cadeia do hidrogênio de baixo carbono.

Figura 1 – PoTec: P&D no Brasil, em períodos selecionados (2006; 2011; 2016; 2021)



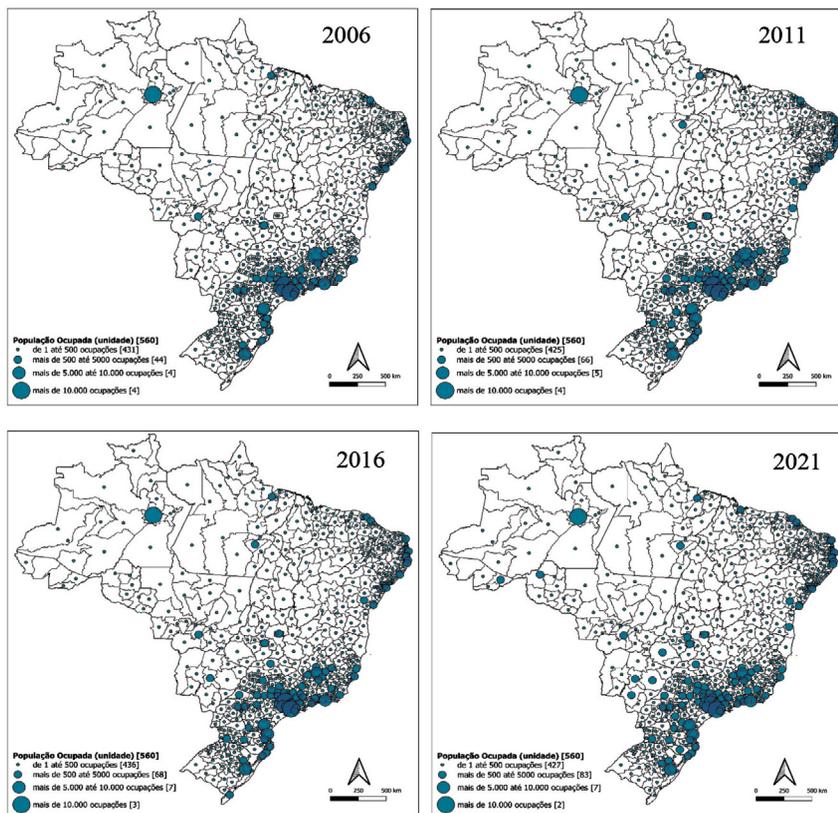
Fonte: Elaboração própria com base nos dados brutos da RAIS (2023).

No contexto das ocupações técnicas e operacionais relacionadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, entre 2006 e 2021, observa-se uma concentração significativa dessas funções nos centros urbanos do país. Esses polos concentram instituições de ciência e tecnologia (ICTs), universidades industriais e parques tecnológicos situados nas proximidades das principais aglomerações, onde se localizam a maior parte da população empregada. Essa dinâmica regional se assemelha à observada nas ocupações externas à pesquisa e desenvolvimento (P&D) na China, onde a proximidade geográfica entre empresas de um mesmo setor e universidades é considerada uma condição essencial para o fortalecimento das capacidades regionais de inovação — especialmente em atividades ligadas às áreas da Saúde e do setor elétrico (Li; Xing, 2020; Rudkin; He; Chen, 2020).

De forma análoga, o caso brasileiro reforça a concentração das atividades de P&D na Região Sudeste por conta de uma maior concentração de instituições de pesquisa, subestações elétricas interligadas ao Sistema Nacional e próximas aos potenciais demandantes de hidrogênio de baixo carbono, sejam eles industriais ou de setores transversais, como o de mobilidade. Assim, mesmo diante dos representativos aumentos na geração de energia fotovoltaica e eólica, a dispersão espacial das demais instituições componentes do sistema regional dificultam não somente uma maior coaglomeração de inovação entre universidades/centros de pesquisa e indústria, conforme observado no caso chinês (Rudkin; He; Chen, 2020), e, portanto, menor propensão da PoTec de migrar para os centros urbanos das regiões Norte e Nordeste.

