

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO

SETOR DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS, SESA

CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS, DECON

LUCIANA BASTOS TOCARSKI

**ANÁLISE DA ESPECIALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA
REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Guarapuava/PR
2025**

LUCIANA BASTOS TOCARSKI

**ANÁLISE DA ESPECIALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA
REGIÃO SUL DO BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof.: Dr. Amarildo Hersen.

**Guarapuava/PR
2025**

LUCIANA BASTOS TOCARSKI

**ANÁLISE DA ESPECIALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA
REGIÃO SUL DO BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Amarildo Hersen
Orientador

Prof. Dr. Marcio Marconato
Avaliador

Prof. Dr. Eduardo Lopes Marques
Avaliador

Aprovado em: 14/11/2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por ter iluminado meu caminho durante esta jornada. Sua presença me sustentou nos momentos de incerteza, concedeu-me coragem diante dos desafios e serenidade para seguir adiante. Sem sua graça, nada disso seria possível.

À minha família, que é o alicerce da minha vida, expresso toda a minha gratidão. Em especial à minha mãe, Luzia de Fátima Bastos, que sempre acreditou em mim e esteve ao meu lado em todos os momentos. Seu amor incondicional, paciência e apoio foram fundamentais para que eu conseguisse chegar até aqui. Cada conquista minha também é sua.

Ao meu orientador Dr. Amarildo Hersen, deixo o meu mais sincero agradecimento pela orientação, paciência e dedicação. Sua sabedoria e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Obrigada por acreditar no meu potencial.

Aos professores da banca avaliadora, Dr. Márcio Marconato e Dr. Eduardo Lopes Marques, expresso minha sincera gratidão pela disponibilidade, atenção e pelas valiosas contribuições que enriqueceram significativamente esta pesquisa.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Economia (DECON), pela formação sólida e pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação. Estendo também meus agradecimentos à Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), por proporcionar um ambiente de aprendizado, crescimento e oportunidades que tornaram possível a concretização deste sonho.

Aos amigos, pelo incentivo, companheirismo e pelas conversas que tornaram essa trajetória mais leve, cada gesto de apoio e cada conversa foram essenciais para tornar esta trajetória mais leve e significativa. E agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, torceram por mim e contribuíram para a concretização desta jornada.

Por fim, aos meus colegas de curso, que compartilharam comigo os desafios e aprendizados dessa caminhada, deixo o meu agradecimento especial. Com cada um aprendi algo único seja nas trocas acadêmicas, nas conversas de corredor ou nos momentos de descontração. Levarei comigo as lembranças, as amizades e o sentimento de que juntos vivemos uma etapa inesquecível.

“Nada temas, porque estou contigo,
não lances olhares desesperados,
pois eu sou teu Deus; eu te fortaleço
e venho em teu socorro, eu te amparo
com minha destra vitoriosa.” (Isaías 41:10)

RESUMO

O objetivo do estudo foi identificar a especialização na fonte de geração de energia elétrica na Região Sul do Brasil, sob a ótica da potência outorgada, com ênfase nas fontes renováveis e na identificação das particularidades energéticas de cada estado. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, fundamentada na análise regional por meio dos indicadores Quociente Locacional (QL) e Coeficiente de Especialização (CE). Foram utilizados dados referentes à potência instalada por fonte energética, permitindo comparar o perfil produtivo dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os resultados evidenciaram que a Região Sul possui uma matriz predominantemente renovável, embora apresente trajetórias energéticas distintas. O Paraná demonstrou forte especialização nas fontes hidrelétrica e biomassa; Santa Catarina destacou-se pela presença da termelétrica a carvão, sobretudo pelo Complexo Jorge Lacerda, que ainda representa uma relevante participação de fonte fóssil, e o Rio Grande do Sul apresentou especialização crescente nas fontes eólica e solar. Conclui-se que, embora o Sul se mantenha como uma das regiões renováveis do país, o processo de diversificação da matriz elétrica ainda ocorre de forma heterogênea, refletindo as vocações territoriais e produtivas de cada estado. O estudo contribui para o debate sobre o planejamento energético regional e para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade e ao equilíbrio da matriz elétrica nacional.

Palavras-chave: fontes renováveis; energia elétrica; especialização regional.

ABSTRACT

The objective of this study was to identify the specialization in electricity generation sources in the Southern Region of Brazil, based on granted capacity, with an emphasis on renewable sources and the identification of the energy particularities of each state. The research is applied in nature, with a quantitative approach, and is grounded in regional analysis through the indicators Location Quotient (LQ) and Specialization Coefficient (SC). Data on installed capacity by energy source were used, allowing for a comparison of the productive profiles of the states of Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul. The results showed that the Southern Region has a predominantly renewable energy matrix, although it presents distinct energy trajectories. Paraná demonstrated strong specialization in hydroelectric and biomass sources; Santa Catarina stood out for its coal-fired power generation, especially the Jorge Lacerda Complex, which still represents a significant share of fossil-based energy; and Rio Grande do Sul exhibited growing specialization in wind and solar sources. It is concluded that, although the South remains one of the most renewable regions in the country, the diversification process of its electricity matrix still occurs heterogeneously, reflecting the territorial and productive vocations of each state. The study contributes to the debate on regional energy planning and to the formulation of public policies aimed at promoting sustainability and the balance of the national electricity matrix.

Keywords: renewable sources; electricity; regional specialization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Energia elétrica e fontes	11
2.1.1 Fonte não renovável de energia	14
2.1.1.1 Carvão mineral	15
2.1.1.2 Petróleo e derivados	16
2.1.1.3 Gás natural	17
2.1.1.4 Xisto betuminoso	18
2.1.1.5 Energia nuclear	18
2.1.2 Fonte renovável de energia	20
2.1.2.1 Energia eólica	21
2.1.2.2 Energia solar	22
2.1.2.3 Energia hidrelétrica	23
2.1.2.4 Energia geotérmica	24
2.1.2.5 Energia oceânica	25
2.1.2.6 Biomassa	26
2.2 Matriz elétrica brasileira	31
2.3 Fundamentação Teórica	33
2.3.1 Economia circular	33
3 METODOLOGIA	40
3.1 Material	40
3.2 Métodos	41
3.2.1 Métricas de mensuração	43
3.2.1.1 Quociente Locacional (QL)	44
3.2.1.2 Coeficiente de Especialização (CE)	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Resultados	48
4.2 Discussão dos resultados	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A possível diversidade na especialização da geração de energia elétrica evidencia a importância de compreender os arranjos produtivos regionais, suas vantagens comparativas e as políticas energéticas adotadas. Como destacam Goldenberg e Lucon (2007), a variedade de fontes renováveis disponíveis permite que cada região explore ao máximo seu potencial natural, favorecendo um modelo de geração descentralizada e distribuída. Embora existam modelos descentralizados de produção, como a geração distribuída, esta pesquisa concentra-se na geração centralizada, que se caracteriza por grandes empreendimentos responsáveis pelo suprimento em larga escala. Essa abordagem contribui para a segurança energética, reduz perdas na distribuição e impulsiona o desenvolvimento regional.

A matriz energética brasileira é um pilar fundamental para o desenvolvimento econômico, tecnológico e científico do país, representando o conjunto diversificado de fontes de energia utilizadas para suprir a demanda nacional. Sua característica mais marcante é a diversidade, que abrange tanto fontes renováveis quanto não renováveis. Essa variedade é crucial, pois minimiza os riscos de crises energéticas, garantindo que o país não dependa excessivamente de uma única fonte e que as diferentes opções possam se complementar (Ramalho; Oliveira; Miranda, 2022).

De acordo com dados da ANEEL, a matriz elétrica de geração centralizada do Brasil atingiu a marca de 200 GW de capacidade instalada (março de 2024), dos quais aproximadamente 84,25 % provêm de fontes renováveis, enquanto 15,75 % são de fontes não-renováveis (sendo cerca de 1 % nuclear). As principais fontes renováveis que compõem essa matriz são a hidrelétrica (55%), eólica (14,8%) e biomassa (8,4%), já entre as não-renováveis, predominam o gás natural (9%), petróleo (4%) e carvão mineral (1,75%) (ANEEL, 2024).

Para o Brasil, as próximas décadas apresentam tanto desafios quanto oportunidades. Os desafios residem na necessidade de garantir um suprimento energético robusto, seguro e sustentável para o desenvolvimento econômico e social. As oportunidades, por sua vez, estão nas condições privilegiadas que o país possui em termos de recursos energéticos renováveis e tecnologia, permitindo transformar suas riquezas naturais em energia e, conseqüentemente, agregar valor à sua produção de riqueza (Lavezzo, 2016).

Compreender a especialização da geração de energia elétrica da Região Sul do Brasil permite compreender melhor o papel das políticas públicas e do planejamento territorial na construção de uma matriz elétrica mais segura e sustentável. A valorização das fontes renováveis, limpas e regionais é um passo fundamental para atender às demandas energéticas de forma ambientalmente responsável e socialmente justa. Segundo Faria (2018), o desenvolvimento sustentável pressupõe a compatibilização entre as necessidades presentes e a preservação dos recursos para as gerações futuras.

O Brasil é conhecido por apresentar umas das matrizes elétricas mais sustentáveis do mundo, contudo, não necessariamente todos os entes federativos apresentam o mesmo perfil para a matriz elétrica. A presente pesquisa busca responder se o setor de geração de energia elétrica do Sul do Brasil constitui uma matriz elétrica predominantemente renovável de forma semelhante à federação. Para tanto, levanta-se a hipótese de que há um padrão distinto de especialização na geração de energia elétrica entre os entes federativos da Região Sul do Brasil, mas com predominância de fontes renováveis.

O objetivo geral desta pesquisa consiste em identificar a especialização por fonte de geração de energia elétrica na Região Sul do Brasil, sob a ótica da potência outorgada. Para alcançar esse propósito, foram delineados três objetivos específicos: primeiramente, identificar a distribuição da potência outorgada, por tipo de fonte, nos entes federativos da Região Sul; em seguida, mensurar a especialização na geração de energia elétrica, por fonte, para os entes federativos da Região Sul; e, por fim, avaliar a relevância das fontes renováveis no contexto regional frente ao nacional.

A literatura muito discute sobre a matriz elétrica nacional, contudo não tem se aprofundado nas discussões regionais, indicando pontos favoráveis ou gargalos existentes nos entes federativos. Assim, mostra-se importante verificar o perfil de geração de energia elétrica das Unidades Federativas a fim de perceber se as mesmas se encontram em sintonia com o perfil nacional.

Diante das mudanças climáticas e da necessidade de uso de fontes energéticas renováveis, torna-se fundamental compreender as potencialidades e os padrões de especialização dos estados da Região Sul na geração de energia elétrica. A compreensão da especialização regional permite propor soluções mais eficientes e sustentáveis, principalmente quando alinhadas com a proposta da economia circular,

que visa a redução de desperdícios, o reaproveitamento de recursos e geração de valor a partir de resíduos.

A análise proposta contribuirá para a formulação de políticas públicas e diretrizes de desenvolvimento regional, além de ampliar o conhecimento sobre a economia regional do setor de geração de energia elétrica no Brasil. Essa abordagem também está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, especialmente com o ODS 7 – Energia Acessível e Limpa, que visa “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”. Ao investigar a especialização regional na geração de energia elétrica, com ênfase em fontes renováveis e práticas de economia circular, o estudo colabora diretamente com as metas do ODS 7, promovendo uma transição energética sustentável e integrando a dimensão econômica com a ambiental e social do desenvolvimento (Nações Unidas Brasil, 2025).

Este estudo está organizado em cinco capítulos, buscando proporcionar uma leitura clara e estruturada. O primeiro capítulo é a introdução, onde são delineados a proposta, os objetivos, a justificativa e a relevância do estudo. O segundo capítulo se dedica à revisão de literatura e à fundamentação teórica, apresentando os conceitos e trabalhos que embasam a pesquisa. Em seguida, o terceiro capítulo detalha os materiais e métodos empregados na pesquisa. O quarto capítulo é destinado à apresentação e discussão dos resultados obtidos. Por fim, o quinto e último capítulo oferece as considerações finais, sintetizando as conclusões e achados do trabalho desenvolvido.

2 REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo da especialização na geração de energia, como reflexo de uma realidade mais ampla da Região Sul, deve ser compreendido dentro de uma perspectiva integrada entre território, recursos disponíveis e estratégias sustentáveis. A convergência entre economia circular e especialização regional produtiva na área energética representa um caminho promissor para a construção de um modelo de desenvolvimento mais sustentável. Assim torna-se importante a pesquisa dessas origens e fontes no decorrer do tempo.

2.1 Energia elétrica e fontes

A primeira fonte de energia utilizada pelo homem foi o fogo, a partir do domínio permitindo avanços significativos na proteção, alimentação e organização social. Com o tempo, as fontes de energia utilizadas foram se diversificando e moldando os rumos da evolução social. Por volta de seis mil anos atrás, surgiram as primeiras civilizações, que utilizavam principalmente a força muscular humana, a tração animal, a energia cinética dos rios e a lenha como principais fontes energéticas (Azevedo; Borges, 2016).

Por volta de 1400 d.C., a Idade Moderna viu o homem abraçar novas fontes de energia. Quedas d'água e ventos passaram a impulsionar moinhos e diversas tarefas. Embora a energia de origem fóssil, como o carvão mineral, já fosse empregada para aquecer ambientes e suprir pequenas manufaturas, como a siderurgia, tinha baixa intensidade de uso. O petróleo, pouco conhecido, servia raramente para iluminação quando o óleo de baleia faltava. A partir desse uso incipiente de fósseis que precedeu as grandes transformações industriais (Goldemberg; Lucon, 2007).

Durante a Primeira Revolução Industrial, a energia desempenhou um papel central no avanço das forças produtivas, especialmente com a substituição da energia humana, animal e hidráulica pela energia a vapor, movida a carvão mineral. Essa transição energética permitiu que as fábricas deixassem de depender exclusivamente da localização próxima a rios e pudessem se instalar em áreas mais favoráveis ao mercado e à urbanização (Dathein, 2003). Antes disso, a madeira era uma fonte essencial, sobretudo na Alemanha dos séculos XVIII e XIX, onde toda a tecnologia industrial dependia dela para mineração, refino de metais e construção naval.

Contudo, a escassez florestal na Inglaterra impulsionou a transição para o carvão (Carvalho, 2014).

Embora os gregos antigos já explorassem as propriedades expansivas do vapor, foi Thomas Savery quem desenvolveu a primeira bomba a vapor operacional em 1698. Posteriormente, Thomas Newcomen a aprimorou em 1712, e James Watt a aperfeiçoou ainda mais, tornando-a a força motriz essencial para fábricas, locomotivas e navios, pavimentando o caminho para a industrialização em larga escala. No século XIX, a eletricidade começou a ganhar destaque, com inovações como a lâmpada incandescente de Thomas Edison e o motor de corrente alternada de Nikola Tesla, que possibilitaram a eletrificação das fábricas. Paralelamente, a turbina hidráulica e as hidrelétricas surgiram como alternativas para a geração elétrica. Já na virada dos séculos XIX para o XX, o petróleo emergiu como a fonte de energia dominante, impulsionando a produção em massa e consolidando o modelo industrial moderno, com setores como o automobilístico e naval prosperando (Carvalho, 2014).

As disponibilidades de combustíveis fósseis no período pós-Segunda Guerra Mundial e a competitividade das usinas hidrelétricas e termelétricas até a década de 1970 refrearam o avanço de pesquisas sobre uso do vento para produção de energia elétrica. Contudo, as crises do petróleo e a instabilidade do seu preço impulsionaram iniciativas globais para a diversificação da matriz energética, incentivando o desenvolvimento de fontes alternativas. Nesse novo contexto, o vento emerge como uma opção promissora e estratégica para a produção de eletricidade, sendo essencial para a segurança energética (Farias; Sellitto, 2011).

