

Modelagem para expansão de redes de distribuição de gás natural e biometano: Estudo prospectivo para a região Sul do Brasil

COSME POLESE BORGES

Palavras Chave

Biometano, Gás Natural Líquificado, Simulação computacional

Agradecimento a órgão de fomento

Agradecemos ao CNPq pelo fomento a esta pesquisa.

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

Modelagem para expansão de redes de distribuição de gás natural e biometano: Estudo prospectivo para a região Sul do Brasil

Cosme Polese Borges

E-mail: Cosme.polese@hotmail.com

Número de telefone: (49) 9 9992 4991

Orientador: Mauricio Uriona-Maldonado

1. INTRODUÇÃO

A dependência da economia mundial em relação ao petróleo suscitou, historicamente, uma grande preocupação com a disponibilidade destes recursos. Por várias ocasiões preços elevados do petróleo provocaram análises que apontam para um cenário de rápido esgotamento dos recursos petrolíferos (PINTO JUNIOR, 2007). Esta preocupação cria uma necessidade de desenvolver cadeias de combustíveis renováveis. A cadeia do gás natural possui diversas características de uma indústria não renovável, mas se manejada corretamente ela pode acelerar o desenvolvimento das fontes renováveis (KINNON; BROUWER; SAMUELSEN, 2018). A necessidade de diversificar as fontes de combustíveis para fontes renováveis constitui assim um grande desafio, principalmente para as economias em desenvolvimento, as quais possuem menos recursos para financiar esta transição e as inovações sistêmicas necessárias para isso (ZOLFAGHARIAN et al., 2019; EDSAND, 2019; MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012).

Considera-se então que o Brasil pode acelerar sua transição energética aumentando o uso do gás natural em função do seu grande potencial de produzir biometano (BORGES et al., 2021). A literatura sobre a matriz energética do Brasil destaca que ao lado do bioetanol e do biodiesel, tanto os gases de origem fóssil quanto os renováveis, como o biometano e o bio-hidrogênio são soluções para um futuro de baixo carbono, principalmente para o setor de transportes substituindo o uso de óleo diesel (SINIGAGLIA et al., 2022). O biometano é um tipo de gás natural renovável produzido ao remover impurezas do biogás, o biogás por sua vez é gerado durante o processamento anaeróbico de materiais orgânicos (ANGELIDAKI et al., 2018).

Antes de iniciar a problemática, destaca-se que esta tese busca realizar uma análise multidimensional e quantitativa a partir de métodos de simulação computacional, focada na dimensão microeconômica do mercado de gás natural e macroeconômica do potencial de biometano da região Sul do Brasil. Neste aspecto, este estudo remete as funções de custos e preços dos energéticos, que em grande parte são desenvolvidos por modelos de simulação de dimensões distintas, mas em geral se originam da teoria do desenvolvimento econômico e da teoria geral dos sistemas, que muitas vezes recorrem da disciplina de pesquisa operacional. Tais teorias e disciplinas são características da Engenharia de Produção e são recomendadas para o tipo de problema desta tese (LAW; KELTON, 2010; MIGUEL, 2012).