A análise da distribuição das ocupações técnicas e operacionais relacionadas à economia do hidrogênio de baixo carbono entre 2006 e 2021 revela uma forte concentração regional, com destaque para as microrregiões de São Paulo e Manaus. Embora ambas concentrem significativa população ocupada com perfil técnico, apresentam características estruturais distintas: São Paulo, com sua base industrial diversificada, forte densidade tecnológica e integração com cadeias globais de valor, atrai profissionais qualificados a partir de uma articulação robusta entre universidades, centros de P&D e grandes corporações; Manaus, por sua vez, reflete os efeitos da política de incentivos da Zona Franca, com especialização na indústria eletroeletrônica e de bens duráveis, o que sustentou um polo técnico relevante na região Norte, mesmo em um contexto de menor densidade industrial em seu entorno.

Figura 2 – PoTec: Técnicos e Operacionais no Brasil, em períodos seleccionados (2006; 2011; 2016; 2021)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados brutos da RAIS (2023).

Por outro lado, há uma preocupação com a redução de ocupações em microrregiões tradicionalmente industriais, como Campinas, Belo Horizonte e outras no Sul e Sudeste. Esse declínio pode estar relacionado à desindustrialização (Monteiro Neto, Silva, Severian, 2021; Morceiro, 2018), que afeta negativamente a atividade industrial nessas regiões. Em contrapartida, há um aumento nas ocupações técnicas e operacionais em microrregiões que investiram em energias renováveis, como eólica e solar, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, fator impulsionado por políticas de desenvolvimento regional.

Em suma, os resultados evidenciam a persistência de uma concentração regional das ocupações técnicas e operacionais potencialmente associadas à economia do hidrogênio de baixo carbono, com destaque contínuo para os polos industriais consolidados nas regiões Sudeste e Norte, especialmente

São Paulo e Manaus. A trajetória observada entre 2006 e 2021 reforça a necessidade de acompanhamento qualificado dessas dinâmicas ocupacionais, de modo a orientar estratégias mais equilibradas de desenvolvimento produtivo e tecnológico em diferentes regiões do país.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a dinâmica das ocupações técnico-científicas (PoTec) associadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, com foco nos setores industrial, de gás e eletricidade, no período de 2006 a 2021. Os resultados demonstraram um crescimento significativo dessas ocupações até 2013, impulsionado por políticas públicas voltadas à ciência, tecnologia e inovação, seguido por uma retração nos anos seguintes, associada a crises econômicas, descontinuidade institucional e incertezas regulatórias.

A análise espacial indica forte concentração das ocupações Potec nas Regiões Sudeste e Sul, em especial as microrregiões de São Paulo, Rio de Janeiro, Campinas e Belo Horizonte, que apresentam elevada densidade tecnológica, infraestrutura industrial consolidada e maior presença de instituições. Por outro lado, embora as regiões Norte e Nordeste tenham ampliado sua participação relativa — especialmente o Nordeste, que passou de 8,2% em 2006 para 11% em 2021 —, os avanços observados ainda refletem desafios relacionados à consolidação de ecossistemas regionais de ciência, tecnologia e inovação. Apesar da presença de importantes instituições e de iniciativas na área técnico-científica, essas regiões enfrentam limitações estruturais e assimetrias históricas que impactam a capacidade de expansão e interiorização das ocupações vinculadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono, sobretudo nas atividades de maior densidade tecnológica.

Nesse contexto, marcos recentes como a Lei nº 14.948/2024 (Brasil, 2024), que institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, e a política da Nova Indústria Brasil (NIB), com metas associadas à bioeconomia, descarbonização e segurança energética, representam oportunidades institucionais relevantes para impulsionar esse processo. Ambos os instrumentos podem contribuir para a expansão da demanda por ocupações técnico-científicas, sobretudo ao promoverem maior previsibilidade regulatória, incentivo à inovação e estímulo à formação de capital humano qualificado e associados à Potec vinculadas à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono no Brasil.