Segundo Goldemberg e Lucon (2007), a distinção fundamental entre as fontes de energia reside na sua capacidade de reposição natural, que se dividem em duas categorias, sendo assim, renováveis e não renováveis, essa abordagem é crucial para o planejamento e a sustentabilidade da matriz energética. Portanto sob essa ótica, a classificação das fontes de energia conforme levantadas pelos autores é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das fontes de energia

FONTES		ENERGIA PRIMÁRIA		ENERGIA SECUNDÁRIA	
Não renováveis	Fósseis	Carvão mineral		Termoeletricidade, calor, combustível para transporte	
		Petróleo e derivados			
		Gás natural			
	Nuclear	Materiais fósseis		Termoeletricidade, calor	
Renováveis	"Tradicionais"	Biomassa primitiva: lenha de desmatamento		Calor	
	"Convencionais"	Potenciais hidráulicos de médio e grande porte		Hidreletricidade	
		Potenciais hidráulicos de pequeno porte			
	"Novas"	Biomassa "moderna": culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)		Biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor	
		Outros	Energia solar		Calor, eletricidade fotovoltaica
			Geotermal		Calor e eletricidade
			Eólica		Eletricidade
Maremotriz e das ondas					

Fonte: Goldemberg e Lucon (2007).

Desde a Revolução Industrial, a energia tem sido um fator crucial para a competitividade econômica e a qualidade de vida das nações. Em um cenário global cada vez mais atento às questões ambientais, a capacidade de acessar recursos energéticos de baixo custo e com menor impacto se tornou uma vantagem comparativa decisiva (Lavezzo, 2016).

Segundo Nascimento e Alves (2016) diante da crescente preocupação com as questões ambientais e o impacto da utilização de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, o fomento às fontes renováveis alternativas tornou-se uma prioridade global. A dependência de fontes não renováveis acarreta a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono, contribuindo para o aquecimento global e esgotamento dos recursos. Nesse contexto, pesquisas e

desenvolvimento tecnológico buscam incorporar efeitos de aprendizagem para reduzir os custos de geração de energias renováveis. O aproveitamento correto dessas fontes naturais e renováveis é considerado um meio eficaz de substituir as "energias sujas" e mitigar os danos ao planeta.

2.1.1 Fonte não renovável de energia

De acordo com Carvalho (2008) os combustíveis fósseis são a representação da energia solar acumulada por milhões de anos. Sua formação ocorre a partir de vegetais e organismos que, após morrerem, foram depositados no fundo do mar por erosão ou rios. Sob elevadas pressões e temperaturas, esses materiais orgânicos deram origem ao carvão, petróleo e gás natural.

Na Revolução Industrial, iniciou a era dos combustíveis fósseis, com o carvão mineral sendo a primeira fonte de energia em larga escala. Formado ao longo de milhões de anos a partir de matéria vegetal, o carvão dominou a matriz energética mundial até ser superado pelo petróleo em 1961. O petróleo, descoberto em 1859, ganhou impulso com o surgimento do mercado automotivo e da indústria petroquímica, que diversificou seus derivados, como a gasolina, o querosene e os plásticos, moldando a economia e o estilo de vida modernos (Farias; Sellitto, 2011).

Para Goldemberg e Lucon (2007) as fontes de energia não renováveis são aquelas cujos processos de formação e reposição na natureza demandam escalas de tempo geológicas. O processo de acumulação de matéria orgânica no subsolo terrestre ao longo de milhões de anos que destinou a origem às fontes fósseis de energia, como petróleo, o carvão mineral, o gás natural e o xisto betuminoso. A reposição dessas fontes é um processo extremamente lento e, portanto, não renováveis, levantando preocupações sobre a sustentabilidade do abastecimento energético e impactos ambientais como a emissão de gases de efeito estufa, que contribuem para as mudanças climáticas.

Diante disso, entende-se que essas fontes levam milhões de anos para se formar sob condições específicas da natureza, o que torna sua renovação possível, mas inviável em escala humana. Assim, o uso contínuo reduz progressivamente seus estoques globais, comprometendo sua disponibilidade futura (EPE, 2018).

2.1.1.1 Carvão mineral

Segundo Borba (2001) o carvão mineral é um combustível fóssil sólido, formado a partir de restos vegetais em bacias sedimentares. Sob pressão e temperatura, esses restos se enriquecem em carbono através de um processo chamado carbonificação. A qualidade do carvão, medida pelo seu rank, aumenta quanto mais intenso e longo for esse processo, evoluindo de turfa para antracito, com o linhito sendo o estágio mínimo para uso industrial. A qualidade também é influenciada pela grade, que indica a quantidade de cinzas incombustíveis. O carvão é amplamente utilizado na geração de energia e na produção de aço, onde se emprega um tipo de alta qualidade chamado carvão coqueificável. Apesar de sua importância, é um recurso não renovável, mas se destaca por ser o mais abundante e ter a maior perspectiva de vida útil entre os recursos energéticos.

Além da queima direta, o carvão mineral pode ser convertido em combustíveis sintéticos por meio dos processos de gaseificação e liquefação. A gaseificação transforma o carvão em gás combustível e é uma técnica utilizada desde o século XIX em diversos países. Já a liquefação busca transformar o carvão sólido em combustível líquido, semelhante ao petróleo. Apesar do alto custo e da sofisticação dessa tecnologia, ela representa uma alternativa estratégica em contextos de escassez de petróleo. Historicamente, o carvão foi a principal fonte de energia até meados do século XX, quando foi superado pelo petróleo e pela energia nuclear. No entanto, sua ampla disponibilidade e o custo relativamente baixo ainda garantem ao carvão um papel relevante na matriz energética mundial, especialmente em regiões com grandes jazidas (CEPA, 1999).

Para mitigar esses impactos, é crucial que os serviços de reabilitação ocorram em etapas sucessivas à lavra. Isso inclui a remoção e o armazenamento separados do solo (*solum*) e do subsolo (*regolito argiloso*) antes do início da mineração. Após a retirada do carvão, a cava é preenchida com o resíduo piritoso e rochas sobrejacentes, que são então cobertas com o *regolito* e, por fim, com o *solum* previamente estocado. Essa metodologia visa criar condições para o desenvolvimento de uma nova vegetação, o que, por sua vez, contribui para a fixação do solo e a recuperação da área (Campos *et al.*, 2010).

2.1.1.2 Petróleo e derivados

O petróleo é uma das principais fontes de energia da sociedade, e sua importância vai muito além. Seus derivados são usados para fabricar inúmeros produtos que usamos diariamente. Por isso, a concepção de um mundo sem os benefícios do petróleo implicaria numa total reformulação da nossa sociedade e de nossos hábitos. As refinarias, onde o petróleo é processado, são o coração dessa indústria (Mariano, 2001).

O petróleo, cujo nome vem do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), é uma substância oleosa, inflamável e menos densa que a água. Sua cor varia do incolor ao preto e ele é composto principalmente por uma mistura de hidrocarbonetos. As moléculas menores formam o gás, enquanto as maiores formam o líquido. Os óleos obtidos de diferentes reservatórios variam em cor, densidade e viscosidade. A indústria do petróleo começou a se desenvolver por volta de 1859, com a perfuração de poços nos Estados Unidos para a produção de querosene. Desde então, o petróleo se tornou um ativo crucial para a economia global, sendo usado não só como combustível, mas também para a fabricação de plásticos, embalagens e fertilizantes (Santos *et al.*, 2022).

Ainda de acordo com Santos *et al.* (2022) o petróleo é uma fonte de energia primária, fundamental para a economia global. Seus derivados, como os combustíveis para veículos e para a geração de eletricidade, possuem uma demanda pouco elástica, ou seja, mesmo que o preço suba, a procura por esses produtos não diminui significativamente no curto prazo. Essa característica, aliada à ampla gama de usos de seus derivados, torna o petróleo essencial para manter o nível de atividade econômica, sendo um pilar energético para a maioria dos países.

Mariano (2001), destaca que o refino de petróleo, apesar de ser fundamental, também traz sérias consequências ambientais. As refinarias consomem grandes quantidades de água e energia, liberando gases nocivos, despejos líquidos e resíduos sólidos de difícil tratamento. Essa poluição afeta o ar, a água e o solo. Embora os avanços tecnológicos existam, muitas refinarias ainda usam técnicas antigas, o que contribui para essa degradação ambiental. Enquanto o petróleo continuar sendo a principal fonte de energia, as refinarias continuarão a ser uma parte necessária e, infelizmente, poluente da nossa economia.

2.1.1.3 Gás natural

Conforme Reis (2018) o gás natural é um combustível fóssil composto principalmente por hidrocarbonetos leves da série parafínica, com o metano (CH_4) sendo o seu constituinte dominante. Ele também pode conter outros hidrocarbonetos como etano, propano e butano, além de substâncias como gás carbônico (CO_2), nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. Essas moléculas são apolares e saturadas, e em condições atmosféricas, se encontram em estado gasoso. O gás natural é encontrado em bacias sedimentares, podendo existir de três formas: dissolvido em petróleo, formando uma capa gasosa sobre o petróleo, ou em jazidas exclusivas. Sua origem é geralmente termogênica, proveniente da degradação de rochas ricas em matéria orgânica, mas também pode ter origem biogênica ou inorgânica.

O uso do gás natural remonta à antiguidade, com registros de sua descoberta no Irã entre 6000 e 2000 a.C. Na China, o gás era conhecido desde 900 a.C. e foi usado para secar pedras de sal por volta de 211 a.C., sendo extraído com varas de bambu de poços com cerca de 1000 metros de profundidade. Na Europa, ele só foi descoberto em 1659, mas não gerou grande interesse devido à popularidade do gás de carvão. Nos Estados Unidos, o primeiro gasoduto comercial entrou em operação em 1821 para fornecer energia para iluminação e preparo de alimentos. No Brasil, a utilização começou mais tarde, por volta de 1940, após a descoberta de óleo e gás na Bahia (Fioreze *et al.*, 2013).

Fioreze *et al.* (2013) salienta que o uso do gás natural como fonte de energia se intensificou no cenário mundial a partir dos choques do petróleo de 1973 e 1979. Esses eventos evidenciaram a necessidade de diversificar as fontes energéticas para diminuir a vulnerabilidade dos países a choques de oferta, o que impulsionou o uso de hidrocarbonetos gasosos. Por ser considerado um combustível fóssil mais limpo e menos intensivo em carbono, o gás natural se tornou uma alternativa importante de transição.

O gás natural se destaca também como uma fonte de energia estratégica, principalmente por seu impacto ambiental reduzido em comparação com outros combustíveis fósseis. Sua combustão, quando realizada em equipamentos adequados, é notavelmente mais limpa, sendo praticamente isenta de poluentes como óxidos de enxofre e partículas sólidas. Além dos benefícios ambientais, o gás natural oferece vantagens significativas em termos de eficiência energética. Ele proporciona

uma combustão de alto rendimento térmico e permite um controle e regulação simples da chama, o que pode levar à redução do consumo de energia em diversos setores, como indústria, comércio e residências (Santos *et al.*, 2007).

O gás natural possui diversas aplicações, sendo utilizado principalmente na geração de energia em usinas termoelétricas. De acordo com Reis (2018) seu uso para essa finalidade é valorizado pela sua alta eficiência energética e por emitir menos CO₂ em comparação com outros combustíveis fósseis, tornando-o uma opção menos prejudicial ao meio ambiente. Além de ser uma fonte de energia, o gás natural é uma importante matéria-prima na indústria petroquímica, onde é usado para produzir plásticos, tintas e fibras sintéticas, e na indústria de fertilizantes, para a fabricação de ureia e amônia.

2.1.1.4 Xisto betuminoso

Segundo Mesquita (1978) o xisto betuminoso, um nome tecnicamente incorreto, mas amplamente utilizado, refere-se a rochas sedimentares que contêm um composto orgânico, o querogênio, disperso em sua parte mineral. Sob a ação do calor, esse composto se decompõe em gás e óleo ricos em hidrocarbonetos. Cada tipo de xisto exige um processo de beneficiamento, pirólise e mineração específicos, tornando essencial a adaptação do esquema de industrialização para cada jazida.

O xisto betuminoso, um termo amplamente usado para rochas oleíferas, é uma rocha sedimentar que possui atributos de carvão e petróleo. Embora o nome correto seja “folhelho”, ele é popularmente conhecido como xisto, que na verdade é uma rocha metamórfica. A rocha contém matéria orgânica, que pode ser betume (quase fluido e facilmente extraído) ou querogênio (sólido e que se transforma em betume com o calor). O óleo extraído por destilação fracionada a seco, que gera gasolina e outros subprodutos, é idêntico ao petróleo. No entanto, o processo de extração é poluente, caro, trabalhoso e de baixo retorno econômico (CEPA, 1999).

2.1.1.5 Energia nuclear

Segundo a perspectiva de Gonçalves e Almeida (2005) a energia nuclear é uma das principais fontes para a geração de eletricidade, funcionando em usinas térmicas que usam o calor da fissão nuclear para criar vapor de água, que, por sua vez, move

turbinas geradoras de energia. O processo completo de obtenção do combustível nuclear, chamado de ciclo do combustível, envolve várias etapas. Começa com a extração do minério de urânio, que depois é beneficiado e convertido em gás. Esse gás passa por um processo de enriquecimento, onde a proporção do isótopo ^{235}U é aumentada. No Brasil, por exemplo, o urânio é enriquecido para cerca de 3,5% para ser usado nos reatores do tipo PWR (reator a água pressurizada). Após o enriquecimento, o gás é reconvertido em pó, transformado em pastilhas e, finalmente, montado nos cilindros que formam os elementos combustíveis do reator.

A energia nuclear, presente na matriz energética global desde os anos 60, utiliza o processo de fissão nuclear do urânio-235. Este processo, que gera uma reação em cadeia controlada por barras de cádmio, libera uma grande quantidade de energia térmica para aquecer a água e gerar vapor, que movimenta turbinas para produzir eletricidade. O crescimento inicial dessa tecnologia na década de 70 foi severamente impactado por acidentes como os de Three Mile Island e Chernobyl, que levou a discussão sobre a segurança e os riscos ambientais e de saúde associados a essa fonte (Farias; Sellitto, 2011).

Cardoso (2012) detalha que um reator nuclear é um equipamento que realiza a fissão nuclear para gerar calor, funcionando essencialmente como uma usina termelétrica. No entanto, em vez de usar combustíveis tradicionais como óleo ou carvão, ele utiliza o urânio-235, chamado de "combustível nuclear", como fonte de calor. A principal vantagem é a capacidade de gerar uma enorme quantidade de energia a partir de uma pequena quantidade de material. É importante notar que a energia elétrica produzida por um reator nuclear é indistinguível daquela gerada por fontes convencionais. Além disso, a segurança é uma prioridade no projeto desses reatores, pois eles são construídos para evitar explosões como a de uma bomba atômica. Isso é garantido por dois motivos principais: a baixa concentração de urânio-235 (cerca de 3,2%) e a presença de materiais que absorvem nêutrons, controlando e até mesmo interrompendo a reação em cadeia quando necessário.

A radiação nuclear é o termo genérico para a energia liberada pelo núcleo atômico, manifestando-se de diversas formas. As principais são a emissão de nêutrons e a radiação gama, uma forma de radiação eletromagnética com maior energia que os raios-X. Além disso, há a radiação alfa, que consiste em núcleos de hélio, e a radiação beta, composta por elétrons ou pósitrons. Todas essas formas de

radiação representam a liberação de energia do núcleo do átomo (Gonçalves; Almeida, 2005).

De acordo com Farias e Sellitto (2011) apesar de ser considerada uma fonte limpa por emitir poucos gases do efeito estufa, a energia nuclear é classificada como não renovável e enfrenta desafios significativos. O principal deles é o descarte de rejeitos radioativos, que demandam armazenamento seguro e de longo prazo. Além disso, o alto custo de construção e manutenção das usinas, que exigem tecnologia de ponta e profissionais altamente qualificados, são barreiras para a expansão da energia nuclear. A adoção de ciclos de combustível fechados e o uso em dessalinização e produção de hidrogênio são possíveis soluções para tornar essa fonte mais competitiva e atrativa.