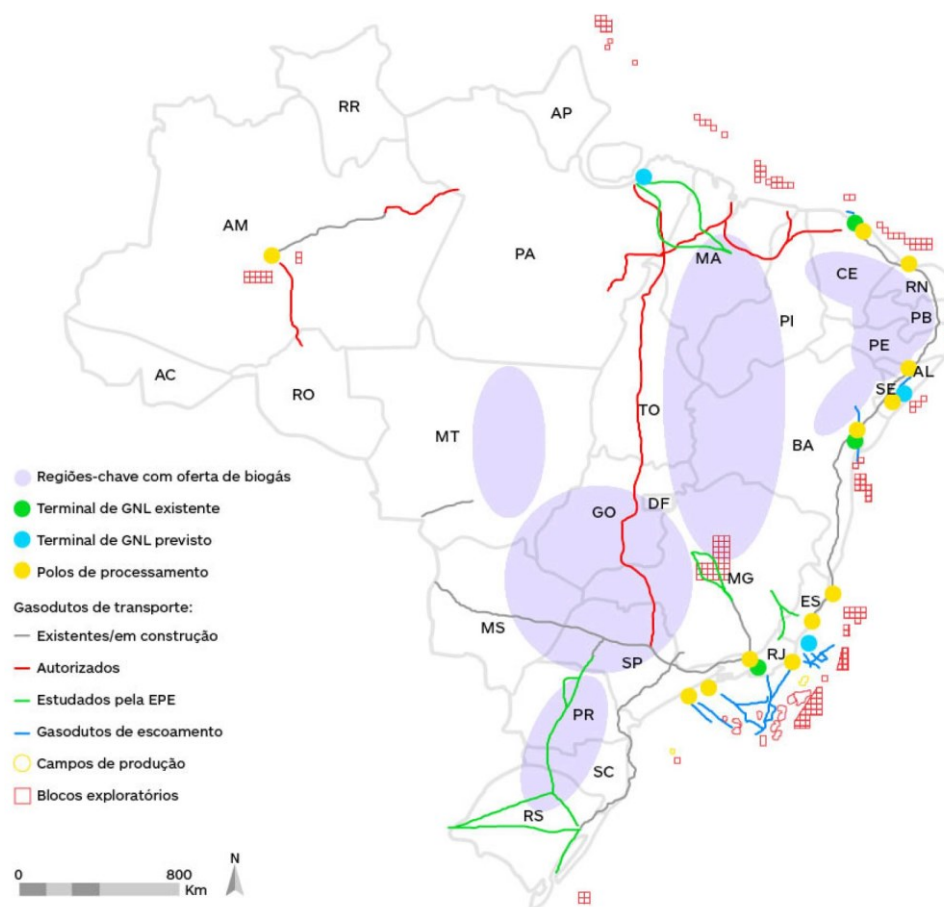
1.1. PROBLEMÁTICA

A problemática está segmentada em três vertentes. Sobre a primeira, observa-se que a cadeia do GN cresceu de forma localizada, partindo de grandes reservas de gás (e.g., Bolívia e do Pré-sal) para grandes mercados consumidores regionais. A forma localizada é ilustrada na Figura 1. Deve-se explicar neste ponto que infraestrutura de gasodutos de transporte do Brasil ainda é modesta quando comparada a de outros países, a extensão total de gasodutos de transporte em 2020 Brasil era de 9.244 km, um valor próximo ao observado em um país como a Espanha (EPE, 2020).

A expansão das cadeias de gás natural segue um padrão de buscar grandes consumidores e demanda firme para viabilizar economicamente os projetos de oferta e consumo. Este crescimento foi condicionado a modelos institucionais de monopólio e tarifas, que são comuns no desenvolvimento de indústrias de rede (JUNIOR, 2007). Estes modelos causaram rápido desenvolvimento das regiões supridas por gás (em cinza) e o oposto, ou seja, redução da atividade industrial e econômica das regiões não atendidas pelo insumo, as regiões isoladas. Argumenta-se que esta lógica criou disparidades sociais e econômicas evidenciadas pelos índices de desenvolvimento das diferentes regiões do Brasil (IBGE, 2020). Percebe-se que

onde existem regiões mais desenvolvidas, há oferta significativa de gás natural e consequentemente de gases renováveis, como é o caso de São Paulo, Rio de Janeiro e Ceará. Enquanto isso as outras regiões possuem ofertas menos significativas (CIBIOGAS, 2021). A expansão da cadeia do gás em outras regiões, como a região Sul do país, composta pelos estados do Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) ocorreu também de forma centralizada. Neste contexto em que o gás natural canalizado impõe desenvolvimento econômico e fomenta a cadeia de outros biocombustíveis, as regiões não atendidas por gás encanado, ou seja, sem gasodutos, podem ser chamadas de regiões Isoladas. As regiões isoladas destes estados passam a ter um papel central para esta temática ao passo que são regiões que concentram grandes potenciais para produção de biometano.