Assim, o aprofundamento das políticas públicas voltadas à descentralização da base científico-tecnológica é essencial para viabilizar a transição energética em todo o território nacional, ampliando os benefícios econômicos e sociais da economia do hidrogênio de baixo carbono. Futuros estudos podem investigar a efetividade desses marcos legais e programáticos na indução de novas ocupações PoTec, bem como avaliar o impacto de políticas regionais na redução das disparidades estruturais entre as regiões brasileiras.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. H.; SAAVEDRA, C. A. P. B.; MORAIS, R. L.; ALVES, P. F.; PENG, Y. **Na era das máquinas, o emprego é de quem?:** estimativa da probabilidade de automação de ocupações no Brasil. Brasília, DF: Ipea, 2019. (Texto para Discussão No. 2457).
- ARBIX, G. Innovation policy in Brazil since 2003: advances, incoherencies, and discontinuities. *In*: REYNOLDS, E. B.; SCHNEIDER, B. R.; ZYLBERBERG, E. (ed.). **Innovation in Brazil: advancing development in the 21st Century.** Nova York: Routledge, 2019. p. 73-89.
- BEASY, K. *et al.* Skilling the green hydrogen economy: A case study from Australia. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 48, n. 52, p. 19811-19820, 2023.
- BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 6, n. 212, p. 1-13, 2021.
- BMW. The National Hydrogen Strategy. **BMW**, [s. l.], 2020. Disponível em: https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Acesso em: 08 nov. 2024.
- BRASIL. Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2. **Ministério de Minas e Energia**, Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbon [...]. Brasília, DF: Presidência da República, [2024]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 17 set. 2024.

CANTANE, D. A.; ANDO JUNIOR, O. H.; HAMERSCHMIDT, M. B. **Tecnologias de armazenamento de energia aplicadas ao setor elétrico brasileiro**. São Carlos, SP: Scienza, 2020.

CHEN, G. C.; LEES, C. Growing China's renewables sector: a developmental state approach. **New Political Economy**, Abingdon, v. 21, n. 6, p. 574-586, 2016.

CLARK II, W. W.; RIFKIN, J. A green hydrogen economy. **Energy Policy**, Oxford, v. 34, n. 17, p. 2630-2639, 2006.

DHET. **Identification of Skills Needed for the Hydrogen Economy**: research report. Pretoria: Department of Higher Education and Training, 2024.

DINIZ, C. C. Desenvolvimento poligonal no Brasil: nem desconcentração, nem contínua polarização. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 35-64, 1993.

DINIZ, C. C.; SANTOS, F. B. **Manaus**: uma satellite platform na região amazônica. Belo Horizonte: Cedeplar, 1995. (Texto para Discussão No. 85).

EICKE, L.; DE BLASIO, N. Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications. **Energy Research & Social Science**, Amsterdam, v. 93, p. 102847, 2022.

ELLERY, R. G.; NASCIMENTO, A. N.; SACHSIDA, A. **Avaliando o impacto do Programa de Sustentação do Investimento na taxa de investimento da economia brasileira**. Brasília, DF: Ipea, 2018. (Texto para Discussão n. 2421).

EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, DF: MME/EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 08 maio 2024.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília, DF: MME/EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 08 dez. 2024.

FERNANDES, G. *et al.* **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2023. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/opinioes/panorama-dos-desafios-do-hidrogenio-verde-no-brasil>. Acesso em: 08 maio 2024.

GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro**: panorama atual e potenciais para o hidrogênio verde. Brasília, DF: GIZ, 2021. Disponível em: https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf. Acesso em: 08 abr. 2025.

HJEIJ, Dawood *et al.* Hydrogen export competitiveness index for a sustainable hydrogen economy. **Energy Reports**, v. 9, p. 5843-5856, 2023.

Worley. (2022). Future skills for clean energy transitions: The role of hydrogen. Disponível em: <https://www.worley.com/en/insights/our-thinking/low-carbon-energy/what-role-will-hydrogen-play-in-future-energy-systems>. Acesso em: 02 abril 2025.

HOPPE, L. *et al.* Mercado de hidrogênio verde e power to X: demanda por capacitações profissionais. **Portal da Indústria**, Brasília, DF, mar. 2023. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2023/3/mercado-de-hidrogenio-verde-e-power-x-demanda-por-capacitacoes-profissionais/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

IBGE. **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. v. 1. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv2269_1.pdf. Acesso em: 08 nov. 2024.

IEA. **Global Hydrogen Review 2022**. [S. l.]: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

IEA. **Global Hydrogen Review 2021**. [S. l.]: OECD Publishing, 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

IPCC. Summary for Policymakers. *In*: IPCC. **Global Warming of 1.5°C**: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 1-24.