2.1.2 Fonte renovável de energia

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018) as fontes de energia renováveis são aquelas que se renovam constantemente na natureza, tornando-se inesgotáveis. Exemplos incluem a energia hídrica (da água), solar (do sol), eólica (do vento), biomassa (matéria orgânica), geotérmica (do interior da Terra) e oceânica (das marés e ondas). Embora algumas apresentem intermitência na geração, como a eólica e a solar, essas fontes não emitem gases de efeito estufa durante o processo de geração de eletricidade e são consideradas limpas, especialmente quando comparadas às fontes fósseis.

Dentro do aspecto das energias renováveis, algumas formas de conversão são consideradas tradicionais, como o uso do fogão movido a lenha. Por sua vez, as fontes modernas podem ser subdivididas em convencionais e novas. As “convencionais” referem-se a tecnologias já dominadas e amplamente disseminadas no mercado há décadas, como as usinas hidrelétricas. Já as “novas”, que incluem tecnologias emergentes e em ascensão comercial, como painéis solares, turbinas eólicas e biomassa “moderna” (Goldenberg; Lucon, 2007).

Silva *et al.* (2003) salienta que o surgimento e a crescente relevância das fontes renováveis de energia estão diretamente ligados à preocupação global com o aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, um tema que tem sido debatido em conferências internacionais como Rio-92, Kioto-97 e Bonn-2001. A busca por soluções para mitigar os impactos ambientais causados pelo uso

intensivo de fontes não renováveis, especialmente os combustíveis fósseis, impulsionou a busca por alternativas mais limpas. Nesse contexto, as fontes renováveis emergiram como uma estratégia crucial, atuando tanto do lado da oferta de energia, ao diversificar a matriz energética mundial e reduzir os riscos de descontinuidade no abastecimento, quanto do lado do consumo, ao incentivar o uso mais eficiente da energia.

2.1.2.1 Energia eólica

A energia eólica, gerada a partir do vento, possui um histórico de utilização que remonta à antiguidade, empregada em embarcações e moinhos. O processo de geração ocorre através de grandes turbinas, conhecidas como aerogeradores, instaladas em locais com ventos consistentes, cujo movimento aciona um gerador para produzir eletricidade. O grande potencial para expansão dessa fonte renovável a posiciona como um pilar fundamental para o futuro energético sustentável (Lavezzo, 2016).

A energia eólica, ou energia dos ventos, aproveita a energia cinética do ar em movimento. Essa energia pode ser convertida em eletricidade por indução eletromagnética ou utilizada para trabalhos mecânicos, como bombear água e triturar grãos (Ramalho; Oliveira; Miranda, 2022).

Segundo Dutra (2008) a energia eólica, com sua versatilidade e potencial, encontra diversas aplicações que variam desde soluções para locais remotos até grandes parques geradores conectados à rede elétrica. Compreender as diferentes configurações e suas características é fundamental para explorar o potencial dessa fonte renovável. Existem quatro diferentes sistemas de aplicação de energia eólica: isolado; híbrido sem conexão à rede; interligados à rede e off-shore.

Sistemas isolados operam sem conexão à rede elétrica, geralmente utilizando baterias para armazenamento de energia ou para bombear água para reservatórios. Um controlador de carga é essencial para proteger as baterias, e um inversor converte a energia para equipamentos de corrente alternada. São ideais para locais remotos (Dutra, 2008).

Sistemas híbridos combinam múltiplas fontes de energia (ex: eólica, solar, diesel) sem conexão à rede. Embora mais complexos, oferecem maior confiabilidade

para atender a mais usuários. Exigem um controle otimizado das fontes e também necessitam de um inversor (Dutra, 2008).

Sistemas interligados à rede conectam grandes parques eólicos diretamente à rede elétrica, entregando toda a energia gerada sem necessidade de armazenamento. Essa é a aplicação mais comum para a geração eólica em larga escala (Dutra, 2008).

Sistemas off-shore são instalações eólicas no mar. Apesar dos custos mais altos de transporte, instalação e manutenção, estão crescendo devido ao esgotamento de áreas terrestres e aos ventos mais fortes e constantes no oceano. Exigem tecnologia adaptada e logística especializada para o ambiente marinho (Dutra, 2008).

2.1.2.2 Energia solar

A energia solar é uma fonte inesgotável que pode ser aproveitada como calor ou luz. No formato de calor, painéis coletores térmicos aquecem a água para uso residencial e industrial ou para gerar eletricidade. No formato de luz, painéis fotovoltaicos convertem a radiação solar diretamente em eletricidade, usando materiais semicondutores, como o silício. Usinas heliotérmicas, por sua vez, utilizam espelhos para concentrar a luz solar, aquecendo a água para gerar vapor e, conseqüentemente, eletricidade (EPE, 2018).

A energia solar, baseada no efeito fotovoltaico, foi observada pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel. Em 1883, o inventor americano Charles Fritts construiu a primeira bateria solar de selênio, que possuía apenas 1% de eficiência, mas gerou grande repercussão. A primeira célula solar à base de silício, com 6% de eficiência, foi desenvolvida em 1954 por cientistas da Bell Labs. Apesar do alto custo dos sistemas fotovoltaicos e do baixo rendimento da tecnologia atual, a energia solar tem um potencial ilimitado, já que a quantidade de energia que o sol fornece à Terra diariamente é cerca de 10.000 vezes maior do que o consumo de toda a população mundial (Machado; Miranda, 2015).

De acordo com Bozio (2018) a energia solar é explorada por meio de duas principais tecnologias: a fotovoltaica e a heliotérmica. A fotovoltaica utiliza painéis, frequentemente feitos de silício e instalados em grandes áreas, para converter a irradiação solar diretamente em eletricidade. Já a tecnologia heliotérmica foca na geração de eletricidade através do aquecimento de um fluido, operando de forma

similar a uma usina termelétrica convencional. Dessas duas, a energia solar fotovoltaica tem se destacado como a mais competitiva e amplamente utilizada.

A energia solar é uma fonte limpa e renovável, sem poluir o meio ambiente e sendo inesgotável. No entanto, sua utilização ainda é limitada devido aos altos custos de fabricação e instalação dos painéis solares, além da dificuldade de armazenamento (Lavezzo, 2016). No Brasil, o interesse pela energia fotovoltaica cresce não apenas por ser uma fonte limpa e renovável, mas também pelas condições geográficas e climáticas favoráveis. A facilidade em encontrar terrenos adequados para a instalação de painéis solares, sem comprometer o meio ambiente ou a produção agrícola, contribui para esse cenário promissor (Vian, 2021).

A energia solar oferece benefícios ambientais significativos, já que o Sol atua como um vasto reator de fusão, irradiando diariamente um potencial energético incomparável para a Terra. Sendo a fonte primordial, ela é essencial para quase todas as outras fontes de energia usadas pela humanidade (Lavezzo, 2016).

2.1.2.3 Energia hidrelétrica

A energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento da água dos rios. Nela, a energia potencial da água move turbinas que a transformam em energia mecânica e, subsequentemente, em eletricidade. Sua produção varia com o regime de chuvas, e a conservação ambiental da bacia hidrográfica é crucial para o bom funcionamento das usinas (EPE, 2018).

A energia hidráulica foi pioneira na substituição do trabalho animal por mecânico, sendo usada para bombear água e moer grãos devido à sua disponibilidade, facilidade de aproveitamento e caráter renovável. No Brasil, essa fonte tem sido crucial para o desenvolvimento econômico e social, atendendo a diversas demandas e promovendo a integração regional. A hidrelétrica continua sendo a principal fonte de energia elétrica brasileira, e a previsão é que, mesmo com as crescentes restrições e o avanço de outras fontes, ela ainda será responsável por grande parte da expansão da capacidade de geração nos próximos anos (ANEEL, 2005).

A classificação de uma usina hidrelétrica é definida por variáveis interdependentes como a altura da queda d'água, vazão, capacidade instalada, tipo de turbina, localização, e tipo de barragem e reservatório. A escolha do local influencia

a queda e a vazão, que determinam a capacidade instalada e, conseqüentemente, o tipo de turbina, barragem e reservatório. Existem reservatórios de acumulação, que estocam água e regulam o fluxo, e a fio d'água, que geram energia com o fluxo contínuo do rio. A altura da queda é classificada em baixa, média ou alta, embora não haja consenso sobre as medidas exatas (ANEEL, 2008).

A potência instalada é um fator crucial que determina o porte da usina. A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) classifica as usinas hidrelétricas em três categorias: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), que possuem até 1 MW de potência instalada; Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com potência entre 1,1 MW e 30 MW; e Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), que são as de maior porte, com mais de 30 MW de potência (ANEEL, 2008).

2.1.2.4 Energia geotérmica

A energia geotérmica é definida como o calor armazenado sob a superfície da Terra, originado de diversas fontes como o fluxo geotérmico profundo, radiação solar absorvida e águas subterrâneas. Ela é categorizada com base na sua entalpia, que se refere à quantidade de energia térmica que um fluido pode trocar com o ambiente. Este sistema utiliza a estabilidade da temperatura do solo para reduzir o consumo de energia elétrica em até 75% em sistemas de climatização (Omido; Barboza; Moreira Júnior, 2017).

No entanto, estudos demonstram que recursos geotérmicos de baixa ou moderada temperatura podem ser explorados com eficiência em diversas regiões, mesmo aquelas sem atividade vulcânica. Os sistemas geotérmicos são classificados em três grupos principais: baixa entalpia (50 a 150 °C), que utiliza água subterrânea quente como fonte de calor; alta entalpia (150 a 300 °C), que extrai vapor para movimentar turbinas e gerar eletricidade; e sistemas de rochas secas e quentes, que circulam água em rochas profundas e aquecidas para gerar energia. Esses recursos são considerados fundamentais para uma sociedade mais sustentável (Arboit *et al.*, 2013).

A tecnologia de exploração geotérmica evoluiu, permitindo que as atividades produtivas se adequem às características da fonte disponível. Poços profundos são usados para extrair fluidos aquecidos de reservatórios subterrâneos. Dependendo da temperatura, essa energia pode ser utilizada diretamente (entre 35 °C e 148 °C) para

aplicações residenciais, agrícolas e industriais, ou para a produção de eletricidade em temperaturas acima de 300 °C. Apesar de seus benefícios, a energia geotérmica enfrenta desafios como o baixo rendimento, as restrições de distância entre produtor e consumidor e o alto custo inicial. No entanto, seu uso já evita a combustão de bilhões de barris de petróleo anualmente (Rabelo *et al.*, 2002).

Segundo Rabelo *et al.* (2002) as aplicações da energia geotérmica se dividem em dois grandes grupos: a produção de eletricidade e o uso direto do calor. Para a geração de eletricidade, os sistemas são escolhidos com base na natureza da fonte geotérmica. O método dry steam (DS) é usado quando a fonte produz vapor diretamente, sendo este o sistema mais raro. O single/double flash (1F/2F) é aplicado em fontes que produzem água aquecida ou uma mistura de vapor e água, onde o vapor é separado para movimentar as turbinas. Por fim, o sistema binário (B) é o mais versátil, podendo operar com temperaturas médias ou baixas. Neste método, o fluido geotérmico aquece um fluido refrigerante em um circuito fechado, que por sua vez move a turbina. Este sistema também permite a re-injeção do fluido geotérmico no poço, eliminando o consumo de água.

2.1.2.5 Energia oceânica

A energia oceânica é obtida a partir do movimento das águas dos oceanos, aproveitando as ondas, marés e correntes marinhas para converter a energia mecânica em energia elétrica. Atualmente, o aproveitamento desta fonte energética ainda está em desenvolvimento, com poucas usinas em operação no mundo (EPE, 2018).

Segundo Reis *et al.* (2003) a energia oceânica é uma fonte de energia limpa, renovável e com alta densidade, podendo alcançar uma produção global de 40 bilhões de MW. O recurso oceânico é dividido em três categorias principais: térmica, química e mecânica. A energia térmica, também conhecida como OTEC, é gerada a partir da conversão da energia solar acumulada nos oceanos em eletricidade. Esse processo utiliza uma turbina de alta pressão que opera com fluidos de baixo ponto de ebulição. Já a energia química, ou Energia do Gradiente de Salinidade, é obtida por meio da osmose, onde a água doce é salinizada para movimentar uma turbina hidráulica. A energia mecânica, por sua vez, é proveniente do movimento das marés, correntes marinhas e ondas.

O oceano, além de ser fonte de petróleo, também oferece potenciais energéticos alternativos, como o gradiente térmico vertical, ondas e correntes marinhas. O gradiente térmico vertical, que representa o maior potencial energético do oceano, pode ser aproveitado por usinas de Conversão de Energia Térmica Oceânica (OTEC). Essas usinas funcionam como máquinas térmicas, utilizando a diferença de temperatura entre a água quente da superfície e a água fria das profundezas para acionar turbinas geradoras de eletricidade (Lima, 2010).

A energia Ondomotriz, uma subdivisão da energia mecânica, é gerada pelas ondas do mar e é uma das fontes de energia renovável com maior potencial para abastecer países com costa marítima. A usina de Energia Ondomotriz pode gerar eletricidade em até 90% do tempo de funcionamento e é possível utilizá-la em conjunto com outras fontes, como a eólica e a solar. No entanto, uma desvantagem significativa é o alto custo financeiro de instalação do maquinário, apesar de os custos de operação serem baixos (Reis *et al.*, 2021).

De acordo com Lima (2010) a geração de energia a partir das ondas de gravidade no oceano, apesar de ter um potencial energético inferior ao gradiente térmico, tem sido objeto de diversos estudos, resultando no desenvolvimento de variados mecanismos de conversão para energia elétrica. Esses dispositivos podem aproveitar o movimento orbital das partículas fluidas, o deslocamento da superfície da água, ou a variação de pressão do ar em câmaras causada pela passagem das ondas. A climatologia de ondas de uma região é crucial para o planejamento da instalação e estimativa do potencial energético, sendo investigada por meio de medições diretas ou modelos numéricos.