Figura 1 – Mapa de gasodutos de transporte e do potencial de biogás do Brasil.



Fonte: Apresentação da Abiogás para Federação das Indústrias do Rio de Janeiro, 2020.

A centralização da cadeia do gás da região Sul ocorreu exatamente pelo trecho sul do gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) (ver Figura 1, em cinza). A expansão do suprimento permitiu o desenvolvimento esperado, mas atualmente a demanda supera a oferta, e este gasoduto já opera muito próximo de sua capacidade máxima (GARCÍA KERDAN et al., 2019). Segundo o Boletim de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural, em 2021, o estado do Paraná distribuiu em média 2,1MMm³/d, Santa Catarina 2,2MMm³/d e o Rio Grande do Sul 1,69MMm³/d. Destaca-se ainda para os gasodutos de transporte um gasoduto em fase de estudo o "Gasoduto do Chimarrão" (ver Figura 1, em verde). Este gasoduto possui uma extensão aproximada de 1.200 km e possui estimativas de investimento próximo a 12 bilhões de reais para sua implantação (EPE, 2020). O estudo deste gasoduto ainda traz um dado importante sobre a demanda de gás destas regiões isoladas, indicando um volume demandado de 8 milhões

de m³/dia (MMm³/d) ao longo do seu traçado. Estes dados de demanda tornam o biometano uma alternativa plausível e possivelmente necessária para futuramente injetar gás renovável neste gasoduto e atender toda esta demanda.

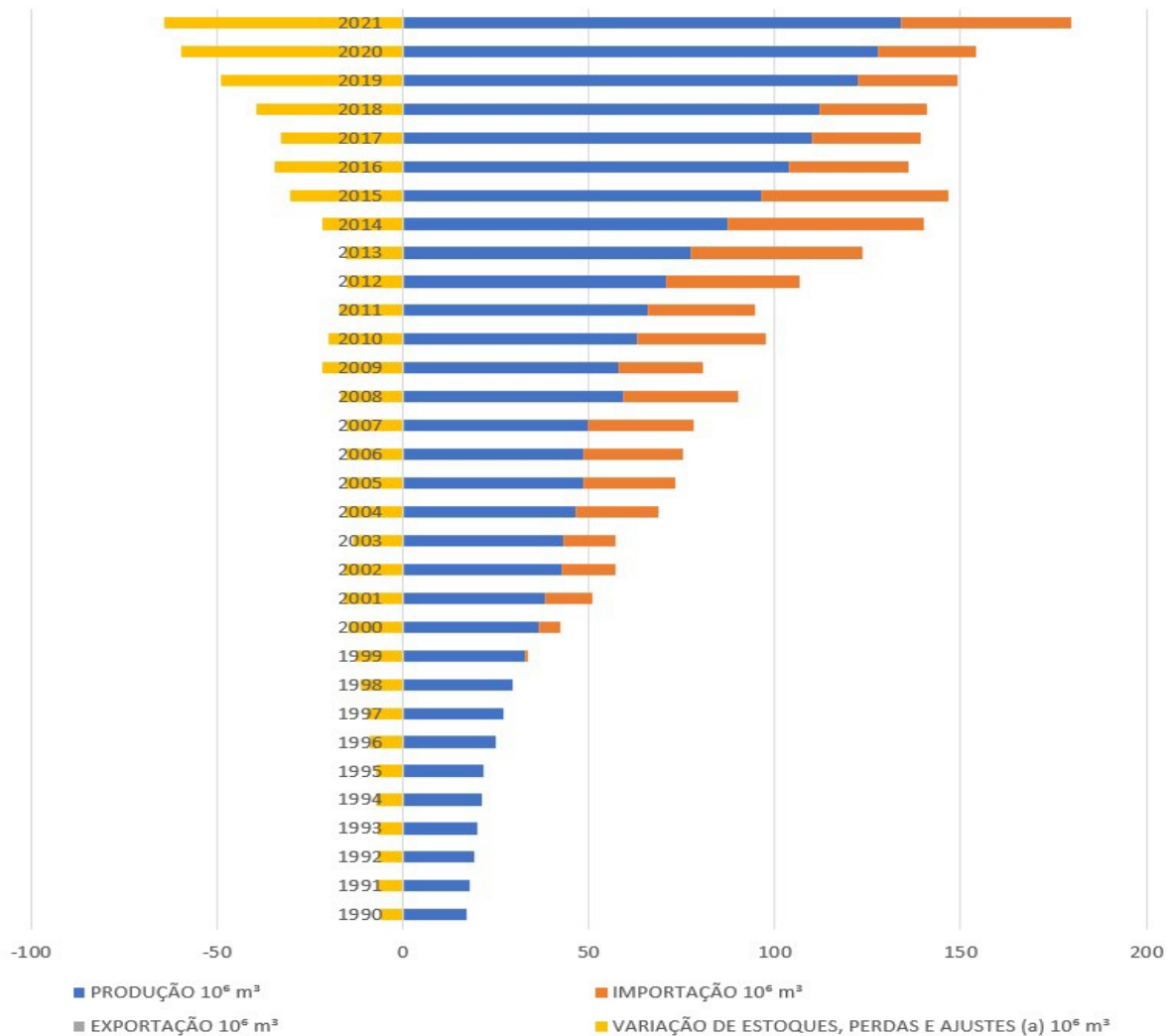
O maior potencial de biogás dos estados do Sul é exatamente na parte oeste desta região e junto com o gasoduto do Chimarrão (ver Figura 1, em forma oval). Estes potenciais, incluem em específico: (i) o agronegócio com a produção de animais, de resíduos urbanos, de etanol, de bebidas e (ii) o setor de gerenciamento de resíduos urbanos, como resíduos sólidos e tratamento de efluentes. Vale ressaltar que no Brasil como um todo, o agronegócio é responsável por aproximadamente um quarto do PIB do país. Em não havendo expansão das redes de gás nestas regiões, fica evidente que a disponibilidade de biogás e biometano seja limitada a modelos de negócio mais simples, comprometendo uma parte significativa da receita do país.