IRENA. **Geopolitics of the Energy Transformation**: the hydrogen factor. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>. Acesso em: 26 jul. 2024.

LARA, D. M.; RICHTER, M. F. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 26, n. 1, p. 413-436, 2023.

LI, J.; XING, J. Why Is Collaborative Agglomeration of Innovation so Important for Improving Regional Innovation Capabilities? A Perspective Based on Collaborative Agglomeration of Industry-University-Research Institution. **Complexity**, [s. l.], v. 2020, n. 1, p. 1-21, 2020.

MACHADO, L.; ROITMAN, F. B. Os efeitos do BNDES PSI sobre o investimento corrente e futuro das firmas industriais. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 44, p. 89-122, 2015.

MEC; GIZ; SENAI. **Profissionais do futuro: competências para a economia verde**. 1. ed. Brasília, DF: MEC, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/pt-br/assuntos/ept/profissionais-futuro>. Acesso em: 04 fev. 2025.

MIESZKOWSKI, K.; BARBERO, J. Territorial patterns of R&D+I grants supporting Smart Specialisation projects funded from the ESIF in Poland. **Regional Studies**, Abingdon, vol. 55, n. 3, p. 390-401, 2020.

MONTEIRO NETO, A.; COLOMBO, L. A.; ROCHA NETO, J. M. **Políticas territoriais em tempos de múltiplas crises: desafios e perspectivas para o Brasil na década de 2020**. Brasília, DF: Ipea, 2023. (Texto para Discussão No. 2882).

MONTEIRO NETO, A.; SILVA, R. O.; SEVERIAN, D. **A Indústria na Reconfiguração Territorial Brasileira: novas expressões dos dilemas nacionais no século XXI**. Brasília, DF: Ipea, 2021. (Texto para Discussão n. 2688).

MONTEIRO NETO, A.; SILVA, R. de O.; SEVERIAN, D. Territórios do (des) emprego industrial no Brasil: estruturas produtivas regionais na crise recente (2015-2018). **Estudios Económicos**, Buenos Aires, v. 40, n. 81, p. 37-67, 2023.

MORCEIRO, P. C. **A indústria brasileira no limiar do século XXI: uma análise da sua evolução estrutural, comercial e tecnológica**. 2018. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

MOTA, M. D. M. **Dinâmica espacial da atividade tecnológica no Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

OLAJIDE, H. E.; OLUWAFUNMISE, F.; OGUNGBEJE, O. Creating Equitable Workforce Development Models for Clean Hydrogen Transition: Insights from Industrial Management. **Journal of Multidisciplinary Research**, [s. l.], vol. 9, n. 01, p. 1-12, 2023.

OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. **Current Opinion in Chemical Engineering**, Oxford, v. 33, p. 100701, 2021.

PINHO, G. A. **Políticas de inovação no Brasil: uma análise dos efeitos nos gastos em PD&I**. 2022. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia da Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detail/1260453>. Acesso em 10 mar. 2025.

RAIS. Vínculos. **Ministério do Trabalho e Emprego**, Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://bi.mte.gov.br/bgcaged/login.php>. Acesso em: 16 abr. 2025.

RUDKIN, S.; HE, M.; CHEN, Y. **Attraction or repulsion?: testing coagglomeration of innovation between firm and university**. Mandaluyong City: ADB, 2020. (ADB Economics Working Paper Series, n. 608). Disponível em: <https://dx.doi.org/10.22617/WPS200067-2>. Acesso em: 16 maio 2024.

SABOIA, J.; KUBRUSLY, L. S.; BARROS, A. C. Caracterização e modificações no padrão regional de aglomeração industrial no Brasil no período 2003-2011. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 3, p. 635-661, 2014.

SABOIA, J. *et al.* **Heterogeneidade estrutural e mercado de trabalho no Brasil – 2004/2014**. Rio de Janeiro: IE-UFRJ, 2018. (Texto para Discussão n. 005).

SARSAR, L. Green Hydrogen Impact on Economic Growth: A Cross-Sectional Analysis of 29 European Countries. **Renewable Energy**, Oxford, v. 246, p. 1-12, 2025.