2.1.2.6 Biomassa

Biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada para produzir energia, como a lenha e o carvão, e mais recentemente, outras formas. Suas vantagens incluem o aproveitamento direto por combustão e a possibilidade de reduzir impactos socioambientais, embora sua eficiência ainda represente uma limitação em pesquisa. Por ser uma fonte renovável e capaz de contribuir para a redução do uso de combustíveis fósseis, a biomassa tem ganhado destaque na diversificação da matriz energética global. Apesar de emitir gases de efeito estufa durante a combustão, essas emissões podem ser parcialmente

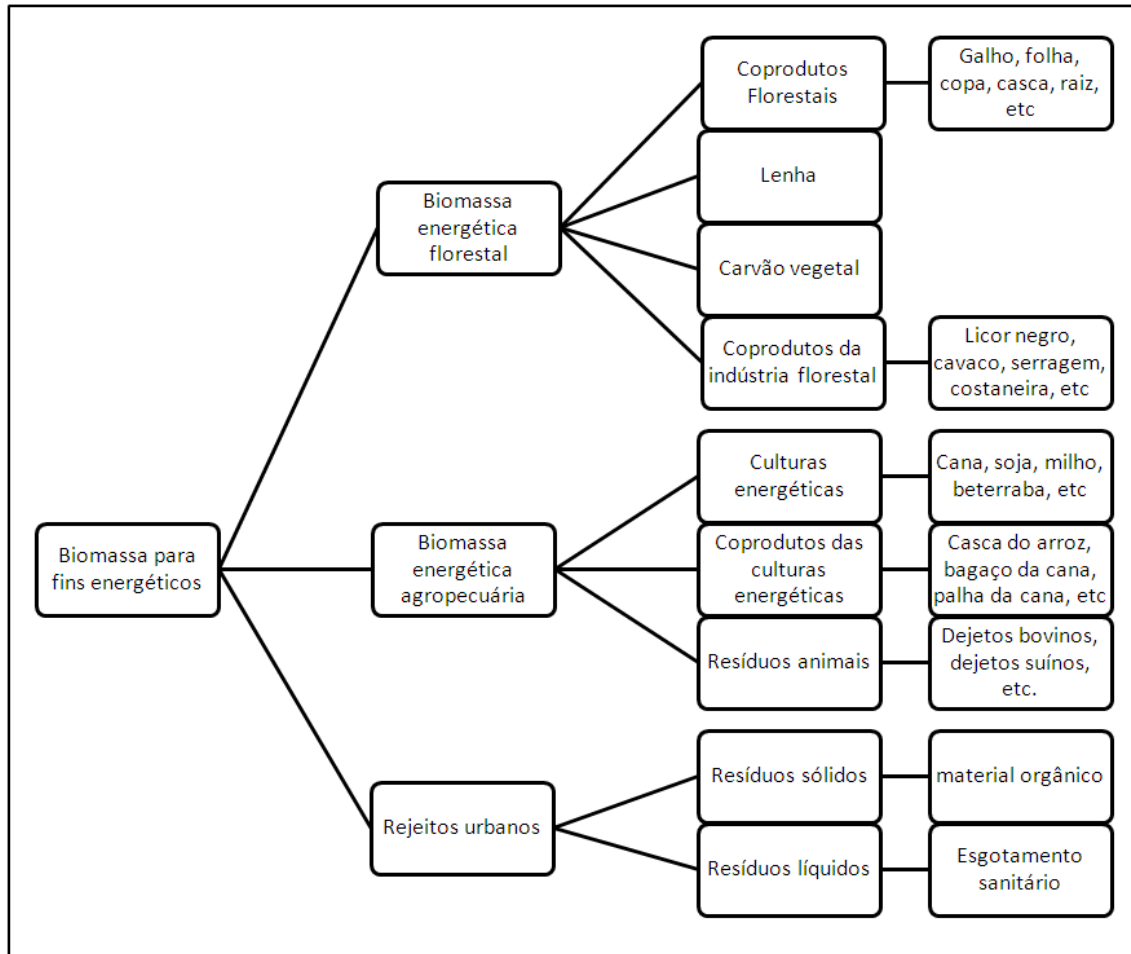
compensadas pelo ciclo do carbono, desde que haja manejo sustentável. A biomassa é classificada em florestal, agrícola e rejeitos urbanos, e seu potencial energético varia conforme a matéria-prima e a tecnologia de conversão. Existem diversas rotas tecnológicas para sua utilização, que envolvem processos termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos para gerar eletricidade (Cardoso, 2012).

A biomassa oferece diversas tecnologias de conversão energética, adequadas para diferentes escalas, desde a gaseificação e cogeração até a recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e gás de aterros sanitários. Atualmente, o foco principal tem sido a produção de biocombustíveis líquidos para o setor de transportes, como o etanol e o biodiesel, devido às crescentes preocupações com a oferta global de petróleo (Goldemberg, 2009).

Apesar de sua eficiência ainda ser um desafio, o aproveitamento direto da biomassa por combustão é uma vantagem, e tecnologias como gaseificação e pirólise estão sendo aprimoradas para aumentar sua eficiência e reduzir impactos. Com dois trilhões de toneladas no planeta, a biomassa tem um potencial energético enorme, o que, somado à exaustão de fontes não renováveis e às crescentes pressões ambientais, sugere que seu uso na geração de eletricidade, especialmente em sistemas de cogeração e para demandas isoladas, aumentará significativamente no futuro (ANEEL, 2002).

Sob a perspectiva de sua origem, a biomassa para fins energéticos pode ser organizada em diferentes classificações, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Classificação da biomassa segundo sua origem para fins energéticos



Fonte: Hersen (2020).

Brand (2017) descreve que a biomassa florestal é o material orgânico proveniente de árvores e resíduos vegetais, como troncos, casca e galhos, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável. O manejo sustentável dessa biomassa envolve a extração planejada e seletiva de madeira e resíduos, preservando a capacidade de regeneração da vegetação e garantindo a conservação dos recursos naturais. Além disso, a coleta deve considerar aspectos sazonais, ajustando as estratégias de corte e armazenamento de acordo com a estação seca ou chuvosa para otimizar a qualidade energética do material.

Assim, um dos principais exemplos de utilização da biomassa florestal é a lenha, que inclui ramos, troncos e pedaços de madeira, é uma forma de biomassa que serve como combustível. Existem dois tipos de obtenção: a lenha catada de matas nativas e a lenha para fins comerciais, que é substituída por madeira de floresta plantada, principalmente de eucalipto. A exploração predatória da lenha nativa causou

problemas ambientais como a degradação do solo e a desertificação. Os resíduos industriais da madeira, como serragem, também podem ser usados para gerar energia. O processo de conversão em energia elétrica envolve a queima da biomassa em caldeiras, que produzem vapor superaquecido para acionar turbinas e geradores (Santos; Nascimento; Alves, 2017).

O carvão vegetal é considerado parte também da biomassa florestal, sendo uma fonte de energia renovável obtida a partir da queima parcial da madeira. Ele tem sido utilizado como combustível desde a era primitiva, quando o homem descobriu que a madeira queimada produzia calor de forma mais controlável e com menos fumaça do que a queima direta da lenha. Embora em alguns casos tenha sido substituído por combustíveis fósseis, em muitos países em desenvolvimento ele ainda é considerado um combustível essencial por razões econômicas ou financeiras. O processo de produção, conhecido como carbonização, envolve o aquecimento da madeira em um ambiente fechado para transformá-la em uma fração rica em carbono (Santos; Hatakeyama, 2012).

Cardoso (2012) ressalta que, na biomassa florestal, há também o aproveitamento do licor negro, conhecido como lixívia, é um subproduto líquido gerado no processo de produção da celulose. O licor negro é obtido após o processo de cozimento da madeira, na etapa de digestão, onde uma solução de hidróxido de sódio e sulfito de sódio (conhecida como licor branco) é adicionada para separar a celulose dos outros componentes lenhosos. Essa mistura complexa é composta por substâncias orgânicas dissolvidas da madeira e por seus componentes inorgânicos.

De acordo com Furtado *et al.* (2010) a biomassa florestal é definida como os resíduos particulados gerados pela indústria madeireira, que podem representar entre 40% a 70% do volume da matéria-prima original. Esses resíduos, que por muito tempo não tiveram uma destinação adequada, agora são aproveitados como fonte de energia, especialmente através da técnica de briquetagem. Este processo transforma o material particulado em briquetes aglomerados sólidos que concentram a energia disponível, facilitam o transporte e manuseio, e eliminam a necessidade de adequação de caldeiras, tornando o uso desses resíduos uma solução energética mais eficiente e sustentável.

Em relação a biomassa agropecuária, Cardoso (2012) destaca que é um tipo de biomassa energética que inclui todos os produtos e subprodutos de origem agrícola não florestal. Essa biomassa é proveniente de plantações anuais, como cana-de-

açúcar, milho, arroz, e soja, que são selecionadas com base em seus teores de amido, celulose, carboidratos e lipídios. Ela utiliza rotas tecnológicas de transformação, como fermentação, hidrólise e esterificação, para produzir combustíveis líquidos como o etanol, o biodiesel e diversos óleos vegetais. Além dos combustíveis, a biomassa agropecuária pode ser utilizada na geração de energia térmica e elétrica, aproveitando resíduos como o bagaço de cana, a palha de milho e soja, a casca de arroz e o capim-elefante.

Para Colatto e Langer (2011) os resíduos de animais, especialmente provenientes da pecuária, representam uma importante fonte de biomassa para geração de energia renovável. Por meio da digestão anaeróbica da matéria orgânica presente em dejetos de bovinos, suínos, aves e equinos, ocorre a produção de biogás, composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esse biogás pode ser utilizado para geração de energia térmica, elétrica e até como combustível veicular, oferecendo uma alternativa sustentável e de baixo custo para propriedades rurais.

Além disso, a biomassa proveniente de rejeitos urbanos e industriais, como resíduos sólidos, líquidos e lodo de estações de tratamento de esgoto, também oferece grande potencial energético, sobretudo pela geração de biogás. De acordo com Santos, Nascimento e Alves (2017), os rejeitos urbanos sólidos e líquidos, após recolhidos, devem passar por um sistema de gerenciamento e seleção que identificaria sua destinação, podendo ser utilizados para a geração de energia elétrica a partir da queima direta, da gaseificação ou através do biogás gerado em um aterro energético.

Contudo, conforme destaca Nascimento *et al.* (2019) os resíduos sólidos urbanos, especialmente a matéria orgânica em sua composição, podem ser uma fonte renovável de energia. O aproveitamento energético ocorre a partir da decomposição dessa matéria orgânica, que gera biogás. O biogás, por sua vez, pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e/ou térmica. Além de gerar energia, o aproveitamento do biogás também contribui para a redução de gases de efeito estufa, como o metano, que tem um potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao do dióxido de carbono.

E por fim, segundo Santos, Nascimento e Alves (2017) os resíduos urbanos líquidos são os efluentes líquidos, tanto domésticos quanto comerciais. Eles são descartados nas redes de esgoto e, em seguida, tratados em estações de tratamento.

O esgoto urbano é composto principalmente de matéria orgânica residual diluída. Após o tratamento, é produzida uma massa orgânica chamada lodo, que está sendo pesquisada para a geração de energia elétrica por meio da queima de biogás produzido a partir de digestão anaeróbica.

2.2 Matriz elétrica brasileira

A história da eletricidade no Brasil teve início em 1831, quando D. Pedro II concedeu permissão a Thomas Edison para implementar seus equipamentos no país com a finalidade de iluminação pública. Os marcos iniciais incluem a instalação das primeiras lâmpadas na estação ferroviária do Rio de Janeiro em 1881, e a inauguração da primeira linha de bondes elétricos e do primeiro serviço de iluminação pública municipal em Campos, no Rio de Janeiro, em 1883. No mesmo ano, também entraram em operação a primeira usina hidrelétrica do país, em um afluente do rio Jequitinhonha, e a primeira usina termelétrica, em Campos (RJ). A primeira hidrelétrica de grande porte, Marmelos-zero, foi inaugurada em 1889, conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2022a).

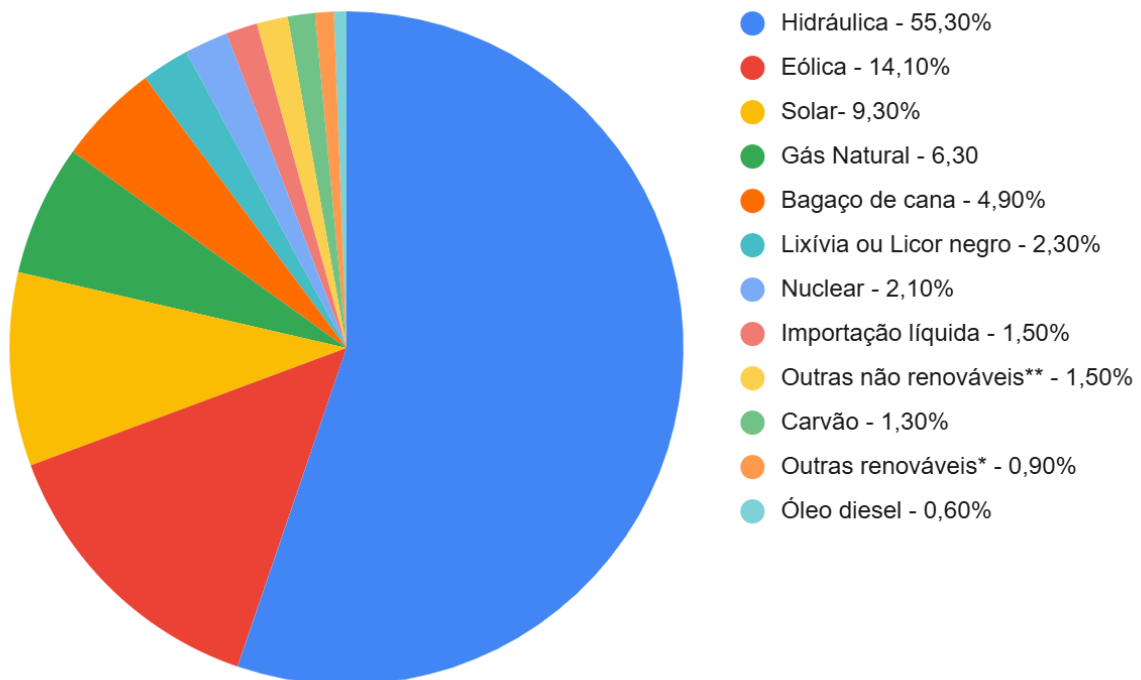
Aproveitando essa conjuntura e a disponibilidade de capitais estrangeiros, o grupo canadense Light chegou ao Brasil em 1899, inicialmente em São Paulo e depois no Rio de Janeiro, favorecido pela chamada “cláusula ouro”, que garantia correção cambial nas tarifas. Posteriormente, em 1927, o grupo norte-americano Amforp também se estabeleceu no país, adquirindo empresas brasileiras de energia diante da incapacidade de expansão do capital nacional. Assim, o setor elétrico brasileiro teve origem profundamente ligado à atuação de grupos estrangeiros e à lógica liberal da Primeira República (Gomes; Viera, 2009).

Corrêa (2005) destaca que no Rio Grande do Sul, o setor elétrico contava com as instalações geradoras da Prefeitura de Porto Alegre e do governo estadual, além da atuação da empresa inglesa Riograndense Light and Power Syndicate Limited, estabelecida em Pelotas em 1912. Em Curitiba, a prestação de serviços era controlada, a partir de 1910, pela inglesa South Brazilian Railways Company Limited. Já em Santa Catarina, especificamente na região de Joinville, o atendimento era realizado pela Empresa Sul Brasileira de Eletricidade S.A., de propriedade da alemã Berliner Handels Gesellschaft.

Esse contexto histórico evidencia que, desde o início, a matriz elétrica brasileira esteve vinculada a interesses externos e a uma estrutura produtiva ainda limitada. Essa dependência dialoga com a realidade mundial, a matriz energética global à época ainda era predominantemente composta por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. As energias renováveis, excluindo a hidráulica e a biomassa, representam uma fatia mínima de 3,1% da matriz mundial. Ao incluir a energia hidráulica e a biomassa, as fontes renováveis somam apenas cerca de 14% do total global. Essa dependência de combustíveis fósseis é um fator significativo para a emissão de GEE, contribuindo diretamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas (EPE, 2018).

No Gráfico 1 apresenta a composição da matriz elétrica brasileira, evidenciando a predominância das fontes renováveis. Esses dados demonstram que o Brasil possui um perfil mais limpo e sustentável, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Gráfico 1 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados da Empresa de Pesquisa Energética (2025a).

A matriz elétrica brasileira se destaca globalmente por sua elevada participação de fontes renováveis, característica que a diferencia da média mundial. De acordo

com Tavares (2023), aproximadamente 78% da geração elétrica nacional provinha de fontes renováveis naquele período. Contudo, dados mais recentes indicam uma ampliação dessa participação, alcançando 86,8%, conforme apresentado no Gráfico 1. Atualmente grande parte da energia elétrica gerada no Brasil provém de fontes renováveis, como a energia hidráulica, eólica, solar fotovoltaica e biomassa. Essa característica confere ao país uma posição privilegiada na transição energética global, contribuindo para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE's) e mitigando os impactos das mudanças climáticas.

A matriz energética do Brasil se destaca globalmente pela sua alta proporção de fontes renováveis, alcançando 50% do total. Essa composição contrasta significativamente com o padrão mundial, que depende majoritariamente de combustíveis fósseis. As principais fontes renováveis brasileiras incluem hidráulica, biomassa (como a lenha, carvão vegetal e derivados de cana), além de um crescente uso de energia eólica e solar. Esse modelo energético confere ao país uma vantagem estratégica, não apenas por seus custos operacionais mais baixos, mas principalmente por sua menor emissão de gases de efeito estufa, o que o posiciona de forma favorável nos debates sobre mudanças climáticas e transição energética (EPE, 2025).