Uma parte final desta primeira vertente da justificativa é um pouco menos relacionada a transição energética, mas de igual importância, advém da crescente necessidade de importação de fertilizantes para manter o agronegócio brasileiro. Em 2020, o volume total de fertilizantes entregue ao mercado chegou a 40 milhões de toneladas (ANDA, 2019). A importação representa 33 milhões de toneladas, cerca de 82% do volume total. Este valor de importação cresceu 11% superior em relação a 2019. No mesmo período, a produção nacional teve queda de 13,5%, alcançando 6,4 milhões de toneladas. A dependência se agrava quando se verifica que 25% do volume importado costumava vir da Rússia. Como o Brasil possui pouco gás quando comparado aos países grandes produtores, também possui pouquíssimas plantas de produção de fertilizantes. Neste contexto, a produção de biogás a partir de reatores anaeróbios produz biofertilizantes, que podem reduzir a dependência externa deste insumo.

Na segunda vertente desta problemática destaca-se a dificuldade em garantir o suprimento atual de gás natural para o mercado nacional em preços competitivos. O problema da escassez de gás é um fator entendido como de curto e médio prazo, pois as projeções de longo prazo são de maior oferta. A oferta de gás nacional na malha integrada nacional deve passar de cerca de 45 milhões de m³/dia (MMm³/d) em 2021 para aproximadamente 91 MMm³/d em 2031, com crescimento iniciado apenas após 2026 (EPE, 2021) [p.208]. Observa-se pelas principais movimentações de gás natural do Brasil, como mostra a Figura 2, que a produção nacional vem crescendo rapidamente. Mas, para compreender o volume destinado ao mercado, precisa-se descontar todo gás que é contabilizado em forma de perdas, como o gás que é reinserido nos poços de exploração para maximizar a produção de petróleo (em amarelo). Como resultado o volume de gás disponibilizado para o mercado quase não se alterou desde 2013.