SHEN, J. *et al.* Recent developments in green hydrogen–environmental sustainability nexus amidst energy efficiency, green finance, eco-innovation, and digitalization in top hydrogen-consuming economies. **Energy & Environment**. [s. l.], v. 36, n. 1, p. 255-290, 2023.

SILVA, R. M. **Energia solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília, DF: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, 2015. (Texto para Discussão nº 166).

SOVACOOOL, B. K. *et al.* Decarbonization and its discontents: a critical energy justice perspective on four low-carbon transitions. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 155, p. 581-619, 2019.

SUZIGAN, W. *et al.* Inovação e conhecimento: indicadores regionalizados e aplicação a São Paulo. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 5, p. 105-131, 2006.

VERAS, T. S. **Análise da competitividade da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil e a proposição de uma agenda de trabalho setorial**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

WEF. **The Future of Jobs Report 2020**. Geneva: World Economic Forum, 2020. 290 p.

WORLEY. Future skills for clean energy transitions: the role of hydrogen. **Worley**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.worley.com/en/insights/our-thinking/low-carbon-energy/what-role-will-hydrogen-play-in-future-energy-systems>. Acesso em: 02 abril 2025.

XU, R.; CHOU, L-C.; ZHANG, W-H. The effect of CO2 emissions and economic performance on hydrogen-based renewable production in 35 European Countries. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], vol. 44, n. 56, p. 29418-29425, 2019.

Apêndice A – Perfil ocupacional Técnico Científico – PoTec associado à cadeia produtiva do hidrogênio de baixo carbono