Apesar da robusta participação das fontes renováveis, a matriz elétrica brasileira ainda apresenta uma forte dependência da energia hidráulica, que atualmente responde por aproximadamente 55,3% da eletricidade consumida, conforme apresentado no Gráfico 1. Embora essa fonte seja abundante e renovável, sua predominância acarreta desafios, especialmente em períodos de estiagem prolongada. Nesses cenários, a redução dos níveis dos reservatórios compromete a oferta de energia e demanda a complementação por usinas termelétricas, geralmente abastecidas com combustíveis fósseis, o que eleva os custos de geração e intensifica as emissões de gases de efeito estufa, impactando tanto o meio ambiente quanto o consumidor final (Tavares, 2023).

2.3 Fundamentação Teórica

2.3.1 Economia circular

A economia circular, conforme descrito por Ellen MacArthur Foundation (2012), propõe uma transformação sistêmica que transcende o modelo linear de produção e consumo. Ao focar na regeneração de sistemas biológicos e técnicos, busca-se maximizar o valor dos materiais, evitando a geração de resíduos. Essa abordagem é particularmente relevante para a valorização de biomassa, como destacado onde "injetaria nutrientes biológicos valiosos em um caminho verdadeiramente circular".

A Economia Circular emergiu globalmente como um modelo promissor para contrapor o sistema linear de produção, que gera vasto desperdício de matéria e energia. Iniciada na Alemanha nos anos 90 e expandida para a Ásia no início dos anos 2000, a economia circular propõe um sistema regenerativo, buscando reduzir o consumo de recursos, o lixo, a poluição e a perda de energia. Países como Alemanha, Japão e China foram pioneiros na implementação de legislações para promover ciclos fechados de tratamento de resíduos e uso eficiente de recursos (Leitão; Ferreira, 2022).

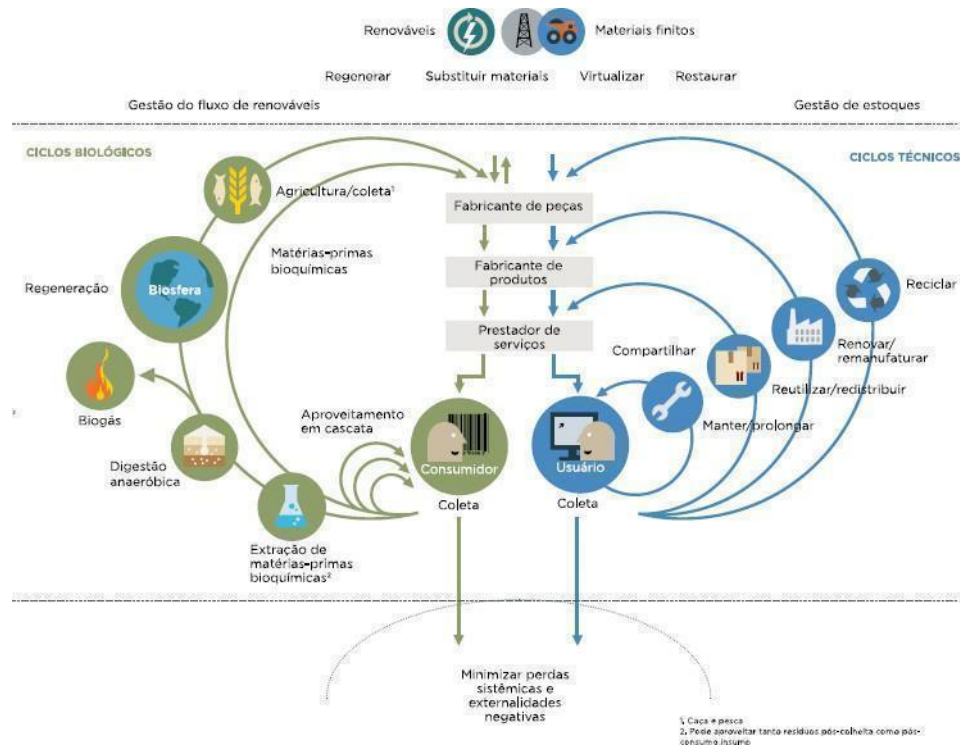
Boff (2015) salienta que nos últimos séculos, desde o início da industrialização, bilhões de toneladas de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, nitritos e metano, têm sido lançados na atmosfera, resultando em um perigoso aquecimento global. Esses gases, como o dióxido de carbono e o metano, retêm o calor do sol, levando ao aquecimento do planeta. Isso resulta em eventos climáticos extremos, como enchentes e secas, e na elevação do nível do mar.

A economia circular também representa uma profunda mutação no pensamento produtivo e de negócios, integrando lucratividade com responsabilidade ambiental. Essa abordagem concilia os pilares econômico e ambiental, antes vistos como desconectados, por meio de novas formas de produção e consumo. Empresas podem, assim, gerar lucro enquanto adotam uma ética que preserva o meio ambiente, marcando uma evolução crucial no panorama econômico (Atalanio; Ibiapina; Machado, 2022).

O diagrama de borboleta da economia circular ilustra vividamente o fluxo contínuo de materiais por meio de dois ciclos interconectados: o ciclo técnico e o ciclo biológico. No ciclo técnico, o foco é maximizar a vida útil de produtos e componentes, mantendo-os em uso através de estratégias como reuso, reparo, remanufatura e reciclagem. Paralelamente, o ciclo biológico se concentra na devolução de nutrientes de materiais biodegradáveis à natureza, permitindo a regeneração dos ecossistemas

e fechando o ciclo de forma segura e benéfica para o planeta (EMF, 2021). A Figura 2 apresenta o diagrama.

Figura 2 - Diagrama borboleta



Fonte: EMF - Ellen Macarthur Foundation (2021).

Na perspectiva energética, o Diagrama de Borboleta destaca que o aproveitamento eficiente de fontes renováveis está alinhado ao ciclo biológico, promovendo fluxos seguros e sustentáveis, enquanto o uso de fontes não renováveis, situadas no ciclo técnico, demanda estratégias de prolongamento de vida útil e minimização de impactos, por meio da inovação tecnológica e da gestão eficiente de resíduos (EMF, 2021). Assim, a transição para uma matriz energética mais limpa requer a reconfiguração dos sistemas produtivos, incorporando princípios circulares que evitem a obsolescência precoce dos materiais e reduzam o desperdício de energia.

Diante da necessidade de um novo paradigma, a Economia Circular surge como uma abordagem promissora, propondo uma mudança fundamental nos sistemas de produção e consumo. A Economia Circular visa a restauração do valor dos recursos, mantendo produtos e materiais em seu nível máximo de utilidade e valor pelo maior tempo possível. Distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos, a economia

circular busca dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos finitos, substituindo a lógica de produção tradicional por um modelo mais autossuficiente e regenerativo. Apesar de sua crescente adoção no mercado, a pesquisa acadêmica sobre as melhores práticas da EC ainda é um campo amplamente inexplorado (Lima; Leitão; Silva, 2021).

Segundo Ellen MacArthur Foundation (2012), a economia circular se estrutura em três princípios fundamentais que buscam redefinir a forma como produzimos e consumimos. Primeiramente, visa preservar e aumentar o capital natural, controlando o uso de recursos finitos e otimizando os fluxos de recursos renováveis. Isso envolve a distinção entre materiais biológicos (pensados para reinserção na natureza) e técnicos (que exigem recuperação especializada).

Em segundo lugar, busca-se a otimização da produção de recursos por meio da circulação contínua de produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade. Isso é alcançado através de projetos focados em manufatura, reforma e reciclagem, prolongando a vida útil dos produtos e incentivando o compartilhamento, além de garantir a reinserção biológica segura de materiais apropriados. Por fim, o terceiro princípio foca em fomentar a eficácia do sistema, eliminando as externalidades negativas desde a fase de projeto, o que implica reduzir danos causados pelo consumo e priorizar métodos como a reciclagem para fechar os ciclos e otimizar os circuitos internos (EMF, 2012).

As mudanças climáticas, causadas pelos gases de efeito estufa, intensificam eventos extremos e exigem uma transição energética urgente. Adoção de energias limpas e renováveis, como solar e eólica, e a sustentabilidade nos processos produtivos são cruciais para reduzir emissões e garantir um futuro ambientalmente seguro.

De acordo com Campello (2021) a economia circular emerge como uma resposta aos desafios da produção tradicional, que se baseia na extração intensiva de recursos naturais e gera acúmulo de resíduos. Ao contrário do modelo linear de "extrair, produzir, usar e descartar", a economia circular propõe uma transformação radical, buscando maximizar o valor dos recursos ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Isso implica em novas formas de produção, consumo e relacionamento na cadeia de suprimentos, visando a eliminação do lixo e a reutilização de materiais como insumos.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 alinha-se a esses princípios, instaurando a responsabilidade compartilhada sobre os resíduos sólidos. O conceito fundamental da economia circular é a reintegração de resíduos nas cadeias produtivas, seja na mesma cadeia (loops fechados) ou em outras (loops abertos), transformando o que seria lixo em um novo insumo. Essa abordagem não apenas minimiza impactos ambientais, mas também otimiza a eficiência dos processos produtivos, gerando valor a partir de algo que antes era descartado (Leitão; Ferreira, 2022).

Contudo, conforme destaca Ellen MacArthur Foundation (2012) a biorrefinaria emerge como o ápice da valorização da biomassa, transformando-a em uma vasta gama de produtos, desde fibras e açúcares até plásticos e combustíveis. Essa abordagem sofisticada de refinamento, que já começa a ser aplicada em escala comercial, ilustra o potencial da economia circular para criar novas cadeias de valor e restaurar a terra, promovendo a fertilidade do solo e aumentando as colheitas.

Essa abordagem inovadora proporciona benefícios significativos para o meio ambiente, os negócios e as pessoas, ao alinhar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade. A logística reserva desempenha um papel crucial na economia circular, facilitando o fluxo de materiais e produtos em ciclos fechados. Ao promover a reutilização, reparo e reciclagem, a economia circular não apenas reduz o impacto ambiental, mas também cria valor econômico e social para todas as partes envolvidas, evidenciando a viabilidade de um modelo de negócios mais responsável (Campello, 2021).

A valorização da biomassa, fundamental para a economia circular, envolve diversas estratégias que minimizam o descarte em aterros, assim como a reutilização de materiais, a extração de bioquímicos e matérias-primas, e a obtenção de nutrientes para o solo e energia. Essas práticas, como a compostagem e a digestão anaeróbica, não só reduzem a pegada ambiental, evitando emissões de gases de efeito estufa, mas também criam valor econômico a partir de o que antes era considerado lixo (EMF, 2012).

Quando aplicada à geração de energia, essa lógica implica o aproveitamento de recursos que, de outra forma, seriam descartados, como é o caso da biomassa florestal e agroindustrial. Nesse contexto, destaca que a economia circular representa uma alternativa necessária ao modelo linear de produção e consumo, que historicamente tem levado à exaustão de recursos e à geração massiva de resíduos.

A incorporação dos princípios da circularidade no setor energético implica não apenas a substituição de fontes fósseis por renováveis, mas também a reestruturação dos processos de geração, distribuição e consumo de energia para reduzir perdas e maximizar o aproveitamento dos recursos naturais (Faria, 2018).

A economia circular prega a ideia de que um produto deve ser usado ao seu máximo e após isso ele retorne ao fornecedor para que o bem seja transformado em um novo, essa modalidade iria auxiliar um consumo mais consciente (Atalano; Ibiapina; Machado, 2022). Ao contrário do modelo linear de “extrair, produzir, usar e descartar”, a economia circular propõe uma transformação radical, buscando maximizar o valor dos recursos ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Isso implica em novas formas de produção, consumo e relacionamento na cadeia de suprimentos, visando a eliminação do lixo e a reutilização de materiais como insumos (Campello, 2021).

De acordo com Lima, Leitão e Silva (2021) o modelo econômico convencional (Economia Linear), baseado na extração desenfreada de recursos naturais, o uso e descarte irresponsável de resíduos, tem causado impactos ambientais severos desde a Primeira Revolução Industrial. Esse sistema de “produzir-usar-descartar” compromete os ecossistemas, acelera as mudanças na paisagem natural em um ritmo insustentável para a natureza e contribui significativamente para o aumento de GEE na atmosfera, como CO_2 e CH_4 , intensificando o efeito estufa e o aquecimento global. A insustentabilidade desse modelo linear se tornou evidente, impulsionando a busca por alternativas mais sustentáveis.

É um consenso que o desenvolvimento energético global arrastou consigo um custo ambiental significativo e preocupante. Séculos de emissões de gases tóxicos que intensificam o efeito estufa, a degradação de vastas áreas terrestres e a poluição de importantes mananciais de água, resultaram em um cenário crítico. Atualmente, embora ainda tímido, um movimento crescente de preocupação ambiental emerge, impulsionado pela ameaça real de esgotamento de recursos naturais essenciais, que coloca em questão a própria sobrevivência humana (Lavezzo, 2016).

Por fim, Faria (2018) conclui que a economia circular é um caminho promissor para um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável, sendo particularmente relevante para países com grande biodiversidade e riqueza natural como o Brasil. A sua adoção no setor energético pode contribuir de forma decisiva para a transição ecológica, garantindo segurança energética, reduzindo impactos ambientais e

promovendo uma economia de baixo carbono. Para isso, será necessário investimento, inovação, políticas públicas adequadas e, sobretudo, um novo olhar sobre como produzimos, consumimos e nos relacionamos com o planeta.

3 METODOLOGIA

3.1 Material

O recorte temporal da pesquisa refere-se ao ano de 2025, sendo este o período mais recente com dados disponíveis e consolidados. A escolha visa garantir a atualidade das informações analisadas, refletindo o cenário mais recente da geração de energia elétrica.

No que se refere ao recorte espacial, esta pesquisa tem como foco a Região Sul do Brasil, composta pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A análise considera o território dos três estados de forma integrada, buscando identificar padrões regionais de especialização na geração de energia elétrica. A delimitação geográfica da pesquisa pode ser visualizada no mapa da Região Sul, apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Mapa da Região Sul



Fonte: IBGE (2012).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025a), o Paraná está localizado ao norte da região Sul do Brasil, fazendo divisa com Mato Grosso do Sul, São Paulo, Santa Catarina, Argentina, Paraguai e Oceano Atlântico, possuindo 399 municípios e uma área de 199.307,939 km². Já o estado de Santa

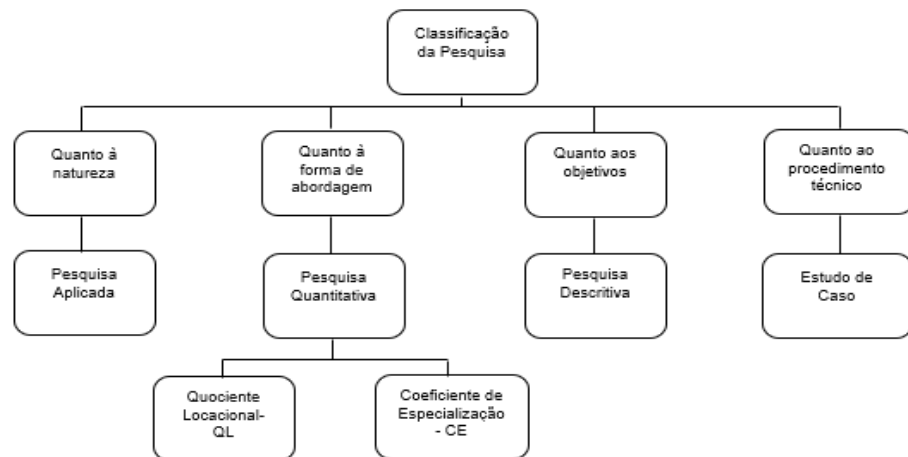
Catarina possui 295 municípios, com uma área de 95.737,954 km² e faz limite com Paraná, Rio Grande do Sul, Oceano Atlântico e com a província argentina de Misiones. Por fim, o Rio Grande do Sul, localizado na extremidade sul do país, com uma área total de 281.737,888 km² e composto por 497 municípios. Suas fronteiras são delimitadas pelo estado de Santa Catarina, Argentina, Uruguai e o Oceano Atlântico.