A disponibilidade de gás para o mercado nacional se manteve inalterada pois muito gás está sendo reinserido. O gás reinserido ocorre devido a falta de infraestrutura para trazer o gás das plataformas do pré-sal até as unidades de processamento de gás em terra. O projeto do gasoduto Rota 3, com 355 km de extensão e capacidade de transporte de 18 MMm³/dia, tem como objetivo reduzir a reinserção de gás nas plataformas do pré-sal e trazer mais gás para a malha integrada. Porém, alguns estudos apontam que devido tanto a falta de infraestrutura para distribuir este gás no mercado interno, quanto a alta dos preços internacionais do gás, é possível que este novo volume tenha direcionamento para a exportação ao invés do consumo interno (GARCÍA KERDAN et al., 2019).

Figura 2 – Principais movimentações de GN no Brasil.



Fonte: Sistema de Informações Energéticas (EPE, 2022).

Uma alternativa para aumentar a oferta é o gás importado, como ilustra a Figura 2 (em laranja). O gás importado começou a expandir a partir dos anos 2000 com o Gasbol. A importação considera o gás importado proveniente de poços em terra na Bolívia, quanto o gás proveniente de outros países, é entregue em três portos de recebimento de GNL na costa do país (ver Figura 1, círculos verdes). Estas duas formas de importação são especialmente importantes para esta problemática, pois são as principais formas de aumentar a oferta no curto e médio prazo para a região Sul.

O suprimento oriundo da Bolívia é o que atualmente atende a região Sul do Brasil através do trecho Sul do Gasbol, dentro dos contratos estabelecidos entre Transportadoras e Distribuidoras (i.e., tarifa postal ou tarifa entrada e saída). A capacidade máxima do gasoduto da transportadora é de 30 MMm³/d, mas devido a sua característica telescópica, já entrega o máximo possível aos três estados da região. Devido as características das reservas da Bolívia e dos contratos firmados entre os agentes da cadeia, o gás boliviano entregue a estes estados sempre teve grande competitividade em preço quando comparado as alternativas. O problema neste ponto diz respeito a diminuição da oferta de gás boliviano para o Brasil, visto que nos últimos anos o volume médio de importação por este gasoduto está em cerca de 73% da capacidade máxima (22MMm³/d). Esta redução é em partes associada a geopolítica e em partes

relacionada a deficiência de investimentos nos campos da Bolívia para manter a alta produção do país.

Por outro lado, o suprimento oriundo da importação pelos terminais de GNL do Brasil, vem crescendo nos últimos anos, principalmente devido à crescente demanda termoelétrica do país. Nestes portos o gás é trazido por grandes navios transportadores de GNL. O GNL é interessante pois trata-se do gás natural, resfriado a -163 graus centígrados, onde seu volume é reduzido cerca de 600 vezes, viabilizando seu transporte a granel. O problema deste modal de transporte é que devido ao resfriamento e ao transporte, o gás chega ao país por um preço 2-3 vezes maior que o gás boliviano por exemplo. O problema específico neste ponto, é que até então os terminais existentes não atendem a região Sul.

Há, contudo, um novo porto de importação de GNL em questão, situado em São Francisco/Santa Catarina, denominado Terminal Gás Sul (TGS). Este porto se apresenta como uma alternativa relevante para aumentar a oferta de gás em todo trecho Sul do Gasbol em cerca de 6-15 MMm³/d. A oferta deverá superar a capacidade dos dutos de transporte. O projeto tem previsão para iniciar sua operação em 2023 e pode, além de ofertar gás para a rede de transporte, pode ser um supridor de gás por outros modais de transporte que não os gasodutos.

Um exemplo de modal de transporte alternativo, ocorre por tanques menores (21 a 42m³ de GNL entregues por transporte rodoviário ou ferroviário (MOUTINHO DOS SANTOS; PEYERL; NETO, 2021). Estes autores desatacam que antes de haver um gasoduto para uma região isolada é possível e indicado criar um mercado local, estabelecendo os primeiros consumidores, a partir de redes de gasodutos locais. Estas redes também podem ser chamadas de redes isoladas, uma vez que atendem cidades consideradas isoladas. A partir desta indução do mercado seria mais fácil para os futuros produtores de biogás planejarem modelos de negócio com biometano (NUNES FERRAZ JR et al., 2022).