Código CBO	Nome CBO	PoTec	Código CBO	Nome CBO	Po Tec
202105	ENGENHEIRO MECATRONICO	Tecnólogo (P&D)	313215	TECNICO ELETRONICO	Técnico e Operacional
202110	ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMACAO	Tecnólogo (P&D)	314110	TECNICO MECANICO	Técnico e Operacional
202115	TECNOLOGO EM MECATRONICA	Tecnólogo (P&D)	314115	TECNICO MECANICO (CALEFACAO, VENTILACAO E REFRIGERACAO)	Técnico e Operacional
202120	TECNOLOGO EM AUTOMACAO INDUSTRIAL	Tecnólogo (P&D)	314120	TECNICO MECANICO (MAQUINAS)	Técnico e Operacional
203215	PESQUISADOR DE ENGENHARIA ELERICA E ELETRONICA	Tecnólogo (P&D)	314125	TECNICO MECANICO (MOTORES)	Técnico e Operacional
203220	PESQUISADOR DE ENGENHARIA MECANICA	Tecnólogo (P&D)	715615	ELETRICISTA DE INSTALACOES	Técnico e Operacional
203230	PESQUISADOR DE ENGENHARIA QUIMICA	Tecnólogo (P&D)	724115	INSTALADOR DE TUBULACOES	Técnico e Operacional
212210	ENGENHEIRO DE EQUIPAMENTOS EM COMPUTACAO	Tecnólogo (P&D)	724130	INSTALADOR DE TUBULACOES DE GAS COMBUSTIVEL (PRODUCAO E DISTRIBUICAO)	Técnico e Operacional
212215	ENGENHEIROS DE SISTEMAS OPERACIONAIS EM COMPUTACAO	Tecnólogo (P&D)	724135	INSTALADOR DE TUBULACOES DE VAPOR (PRODUCAO E DISTRIBUICAO)	Técnico e Operacional
214305	ENGENHEIRO ELETRICISTA	Tecnólogo (P&D)	731125	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (CENTRAIS ELÉTRICAS)	Técnico e Operacional
214310	ENGENHEIRO ELETRONICO	Tecnólogo (P&D)	731130	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (MOTORES E DINAMOS)	Técnico e Operacional
214315	ENGENHEIRO ELETRICISTA DE MANUTENCAO	Tecnólogo (P&D)	731135	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	Técnico e Operacional
214320	ENGENHEIRO ELETRICISTA DE PROJETOS	Tecnólogo (P&D)	731145	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (MAQUINAS INDUSTRIAIS)	Técnico e Operacional
214325	ENGENHEIRO ELETRONICO DE MANUTENCAO	Tecnólogo (P&D)	731150	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	Técnico e Operacional
214330	ENGENHEIRO ELETRONICO DE PROJETOS	Tecnólogo (P&D)	731160	MONTADOR DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (TRANSFORMADORES)	Técnico e Operacional
214335	ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMACAO	Tecnólogo (P&D)	731165	BOBINADOR ELETRICISTA, A MAO	Técnico e Operacional
214360	TECNOLOGO EM ELETRICIDADE	Tecnólogo (P&D)	731170	BOBINADOR ELETRICISTA, A MAQUINA	Técnico e Operacional
214365	ENGENHEIRO ELETRONICO DE PROJETOS	Tecnólogo (P&D)	731175	OPERADOR DE LINHA DE MONTAGEM (APARELHOS ELÉTRICOS)	Técnico e Operacional
214405	ENGENHEIRO MECANICO	Tecnólogo (P&D)	731180	OPERADOR DE LINHA DE MONTAGEM (APARELHOS ELÉTRICOS)	Técnico e Operacional
214420	ENGENHEIRO MECANICO INDUSTRIAL	Tecnólogo (P&D)	732105	ELETRICISTA DE MANUTENCAO DE LINHAS ELÉTRICAS, TELEFONICAS E DE COMUNICACAO DE DADOS	Técnico e Operacional
214505	ENGENHEIRO QUIMICO	Tecnólogo (P&D)	732110	EMENDADOR DE CABOS ELÉTRICOS E TELEFONICOS (AEREO E SUBTERRANEO)	Técnico e Operacional
214510	ENGENHEIRO QUIMICO (INDUSTRIA QUIMICA)	Tecnólogo (P&D)	732115	EXAMINADOR DE CABOS, LINHAS ELÉTRICAS E TELEFONICAS	Técnico e Operacional
214515	ENGENHEIRO QUIMICO (MINERACAO, METALURGIA, SIDERURGIA, CIMENTEIRA E CERAMICA)	Tecnólogo (P&D)	732120	INSTALADOR DE LINHAS ELÉTRICAS DE ALTA E BAIXA TENSÃO (REDE AEREA E SUBTERRANEA)	Técnico e Operacional
214520	ENGENHEIRO QUIMICO (PAPEL E CELULOSE)	Tecnólogo (P&D)	732140	INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	Técnico e Operacional
214525	ENGENHEIRO QUIMICO (PETROLEO E BORRACHA)	Tecnólogo (P&D)	761215	OPERADOR DE BOBINADORA	Técnico e Operacional
214330	ENGENHEIRO QUIMICO (UTILIDADES E MEIO AMBIENTE)	Tecnólogo (P&D)	821105	OPERADOR DE CENTRO DE CONTROLE	Técnico e Operacional
300105	TECNICO EM MECATRONICA - AUTOMACAO DA MANUFATURA	Técnico e Operacional	861110	OPERADOR DE QUADRO DE DISTRIBUICAO DE ENERGIA ELÉTRICA	Técnico e Operacional
311515	TECNICO DE UTILIDADE (PRODUCAO E DISTRIBUICAO DE VAPOR, GASES, OLEOS, COMBUSTIVEL, ENERGIA)	Técnico e Operacional	862155	OPERADOR DE UTILIDADE (PRODUCAO E DISTRIBUICAO DE VAPOR, GAS, OLEO, COMBUSTIVEL, ENERGIA, OXIGENIO)	Técnico e Operacional
313120	TECNICO DE MANUTENCAO ELÉTRICA	Técnico e Operacional	901105	SUPERVISOR DE MANUTENCAO ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO INDUSTRIAL	Técnico e Operacional
313125	TECNICO DE MANUTENCAO ELÉTRICA DE MAQUINA	Técnico e Operacional	901110	SUPERVISOR DE MANUTENCAO ELÉTRICA INDUSTRIAL, COMERCIAL E PREDIAL	Técnico e Operacional
313130	TECNICO ELETRICISTA	Técnico e Operacional	930305	SUPERVISOR DE MANUTENCAO ELÉTRICA	Técnico e Operacional
313205	TECNICO DE MANUTENCAO ELÉTRICA	Técnico e Operacional	931105	ELETRICISTA DE MANUTENCAO ELÉTRICA	Técnico e Operacional

Fonte: Elaboração própria baseado em Suzigan *et al.* (2006) e Giz (2021).