As informações utilizadas como base para a pesquisa foram extraídas do banco de dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), disponível em ANEEL (2025). Os dados referem-se à potência outorgada (em KW) dos empreendimentos de geração de energia elétrica e foram coletados em 25 de setembro de 2025, considerando apenas as usinas em fase de operação. No caso das usinas hidrelétricas que possuem instalações localizadas em mais de uma unidade da federação ou em território binacional, adotou-se o critério de rateio proporcional da potência outorgada entre os estados ou países correspondentes, de forma a garantir a representatividade regional dos empreendimentos.

3.2 Métodos

A metodologia empregada na presente pesquisa é de natureza aplicada, com uma abordagem quantitativa, com uso de métricas já consolidadas na área da Economia Regional, denominados indicadores de análise espacial ou regional que, segundo Monasterio (2011), têm a capacidade de sintetizar informações e consistem em importante passo para estudos ainda mais avançados. O detalhamento dos procedimentos adotados, que servem como guia para a estrutura do trabalho, encontra-se apresentado na Figura 4, que organiza a estrutura metodológica em quatro categorias principais: natureza, forma de abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

Figura 4 – Classificação da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

A presente pesquisa adotou uma metodologia de natureza aplicada. Segundo Silva e Menezes (2005) a pesquisa aplicada tem como finalidade produzir conhecimentos aplicáveis à prática, direcionados à solução de problemas específicos, considerando as particularidades e interesses do contexto local. Fleury e Werlang (2016) destacam que a pesquisa aplicada busca resolver problemas reais, presentes no dia a dia de instituições, organizações ou comunidades. Ela utiliza conhecimentos já existentes para analisar dados, propor soluções e gerar impactos concretos, unindo prática e teoria de forma a contribuir para melhorias efetivas na realidade estudada.

Em relação a forma de abordagem, a pesquisa foi classificada como quantitativa. De acordo com Günther (2006) a pesquisa quantitativa é um método que se contrapõe à pesquisa qualitativa. Ela se caracteriza pela tentativa de obter o máximo de controle sobre o contexto do estudo, podendo inclusive criar ambientes artificiais para reduzir ou eliminar a interferência de variáveis irrelevantes.

Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa quantitativa se baseia na premissa de que fenômenos e informações podem ser mensurados. Para isso, opiniões e dados são convertidos em valores numéricos, o que permite a sua classificação e análise através de recursos estatísticos.

Dessa forma a pesquisa se baseia na coleta de dados numéricos para testar hipóteses. Ela utiliza a estatística para identificar padrões e comprovar teorias, seguindo um conjunto de processos sequenciais. O problema de pesquisa e as hipóteses são definidos no início do estudo, antes da coleta e análise dos dados. Essa abordagem é comum nas ciências exatas e naturais, mas também pode ser utilizada

nas ciências sociais aplicadas, como na econometria. A pesquisa quantitativa segue uma ordem estruturada, que inclui etapas como a formulação da ideia, a revisão da literatura, o desenvolvimento de hipóteses, a coleta e a análise de dados, culminando na elaboração de um relatório com os resultados (Novaes; Paiva; Gonçalves, 2022).

Para o âmbito dos objetivos de estudo, segue-se a pesquisa descritiva, para Gil (2008) a pesquisa descritiva tem como objetivo principal descrever as características de uma população, fenômeno ou a relação entre variáveis. Utiliza técnicas padronizadas para coletar dados sobre aspectos como idade, renda ou opiniões, podendo também identificar associações entre diferentes fatores. Em complemento Gil (2002) salienta que o principal objetivo é fornecer um retrato detalhado e preciso de um determinado contexto, sendo amplamente utilizada por pesquisadores sociais e organizações para compreender a realidade.

Com respeito ao procedimento técnico da pesquisa, caracteriza-se como estudo de caso. Conforme Silva e Menezes (2005) o estudo de caso é uma metodologia que permite a análise aprofundada e detalhada de um ou de poucos objetos de pesquisa. Ao focar em um contexto específico, essa abordagem possibilita um conhecimento amplo e minucioso do fenômeno investigado, indo além de uma descrição superficial.

Segundo Gil (2008) é um estudo empírico que investiga um fenômeno atual em seu contexto real, onde as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são bem definidas, utilizando diversas fontes de evidência. Ele é útil para explorar situações complexas, descrever um contexto específico, e explicar variáveis causais de fenômenos que não podem ser analisados por levantamentos ou experimentos, podendo ser empregado em pesquisas exploratórias, descritivas e explicativas.

3.2.1 Métricas de mensuração

Alves (2012) destaca que as medidas de especialização comparam a estrutura produtiva de uma região com a de uma região de referência, como o país. Uma das vantagens de usar esses indicadores é que eles anulam o efeito do "tamanho" das regiões, permitindo o cálculo de indicadores confiáveis.

Para Piacenti e Lima (2012) a especialização refere-se ao grau em que uma região concentra sua produção ou emprego em determinados setores, em comparação a outras regiões, revelando sua vocação produtiva e a base de

exportação que sustenta sua economia, sendo mensurada por indicadores como o Coeficiente de Especialização. Monasteiro (2011) descreve que há um indicador utilizado para medir o grau de especialização produtiva ou ocupacional de uma determinada região em relação a uma área de referência, normalmente o país. Seu objetivo é identificar setores em que a região apresenta maior concentração de atividades econômicas ou de empregos do que a média nacional, sendo mensurada pelo Quociente Locacional.

A análise desta pesquisa foi conduzida com base em dois indicadores que previamente já foram mencionados: o Quociente Locacional e o Coeficiente de Especialização. A aplicação desses modelos permitiu mensurar a concentração e a especialização da atividade de energia em cada região.

3.2.1.1 Quociente Locacional (QL)

O Quociente Locacional (QL) é amplamente utilizado como um dos principais indicadores para mensurar a especialização produtiva de determinada atividade em uma região. Conforme apresentado por Cruz *et al.* (2011), sua fórmula original foi adaptada para os objetivos deste estudo, sendo expressa na Equação 1.

$$QL_{ki} = \frac{\frac{P_{ki}}{P_i}}{\frac{P_k}{P}} \quad (1)$$

Em que:

P_{ki} = Potência outorgada de origem k na UF i ;

P_i = Potência outorgada na UF i ;

P_k = Potência outorgada de origem k na Região Sul;

P = Potência outorgada na Região Sul.

A interpretação do Quociente Locacional (QL) segue uma lógica direta, comparando a participação de uma origem de geração em uma unidade da federação (UF) com a sua relevância na Região Sul. Um QL maior que 1 significa que a UF se destaca, sendo relativamente mais especializada naquela origem ou fonte de geração.

Por outro lado, um QL menor que 1 mostra que a origem de geração tem uma representação menor na UF do que a média da Região Sul (Cruz *et al.*, 2011).

Haddad (1989) destaca que medidas de especialização regional são voltadas para a identificação do quão especializadas (distintas) são as regiões, dado algum critério de referência. Nesse sentido, o Quociente Locacional (QL) tem sido muito empregado em estudos dessa natureza, com diferentes variáveis conforme o objetivo da pesquisa. Embora muitos estudos utilizem a variável "emprego" para mensurar especialização, autores como Mattei e Mattei (2017) destacam que a variável pode ser adaptada ao objetivo da pesquisa. Neste caso, opta-se pela potência instalada como indicador mais adequado para o setor energético.

3.2.1.2 Coeficiente de Especialização (CE)

O Coeficiente de Especialização (CE) foi empregado como um dos indicadores para mensurar o grau de especialização da estrutura produtiva. Baseado na abordagem proposta por Cruz *et al.* (2011), o CE é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$CE_i = \frac{1}{2} \sum_k \left| \frac{P_{ki}}{P_i} - \frac{P_k}{P} \right| \quad (2)$$

Em que:

P_{ki} = Potência outorgada de origem k na UF $_i$;

P_i = Potência outorgada na UF $_i$;

P_k = Potência outorgada de origem k na Região Sul;

P = Potência outorgada na Região Sul.

O Coeficiente de Especialização (CE) assume valores entre 0 e 1. De acordo com Lara, Fiori e Zanin (2011), valores próximos de zero indicam que a estrutura produtiva da unidade federativa se assemelha à da Região Sul como um todo. Em contrapartida, valores próximos de um indicam que a estrutura regional é significativamente distinta do padrão da região de referência.

Como destaca Lima *et al.* (2009), o CE é uma medida que permite quantificar as diferenças entre duas estruturas econômicas, seja considerando a distribuição da

produção, seja a da mão de obra entre os setores. No contexto deste estudo, sua aplicação está voltada à comparação da composição da atividade energética entre as unidades federativas da Região Sul, permitindo identificar padrões de especialização ou diversificação da matriz elétrica regional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos a partir da aplicação dos indicadores de especialização Quociente Locacional (QL) e Coeficiente de Especialização (CE), no setor de geração de energia elétrica na Região Sul do Brasil. A finalidade da aplicação desses indicadores é compreender a dinâmica de concentração das fontes energéticas predominantes em cada região, permitindo a identificação de áreas com especialização. Busca-se, por meio desta análise, interpretar como as características territoriais e produtivas da Região Sul influenciam o desempenho do setor, evidenciando os padrões de especialização que configuram sua matriz elétrica regional.

De forma complementar, este capítulo também se dedica à sistematização e à análise interpretativa dos dados coletados, a qual se fundamenta na metodologia definida na etapa anterior do trabalho. Os resultados obtidos com os indicadores (QL e CE) permitirão identificar a relevância e o papel das fontes de energia analisadas no processo de transição energética regional. Essa abordagem contribui para aprofundar a compreensão das dinâmicas territoriais da geração de energia, apontando as regiões com maior potencial de desenvolvimento energético e, conseqüentemente, fornecendo subsídios concretos para a formulação de políticas públicas voltadas à diversificação e à eficiência da matriz energética do Sul do país.

Para avaliar a relevância das fontes renováveis no contexto comparativo, é fundamental notar que a Região Sul é um pilar estrutural na manutenção da matriz elétrica nacional. A contribuição total do Sul (32.781.790,44 kW) representa aproximadamente 8,97% da potência total do Brasil (365.401.448,81 kW). Mais crucialmente, a matriz elétrica da Região Sul é hegemonicamente renovável, com 89,94% de sua potência total. Essa predominância é sustentada principalmente pela fonte hídrica (25.033.452,50 kW), com uma dependência notável no Paraná. Assim, a região não só contribui com um volume significativo de energia, mas garante que essa contribuição seja majoritariamente de fontes renováveis, um perfil que se alinha e reforça o caráter altamente renovável da matriz elétrica brasileira.

Apesar da forte dependência hídrica, o Sul demonstra uma diversificação de fontes renováveis emergentes que é vital para o balanço regional. A matriz da região é marcada por especializações estaduais, com o Rio Grande do Sul concentrando a maior parte da geração Eólica regional (2.138.291,98 kW) e o Paraná liderando na

Biomassa (1.265.919,60 kW). Embora a participação da fonte Fóssil (3.297.918,11 kW, ou 10,06% da matriz Sul) demonstre que a diversificação regional não é exclusivamente renovável, o forte predomínio das renováveis (hídrica, eólica e biomassa) assegura que a Região Sul mantenha um perfil energético com baixas emissões, essencial para a segurança e a sustentabilidade do Sistema Interligado Nacional.

4.1 Resultados

Os dados apresentados na Tabela 1 detalham a composição da potência elétrica outorgada por fonte nos estados analisados, resultando no total agregado para a Região Sul.

Tabela 1 – Distribuição da potência elétrica por fonte geradora da Região Sul (kW)

Origem	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Sul
Biomassa	1.265.919,60	301.643,60	396.401,40	1.963.964,60
Eólica	2.500,00	250.599,50	2.138.291,98	2.391.391,48
Fóssil	649.743,75	817.544,16	1.830.630,20	3.297.918,11
Hídrica	15.702.637,82	4.636.100,63	4.694.714,05	25.033.452,50
Solar	24.881,31	23.464,04	46.718,40	95.063,75
Total	17.645.682,48	6.029.351,93	9.106.756,03	32.781.790,44

Fonte: elaborado pelo autor com dados da ANEEL (2025).

A fonte dominante na Região Sul é a Hídrica, com um total de 25.033.452,50 kW de potência, sendo que o Paraná contribui com a maior parte, 15.702.637,82 kW. Na Região Sul, a fonte fóssil representa a segunda maior potência outorgada 3.297.918,11 kW, seguida pela Eólica 2.391.391,48 kW. A Biomassa soma 1.963.964,60 kW e a Solar é a menor fonte com 95.063,75 kW.

Analisando a contribuição de cada UF da Região, o Paraná detém a maior potência outorgada 17.645.682,48 kW, impulsionada majoritariamente pela fonte hídrica. O Rio Grande do Sul possui a segunda maior potência outorgada 9.106.756,03 kW, com destaque para as fontes hídrica, eólica e fóssil. Por fim, Santa

Catarina apresenta a menor potência total entre os estados 6.029.351,93 kW, com a hídrica também sendo sua principal fonte, seguida pela fonte fóssil 817.544,16 kW.

O Quociente Locacional (QL) apresentado na Tabela 2, indica se a participação de cada fonte de energia na matriz de um estado é superior ($QL > 1$) ou inferior ($QL < 1$) à sua participação na matriz da Região Sul. A análise detalhada deste quociente permite inferir quais fontes energéticas demonstram maior especialização.

Tabela 2 – Quociente Locacional (QL) de fontes de energia para as UFs da Região Sul

Origem	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul
Biomassa	1,197	0,835	0,727
Eólica	0,002	0,570	3,219
Fóssil	0,366	1,348	1,998
Hídrica	1,165	1,007	0,675
Solar	0,486	1,342	1,769

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na Tabela 2, observa-se que os estados da Região Sul apresentam diferenças de especialização em fontes de geração de energia elétrica. Os resultados sugerem diferenças na composição das matrizes elétricas estaduais, refletindo características próprias de cada território e a diversidade de recursos disponíveis (ou explorados) na região em análise.

Ao observar o Quociente Locacional (QL) para o Paraná é possível observar padrões de especialização. O estado demonstra forte especialização na biomassa (1,197), reflexo direto do seu robusto setor agroindustrial e florestal, e na geração hídrica (1,165), justificada pela presença de grandes empreendimentos como Itaipu e as usinas do Rio Iguaçu. Por outro lado, o Paraná apresenta sub-representação nas demais fontes, principalmente eólica (0,002) e fóssil (0,366).

A sub-representação dessas fontes renováveis emergentes indica que, embora a matriz paranaense seja predominantemente renovável, com 96,3% da potência instalada, ainda há espaço de expansão nas tecnologias eólica e solar.

Já Santa Catarina apresenta um perfil próprio de especialização, embora compartilhe algumas semelhanças com as demais UFs, conforme indicado pelo Quociente Locacional (QL), refletindo a predominância de outras fontes na matriz elétrica estadual. O estado se especializou na potência de geração de energia elétrica proveniente de fonte fóssil (1,348) e solar (1,342).

A alta especialização na fonte fóssil é um reflexo da presença de termelétricas a carvão mineral no sul catarinense, o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda com potência de 740.000 kW, que se diferencia na média regional. A especialização na energia solar, por sua vez, indica um avanço significativo na adoção dessa tecnologia, colocando Santa Catarina em destaque no que se refere a processo fotovoltaico na Região Sul. A fonte hídrica também apresentou um QL (1,007) superior a um, indicando que o estado é especializado nessa fonte em relação à média da Região Sul. Em contraste, o estado exhibe sub-representação na fonte biomassa (0,835) e eólica (0,570).

Por fim, a matriz elétrica do Rio Grande do Sul, apresenta especialização na fonte eólica (3,219), aproximadamente três vezes superior à média das UFs da região, o que o consolida como o principal polo eólico do sul do Brasil. Adicionalmente, o Rio Grande do Sul também se mostra especializado na fonte fóssil (1,998) e solar (1,769), ambas as fontes com potência acima das demais UFs analisadas.

Em contraste, as fontes tradicionalmente dominantes nos estados vizinhos estão sub-representadas no Rio Grande do Sul – biomassa (0,727) e, notavelmente, a hídrica (0,675). O QL abaixo da unidade para a fonte hídrica demonstra que o estado não possui a mesma proeminência na geração hidráulica que o Paraná e Santa Catarina.

A Tabela 3 detalha a composição da matriz elétrica da Região Sul em termos percentuais por estado.

Tabela 3 - Participação percentual das fontes na Região Sul (%)

Origem	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Sul
Biomassa	7,2%	5,0%	4,4%	6,0%
Eólica	0,0%	4,2%	23,5%	7,3%
Fóssil	3,7%	13,6%	20,1%	10,1%
Hídrica	89,0%	76,9%	51,6%	76,4%
Solar	0,1%	0,4%	0,5%	0,3%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

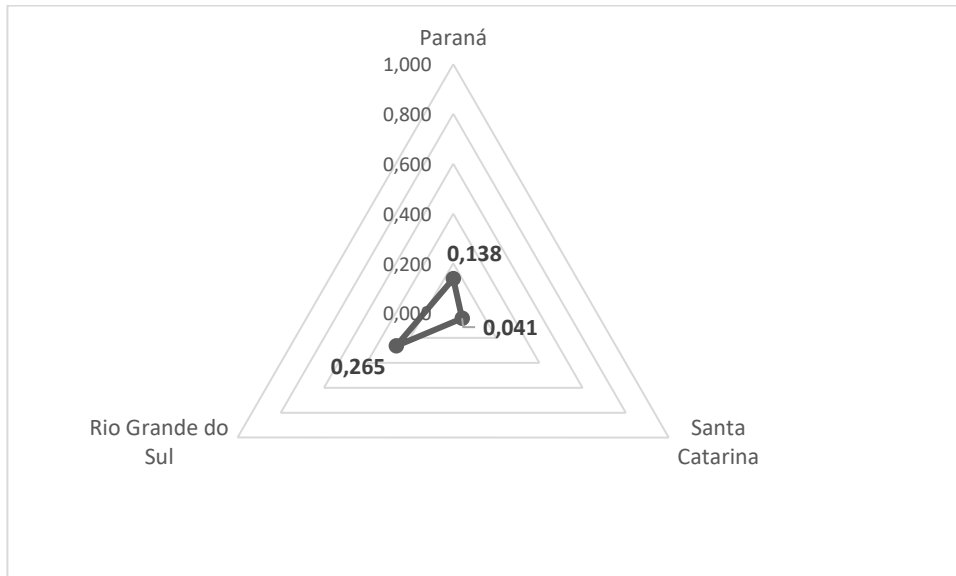
Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 3 ilustra a participação absoluta de cada fonte de energia na composição da potência total de cada estado e da Região Sul. De maneira geral, a fonte hídrica é dominante nas UFs, respondendo por 76,4% da potência total outorgada na Região Sul, com uma dependência ainda mais acentuada no Paraná, onde atinge 89,0%. Outras fontes renováveis como biomassa, eólica e a solar, embora presentes, têm uma participação percentual menor no total geral da Região Sul (6,0%, 7,3% e 0,3%, respectivamente).

Ao observar as diferenças estaduais, nota-se que o Rio Grande do Sul apresenta uma matriz mais diversificada, sendo o único estado onde a fonte fóssil 20,1% e a eólica 23,5% têm participações expressivas, enquanto a dependência hídrica é a menor entre os três estados 51,6%. Santa Catarina exhibe a maior fatia de energia fóssil 13,6% em sua matriz comparada aos seus vizinhos, embora a hídrica continue sendo a principal fonte com 76,9%.

O Coeficiente de Especialização (CE) apresentado neste gráfico permite analisar se a matriz de geração de energia dos estados constituintes reproduz o perfil da Região Sul, ou seja, se a especialização na geração de cada estado se distancia ou se assemelha à média regional.

Gráfico 2 - Coeficiente de Especialização com base nas diferentes fontes de geração de energia elétrica das UFs do Sul do Brasil



Fonte: elaborado pelo autor.

O estado de Santa Catarina apresenta o menor Coeficiente de Especialização (0,041) entre as UFs, o que demonstra que sua configuração de fontes de geração de energia elétrica mais se assemelha ao da Região Sul. Em seguida, o Paraná (CE de 0,138) e por fim, o Rio Grande do Sul, com o coeficiente mais elevado (0,265), que embora mantenha certa semelhança com o perfil regional, revela uma composição mais diferenciada, com destaque para as tecnologias eólica e solar, além da participação da fonte fóssil. De modo geral, como os coeficientes são baixos, entende-se que os três estados reproduzem o perfil da Região Sul.

4.2 Discussão dos resultados

No que tange ao potencial hidrelétrico, o estado do Paraná se destaca pela presença estratégica da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada na fronteira entre Brasil e Paraguai. O local da barragem foi determinado pelas excepcionais condições geográficas do Rio Paraná, com um cânion e topografia favorável que viabilizaram a construção de sua imensa capacidade de produção. Ao longo das décadas, desde o início de sua operação em 1984, Itaipu não apenas se consolidou como uma obra colossal de engenharia, mas também se tornou um símbolo mundial de produção de energia limpa em grande escala, estabelecendo recordes de geração acumulada

(Itaipu Binacional, 2025). Essa infraestrutura singular é o principal fator que destoa a elevada especialização hídrica do Paraná em relação ao Sul do país.

Além da Usina de Itaipu, o estado do Paraná abriga outras importantes infraestruturas de geração, como a Usina Hidrelétrica de Salto Santiago, localizada no curso principal do Rio Iguaçu, entre os municípios de Laranjeiras do Sul e Chopinzinho, em operação desde 1980. Outorgada à Engie Brasil Energia S.A., possui potência instalada de 1.420.000 kW e busca ampliação para 2.130.000 kW, com acréscimo de 710.000 kW. A proposta prevê a instalação de duas novas unidades geradoras de 355.000 kW cada, aproveitando a casa de força projetada para seis unidades, mas atualmente operando com quatro. A medida é considerada tecnicamente adequada por não alterar as estruturas civis existentes, permitindo maior aproveitamento do potencial hidráulico e aumento da vazão turbinada de 1.529 m³/s para 2.294 m³/s (ANEEL, 2025).

O Paraná, por sua destacada representatividade agrícola, possui um potencial considerável para a bioeletricidade, sendo a biomassa da cana-de-açúcar uma das mais importantes fontes renováveis para o Estado. Como o Paraná é um grande produtor de cana-de-açúcar, o aproveitamento de resíduos agrícolas como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar é estratégico e responde pela maior parte da bioeletricidade. Além de reforçar a segurança energética, o ciclo de geração por biomassa (entre abril e novembro) coincide com a safra da cana-de-açúcar, atuando em complemento aos períodos de menor capacidade hídrica do país. A influência de prováveis processos de mecanização da colheita de cana-de-açúcar também é notada, impactando positivamente os níveis de produtividade da indústria de biocombustíveis no território paranaense (IPARDES, 2022).

A exploração do potencial energético no Paraná encontra um campo fértil na utilização da biomassa residual agrícola. O poder calorífico superior desses resíduos são notavelmente alto, comparável ao de espécies florestais convencionalmente utilizadas para energia, o que confere à palha e aos colmos um papel estratégico como fonte de bioenergia na matriz estadual. No entanto, a viabilidade logística do uso dessa fonte é desafiada pela forte sazonalidade da oferta, com a maior parte da biomassa concentrada nos meses de colheita da safra de verão, e períodos de escassez no inverno. Superar essa intermitência requer o desenvolvimento de soluções logísticas, como a estocagem em formas densificadas (briquetes ou *pellets*)

ou a adoção da co-combustão com outras fontes (como cascas de pinus ou carvão mineral) para garantir o suprimento contínuo das termelétricas (Pierri *et al.*, 2016).

Em Santa Catarina a sub-representação das fontes renováveis não-hídricas é marcada pela predominância de fontes convencionais, exemplificada pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Capivari de Baixo), o maior complexo termelétrico a carvão da América Latina com potência de 740.000 kW. As condições meteorológicas locais (vento médio e alta frequência de estabilidade atmosférica) favorecem a poluição do ar. Para mitigação, todas as unidades utilizam precipitadores eletrostáticos (aprox. 98% de eficiência na remoção de partículas) e chaminés de alturas variadas para dispersão dos poluentes (Godoy; Godoy; Artaxo, 2005).

Santa Catarina tem a energia solar como alternativa estratégica, com índices anuais de irradiação favoráveis entre 1.200 e 2.400 kWh/m². O avanço da fotovoltaica foi marcado pela inauguração, em 2014, da Usina Solar Cidade Azul (Tubarão). Desenvolvida pela Tractebel Energia e UFSC, a usina era a maior do Brasil na época, com potência de 3 MW. Essa iniciativa simboliza o potencial do estado na transição energética e no desenvolvimento sustentável (Machado; Miranda, 2015).

No contexto das grandes instalações energéticas do estado, a Usina Hidrelétrica de Itá, no rio Uruguai, em Santa Catarina, exemplifica as transformações territoriais de grandes empreendimentos. Após a realocação de seu núcleo urbano devido ao reservatório, a cidade de Itá observou mudanças significativas. Houve o fortalecimento do turismo, a instalação de hotéis e gastronomia, e a promoção de atividades culturais e esportes náuticos. Tais mudanças refletem um processo de reorganização social e reestruturação econômica regional resultante da presença da usina (Vignatti; Scheibe; Busato, 2016).

E por fim no Rio Grande do Sul a energia eólica é um fenômeno pós-2000, ligado à diversificação da matriz elétrica nacional após crises de "apagão". O estado se destacou com o pioneirismo do Complexo Eólico de Osório (2006), primeiro parque de grande escala do país, que hoje projeta um aumento considerável de aerogeradores. As turbinas do complexo contribuem significativamente para a matriz, com uma potência de geração calculada de 50 kW. Embora a fonte eólica seja de baixo impacto, em Osório a imagem do aerogerador ("cata-vento") foi positivamente apropriada pelo município e mídia como atrativo turístico (Bier, 2016).

Complementando o panorama energético do estado, a Usina Termelétrica de Uruguaiana (AES Uruguaiana), no Sudoeste do Rio Grande do Sul, iniciou suas

operações em 2000, movida a gás natural com potência instalada de 639,9 MW e desenvolvida pela AES Brasil em parceria com a Sulgás. No entanto, a usina está paralisada desde 2009 devido à interrupção no fornecimento de gás pela Argentina, operando apenas por sete meses desde 2008. Suas operações foram retomadas apenas em caráter emergencial e temporário em 2013, 2014 e 2015, utilizando gás natural liquefeito importado (Rocha, 2016).

A experiência de Uruguaiana evidenciou que a dependência de uma única fonte não assegura a estabilidade do fornecimento, uma vez que limita a flexibilidade do sistema e mantém a vulnerabilidade associada às fontes fósseis. A verdadeira solução está na transição estratégica, que priorize as fontes renováveis. Nesse contexto, a expansão das energias eólica e solar no Rio Grande do Sul constitui um avanço essencial, pois contribui para mitigar riscos de desabastecimento, reduzir custos no longo prazo e alinhar o estado às demandas por uma geração centralizada mais robusta e eficiente.

Embora apresente um crescimento notável em fontes renováveis como eólica e solar, na produção de eletricidade, mantém significativa dependência de derivados de petróleo em sua matriz. O óleo diesel emerge como um dos combustíveis fósseis de maior relevância para o consumo energético do estado, é um produto chave para a economia gaúcha, sendo o principal item de exportação energética do estado (RIO GRANDE DO SUL, 2024).

No Rio Grande do Sul, a participação na geração centralizada de energia solar fotovoltaica, embora seja modesta em termos absolutos, demonstra uma presença estratégica no cenário nacional. O estado está entre os dez com maior potência solar centralizada do país, totalizando 46 empreendimentos e aproximadamente 23,5 MW (23.521,80 kW) de capacidade instalada no nicho centralizado de geração solar. Essa capacidade de usinas de médio e grande porte reflete o avanço da fonte fotovoltaica no estado e indica que, o RS está inserindo projetos centrais que são cruciais para a estabilidade do suprimento energético e para que a matriz gaúcha fortaleça o seu perfil de diversificação (ANEEL, 2023).

Essas diferenças apontam para a relevância de estratégias regionais de planejamento energético, que consideram os recursos disponíveis, a complementaridade entre fontes e os impactos ambientais associados. A diversificação das fontes renováveis, aliada à integração eficiente das tecnologias convencionais e emergentes, é essencial para garantir a segurança energética,

mitigar vulnerabilidades e promover o desenvolvimento sustentável, consolidando a Região Sul como um polo estratégico da matriz elétrica brasileira.

Apesar da expressiva participação das fontes renováveis, a geração regional ainda depende majoritariamente da energia hidráulica, que domina o perfil de produção local. Em períodos de estiagem, a redução dos níveis dos reservatórios compromete a oferta de energia e torna necessária a complementação por usinas termelétricas, abastecidas principalmente por combustíveis fósseis. Essa alternativa eleva os custos de geração e aumenta as emissões de gases de efeito estufa, reforçando a necessidade de diversificação da matriz elétrica regional (ANEEL, 2025).

Por fim, a análise da matriz elétrica da Região Sul evidencia um panorama diversificado e desigual entre os estados, refletindo potencialidades naturais e escolhas históricas. O Paraná apresenta forte especialização em geração hídrica e biomassa, sustentada por grandes empreendimentos como Itaipu e Salto Santiago, enquanto Santa Catarina se destaca pelo uso fóssil histórico e pelo crescimento da energia solar. Já o Rio Grande do Sul lidera na geração eólica e no aumento da capacidade instalada solar fotovoltaica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo contribui para a análise da matriz de geração de energia elétrica com o intuito de desvendar os padrões de especialização específicos de cada uma de suas unidades federativas. Neste contexto, o objetivo geral da pesquisa foi identificar a especialização na fonte de geração de energia elétrica na Região Sul do Brasil, sob a ótica da potência outorgada. A pesquisa buscou compreender se a Região Sul apresenta um padrão de especialização predominantemente renovável, à semelhança da matriz elétrica nacional, e de que forma as características territoriais e produtivas influenciam essa composição.

Para tal, a pesquisa empregou as métricas do Quociente Locacional (QL) e do Coeficiente de Especialização (CE) para avaliar a especialização de cada estado na geração de energia elétrica.

Os resultados demonstraram que a Região Sul é um pilar estratégico para a matriz energética nacional, contribuindo com aproximadamente 8,97% da geração total do Brasil e mantendo uma composição predominantemente renovável, com cerca de 90%. No entanto, a aplicação dos indicadores revelou peculiaridades na fonte de geração entre os estados com especializações marcantes que refletem as particularidades produtivas de cada um.

O Paraná demonstrou forte especialização nas fontes hidrelétrica e biomassa, sustentada por sua base agroindustrial e grandes empreendimentos como Itaipu e as usinas do Rio Iguaçu. O CE indica que a estrutura elétrica do estado mantém certa semelhança com o padrão observado na Região Sul.

Santa Catarina apresentou um perfil misto, com destaque para a forte especialização na fonte fóssil, reflexo da termelétrica a carvão mineral (Complexo de Jorge Lacerda) o maior complexo a carvão da América Latina, além da presença das fontes solar e hidráulica em sua matriz elétrica.

O Rio Grande do Sul consolidou-se como polo de diversificação tecnológica, com QL maior nas fontes eólica e solar. O CE indica que, embora o estado mantenha certa semelhança com a estrutura elétrica da Região Sul, sua matriz apresenta particularidades que evidenciam maior diversificação.

Diante dos resultados obtidos, que revelam elevada especialização de algumas UFs em fontes renováveis (QL) e evidenciam padrões regionais de similaridade e diferenciação (CE), confirma-se a hipótese desta pesquisa: embora existam distinções

no grau de especialização entre os entes federativos, prevalece na matriz regional a predominância das fontes renováveis.

Em suma, a análise evidencia que a especialização na geração de energia elétrica do Sul se manifesta de forma heterogênea, com cada estado explorando suas vantagens comparativas. A pesquisa reforça que a elevada participação de fontes renováveis confere à região um papel estratégico na sustentabilidade da matriz nacional, ao mesmo tempo em que evidencia a importância de direcionar políticas públicas regionais que promovam a diversificação e o equilíbrio entre as diferentes fontes renováveis de energia.

Do ponto de vista econômico e ambiental, o fortalecimento das fontes renováveis representa não apenas uma estratégia de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, mas também uma oportunidade de desenvolvimento regional, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7 – Energia Acessível e Limpa.

Como limitação, destaca-se que o estudo se concentrou na análise quantitativa dos indicadores QL e CE, não abordando fatores qualitativos como eficiência tecnológica, disponibilidade de infraestrutura e políticas regionais de apoio à geração renovável das fontes analisadas. Para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar a investigação sobre o papel das políticas regionais de incentivo às fontes renováveis, a integração da geração distribuída e os efeitos socioeconômicos da especialização energética no desenvolvimento local.

Em síntese, conclui-se que a Região Sul do Brasil possui uma matriz elétrica renovável, mas com especializações próprias em cada estado, influenciadas pelas suas particularidades econômicas e territoriais. O fortalecimento das fontes renováveis e a valorização da diversidade energética representam caminhos promissores para consolidar um modelo sustentável de geração, capaz de proporcionar segurança, desenvolvimento e a minimização dos impactos ambientais às próximas gerações.

REFERÊNCIAS

- ATALANIO, M.; IBIAPINA, H.; MACHADO, T. A economia circular como modelo de desenvolvimento sustentável. **Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável**, Encontro Virtual, v. 8, n. 1, p. 147-167, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26668/IndexLawJournals/2526-0057/2022.v8i1.8963>. Disponível em: <https://indexlaw.org/index.php/revistaddsus/article/view/8963/pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- AZEVEDO, J. C.; BORGES, M. C. Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, RS: Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, v. 17, n. 28, p. 169-177, 2016. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, DF: ANEEL, 2005. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica\(2\).pdf](https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf). Acesso em: 14 jun. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, DF: ANEEL, 2008. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Biomassa (2)**. [S. l.]: ANEEL, 2002. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf). Acesso em: 14 jun. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bibliografia temática: história do setor elétrico brasileiro**. Brasília: ANEEL: CEDOC, ed. especial, nov. 2022. 14 p. (Bibliografia temática, v. 4, n. 11).
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia solar: usinas centralizadas ultrapassam os 5 % na matriz elétrica brasileira, com 10,4 GW instalados**. Brasília, DF: ANEEL, 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/energia-solar-usinas-centralizadas-ultrapassam-os-5-na-matriz-eletrica-brasileira-com-10-4-gw-instalados>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração (SIGA)**. Brasília: ANEEL, 2025. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/dados>. Acesso em: 25 set. 2025.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 115/2025-SCE/ANEEL: ampliação da Usina Hidrelétrica (UHE) Salto Santiago, outorgada à Engie Brasil Energia**. Brasília, DF: ANEEL, 2025. 11 p. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ndsp2025304.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.
- ARBOIT, N. K. S. *et al.* Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil – uma revisão de literatura. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São

Paulo, SP: Universidade de São Paulo, v. 26, p. 155-168, 2013. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2013.0026.0008>.

ALVES, L. R. Indicadores de localização, especialização e estruturação regional. *In*: PIACENTI, C. A.; LIMA, J. F. (Org.). **Análise regional: metodologias e indicadores**. Curitiba: Camões, 2012. p. 25-44. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/343858433>. Acesso em: 18 ago. 2025.

BRAND, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 117-127, jan./mar. 2017.

BOFF, L. **Sustentabilidade: o que é – o que não é**. 4. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2015.

BOZIO, D. M. **Perspectivas das energias renováveis e não renováveis nas matrizes energéticas e elétricas**. 2018. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira, Medianeira, 2018.

BIER, L. L. **Estudo da Paisagem: Percepções sobre o Complexo Eólico de Osório/RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BORBA, R. F. Carvão mineral. *In*: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro de 2001**. Brasília: DNPM, 2001. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 3 ago. 2025.

CAMPELLO, M. Se a terra é redonda, a economia só pode ser circular. **South American Development Society Journal**, São Paulo, SP: South American Development Society Journal, v. 7, n. 20, p. 353-369, 2021. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v7i20p353-379. Disponível em: <https://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/443/389>. Acesso em: 3 jun. 2025.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética: projeto de graduação (Engenharia Elétrica)** — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, fev. 2012. 112 p. Disponível em: <https://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005044.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

CARDOSO, E. M. **Energia nuclear**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br>. Acesso em: 3 ago. 2025.

CARVALHO, J. F. Combustíveis fósseis e insustentabilidade. **Ciência e Cultura**. São Paulo, SP, Brasil, v. 60, n. 4, p. 31-33, 2008. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br>. Acesso em: 3 ago. 2025.

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 28, n. 82, p. 125-144, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142014000300003>. Acesso em: 30 jul. 2025.

CAMPOS, *et al.* Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, SC, Brasil, v. 9, n. 2, p. 198-205, 2010. Disponível em: <https://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/3316>. Acesso em: 4 ago. 2025.

CORRÊA, M. L. Contribuição para uma história de regulamentação do setor de energia elétrica no Brasil: o Código de Águas de 1934 e o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Revista de Sociologia Política**, Curitiba, v. 4, n. 6, p. 255-291, abr. 2005.

COLATTO, L.; LANGER, M. Biodigestor: resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, jul./dez. 2011.

CEPA - CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA. **Xisto betuminoso - petróleo**: história, gás natural, xisto betuminoso e carvão mineral, 1999. Disponível em: <http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/xisto.html>. Acesso em: 04 ago. 2025.

CRUZ, B. O.; FURTADO, B. A.; MONASTERIO, L.; RODRIGUES JÚNIOR, W. (Orgs.). **Economia Regional e Urbana: teorias e métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011.

DATHEIN, R. **Inovação e revoluções industriais**: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. Porto Alegre: DECON/UFRGS, 2003. (Publicações DECON, Textos Didáticos, n. 2). Disponível em: <http://www.ufrgs.br/decon/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

DUTRA, R. **Energia eólica**: princípios e tecnologias. Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB, 2008. Disponível em: ://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/ththttputorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 2 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de energia**: energias não renováveis. ABCD Energia, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#ENERGIA-NAO-RENOV>. Acesso em: 09 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. ABCD Energia, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>. Acesso em: 09 jun. 2025.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy 1**: economic and business rationale for an accelerated transition. Cowes, Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation, 2012.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **O diagrama de borboleta:** visualizando a economia circular. 2021. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-diagrama-de-borboleta>

FARIA, A. M. **Economia circular:** reinvenção das formas de negócio. 2018. Monografia – Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Economia e Relações Internacionais, Uberlândia, 2018.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 19, p. 63-72, 2011. Disponível em: <http://pce.liberato.com.br>. Acesso em: 30 jul. 2025.

FIOREZE, *et al.* Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2251–2265, jan./abr. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/223611707896>. Acesso em: 4 ago. 2025.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, mai./jul. 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.62.10.

FLEURY, M. T. L.; WERLANG, S. R. C. **Pesquisa aplicada:** conceitos e abordagens. Anuário de Pesquisa, 2016. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GÜNTHER, H. Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão? **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 201-210, maio/ago. 2006.

GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 2, p. 295-321, mar./abr. 2009.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i72p6-15. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revusp/article/view/13564>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 jun. 2025.

GONÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S. Aplicações da energia nuclear. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 220, p. 36-41, out. 2005. Disponível em:

<https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35605713/aenergianucleareseusosnasociedade-libre.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

GODOY, M. L. D.P.; GODOY, J. M.; ARTAXO, P. Distribuição da fonte de aerossóis em torno de uma grande usina termelétrica – Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Santa Catarina, Brasil. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 29, p. 5307-5324, set. 2005. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.05.033. Acesso em: 17 out. 2025.

HADDAD, P. R. Medidas de localização e de especialização. *In*: HADDAD, P. R. (Org.). **Economia regional: teorias e métodos de análise**. Fortaleza: BNB-ETENE, 1989.

HERSEN, A. **Viabilidade econômica da geração distribuída e compartilhada de energia elétrica proveniente da biomassa florestal no município de Guarapuava, PR**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, Paraná, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 jul. 2025.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa político da Região Sul: mapas do Brasil / mapas regionais / político. Região Sul**. IBGE, 2017. Disponível em: https://geofp.ibge.gov.br/produtos_educacionais/mapas_tematicos/mapas_do_brasil/mapas_regionais/politico/regiao_sul.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

ITAIPU BINACIONAL. **Nossa história**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2025. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/institucional/sobre-itaipu/nossa-historia>. Acesso em: 15 out. 2025.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Desenvolvimento Paranaense**. Curitiba: IPARDES, 2022. Disponível em: https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2022-09/desenvolvimento_paranaense.pdf. Acesso em: 26 out. 2025.

LAVEZZO, C. A. L. **Fontes de Energia**. Revista Eletrônica Gestão em Foco, UNIFIA, Amparo, 2016. Disponível em: https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2018/06/012_fontes_energia.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

LARA, F. M.; FIORI, T. P.; ZANIN, V. Notas sobre medidas de concentração e especialização: um exercício preliminar para o emprego no Rio Grande do Sul. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 4., 2011, Santa Cruz do Sul. **Anais [...]**. Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul, 2011.

LEITÃO, F. O.; FERREIRA, G. M. F. Relação entre produção orgânica e a economia circular: um estudo de caso dos tomates orgânicos. **Informe GEPEC**. Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, v. 26, n. 2, p. 108-126, 2022. DOI:

10.48075/igepec.v26i2.28801. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/28801/20576>. Acesso em: 14 jul. 2025.

LIMA, G. W. B.; LEITÃO, F. O.; SILVA, W. H. D. Práticas adotadas na suinocultura alinhadas com a economia circular: uma revisão integrativa da literatura.

Desenvolvimento em Questão. Ijuí, RS: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, v. 19, n. 57, p. 5-21, 2021. DOI: 10.21527/2237-6453.2021.57.11906. Disponível em:

<https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/11906>. Acesso em: 13 ago. 2025.

LIMA, J. A. M. A energia que vem do mar: a herança energética do mar brasileiro.

Ciência e Cultura, São Paulo, v. 62, n. 3, p. 35-37, 2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cc/a/nR5BYbYzwXDdncbKvVdMLzF>. Acesso em: 5 ago. 2025.

LIMA, J. F.; ALVES, L. R.; PIFFER, M.; PIACENTI, C. A. análise regional das mesorregiões do estado do paraná no final do século XX. **Análise**

Econômica, Porto Alegre, v. 24, n. 46, 2009. DOI: 10.22456/2176-5456.10845.

Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/AnaliseEconomica/article/view/10845>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MATTEI, T. F.; MATTEI, T. S. Análise regional: um estudo de localização e

especialização para a Região Sul do Brasil. **Revista Paranaense de**

Desenvolvimento, Curitiba, v. 38, n. 133, p. 227-243, jul./dez. 2017.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão.

Revista Virtual de Química, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>. Disponível em: <http://www.uff.br/rvq>. Acesso em: 17 out. 2025.

MARIANO, J. B. **Impactos ambientais do refino de petróleo**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MONASTERIO, L. Indicadores de análise regional e espacial. *In*: CRUZ, B. O.;

FURTADO, B. A.; MONASTERIO, L.; RODRIGUES JÚNIOR, W. (Orgs.). **Economia regional e urbana: teorias e métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: Ipea, 2011.

MESQUITA, H. C. Xisto betuminoso. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p. 97-119, out./dez. 1978. Disponível em:

<https://periodicos.fgv.br/rap/article/view/50366>. Acesso em: 04 ago. 2025.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília: Nações Unidas Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 abr.2025.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais. *In*: ENCONTRO DE INICIAÇÃO

CIENTÍFICA, 20.; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 16., 2016, São José dos Campos. Revista Univap – Edição Especial, v. 22, n. 40, 2016. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/0859_1146_01.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

NASCIMENTO *et al.* Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 143-155, jan./fev, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019171794>

NOVAES, M. A. B.; PAIVA, M. R. F. P.; GONÇALVES, R. M. P. O (Des)Uso da Pesquisa Quantitativa em Educação: uma revisão de teses ProPEd (UERJ) 2017-2020. **Revista Communitas**, Rio Branco, AC, v. 6, n. 13, p. 232–249, 2022. DOI: 10.29327/268346.6.13-18. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/COMMUNITAS/article/view/5920/3724>. Acesso em: 22 jun. 2024.

OMIDO, A. R.; BARBOZA, C. S.; MOREIRA JÚNIOR, O. Energia geotérmica: uma aliada na busca da eficiência energética. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 8., 2017, Campo Grande, MS. **Anais [...]**. Campo Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais – IBEAS, 2017. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso>. Acesso em: 4 ago. 2025.

PIACENTI, C. A.; LIMA, J. F. **Análise regional**: metodologias e indicadores. Curitiba: Camões, 2012.

PIERRI, L.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A.; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M.; MUNARO, F. C. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 2, p. 129-137, mar./abr. 2016. DOI: 10.1590/0034-737X201663020003. Acesso em: 16 out.2025.

RABELO, J. L.; OLIVEIRA, J. N.; REZENDE, R. J.; WENDLAND, E. Aproveitamento da energia geotérmica do Sistema Aquífero Guarani – estudo de caso. **Águas Subterrâneas**, v. 16, n. 1, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23459>. Acesso em: 04 ago. 2025.

REIS, H. L. S. Gás natural. *In*: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (CODEMGE). **Recursos minerais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Codemge, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328805708_Gas_natural. Acesso em: 3 ago. 2025.

REIS, G. S.; LOBO, R. V.; BATISTA, S. V.; GUIMARÃES, T. F. Energia oceânica das ondas: uma alternativa de energia renovável. **Revista Paramétrica**, Belo horizonte, MG, v. 13, n. 15, p. 1-17, 2021. Disponível em: <https://periodicos.famig.edu.br/parametrica/article/view/89>. Acesso em: 5 ago. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Relatório Síntese – Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2015-2022**. Porto Alegre: SEMA, 2024. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202412/12184322-relatoriosintese-bergs-2015-2022.pdf>.

ROCHA, H. V. **Estudo geológico do potencial de exploração e produção de gás natural não convencional na Bacia do Paraná: avaliação da viabilidade no abastecimento da Usina Termoelétrica de Uruguaiana (RS)**. Versão Corrigida. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista Uningá Review**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 6-13, jan./mar. 2017. Disponível em: <https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966/1562>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SANTOS, E. M.; FAGÁ, M. T. W.; BARUFI, C. B.; POULALLION, P. L. Gás natural: a construção de uma nova civilização. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 67-90, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/gRVsz4sLDyyMTFLw7hgCRWQ/?lang=pt>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SANTOS, C. M.; BRAGA, A. L. C.; SANTOS, J. M.; OLIBEIRA, M. B. A indústria do petróleo e energia frente aos novos desafios de se inserir nos modelos da transição energética. **Research, Society and Development**, Itabira, MG, v. 11, n. 9, e32000, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i9.32000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32000>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SANTOS, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v. 22, n. 2, p. 309-321, mar./abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000010>.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. e atual. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, E. P.; CAMARGO, J. C.; SORDI, A.; SANTOS, A. M. R. **Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento**. O futuro dos recursos, n. 1, nov. 2003. Disponível em: <https://www.academia.edu>. Acesso em: 4 ago. 2025.

TAVARES, L. A. Matriz elétrica brasileira e as tendências futuras. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, São Paulo, v. 4, n. 5, e3135, 2023. DOI: 10.47820/recima21.v4i5.3135. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i5.3135>. Acesso em: 30 jul. 2025.

VIGNATTI, M. A. P.; SCHEIBE, L. F.; BUSATO, M. A. Projetos hidrelétricos em Santa Catarina. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 30, n. 87, p. 165-176, 2016.

DOI: 10.1590/S0103-40142016.30870010. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/S0103-40142016.30870010>. Acesso em: 17 out. 2025