Diante das vertentes desta problemática e do contexto de faz-se necessário investigar como superar as barreiras para ampliação do suprimento de biometano. Portanto, se os agentes reguladores dos estados da região Sul obtiverem resultados de análises, em forma de dados e simulações para um planejamento integrado à expansão das redes isoladas, pautados na exploração do GNL e do biometano, poderá haver um aumento expressivo na oferta de biometano. Por isso busca-se responder a seguinte pergunta de pesquisa: Como as cadeias de distribuição de biometano na região Sul do Brasil podem ser viabilizadas pelo cadeia do gás natural liquefeito?

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral: Propor modelo para expansão de redes de biometano e gás natural no Sul do Brasil.

Objetivos Específicos:

- Estabelecer características, sociais, técnicas e econômicas de modelos de negócio de biometano a partir de uma revisão estruturada da literatura de inovação;
- Determinar produção teórica de biometano e demanda por gás natural por municipalidades a partir de um modelo de dinâmica de sistemas;
- Investigar a preferencias dos municípios por tarifas e modelos de negócio de biometano através de experimentos de escolha;
- Determinar localidades suscetíveis a implantação cadeias de suprimento de biometano com base em um modelo de agentes;

- Definir planejamento de longo prazo para o sistema de inovação de biogás e biometano por meio de uma análise funcional;

1.3 JUSTIFICATIVA

A importância do biogás para o Brasil pode ser destacada pelo Plano de ciência tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis 2018-2022 do governo brasileiro publicado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Neste plano, há um trecho específico para o biogás que considera imprescindível desenvolver ações para superar os seguintes desafios tecnológicos identificados na cadeia do biogás. Estes desafios se mantem até os dias atuais. Este trabalho tem como objetivo auxiliar na superação do segundo e do quinto item: (i) Desenvolver tecnologias mais eficientes para a produção e o uso do biogás e biometano em pequena, média e grande escala; (ii) Contribuir para a inserção do biometano na matriz energética nacional; (iii) Difundir o conhecimento acerca das matérias-primas existentes para a produção de biogás e biometano e capacitar recursos humanos para atender a demanda futura de empreendimentos; (iv) Desenvolver metodologias analíticas para certificação de biometano que possam facilitar a inserção de pequenos produtores no mercado; (v) Desenvolver novos usos do biogás e do biometano em aplicações industriais e nos transportes, incluindo a produção de hidrogênio e gás de síntese.

A transição energética do Brasil é caracterizada pelas tendências (i) expansão do uso de gás natural veicular, GNL e biocombustíveis no setor de transporte, (ii) utilização de cogeração industrial para deslocar a demanda de eletricidade, (iii) descentralização da geração de energia e (iv) aumento do uso de fontes renováveis variáveis. Diante deste contexto, é importante avaliar a real necessidade de grandes investimentos em estruturas físicas e fixas de gás natural, num momento em que a tendência é de descentralização do setor energético (MOUTINHO DOS SANTOS; PEYERL; NETO, 2021) [p.56]. Segundo este mesmo autor [p.121], a utilização de GNL segue em expansão acelerada e pode ultrapassar o comércio de gás natural feito por dutos nos próximos 20 anos. Esta possibilidade se torna importante principalmente diante das mudanças estruturais do setor de gás natural, como a abertura do mercado pela Nova Lei do Gás, que permite maior competitividade no setor (EPE, 2021) [p.213].

Embora nos últimos anos o Brasil tenha apresentado uma quantidade crescente de projetos para produção de biogás, a quantidade de projetos que utilizam o modelo de negócio de produzir biometano para as redes de gás é na verdade limitada. Evidência disso é retirada do mapa dinâmico dos produtores de biocombustíveis da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Este mapa indica que estes estados possuem 41 das 416 instalações produtoras de biocombustível no país. Sendo mais específico, somente sobre o biometano, das 4 instalações existentes no Brasil nenhuma está na região Sul.

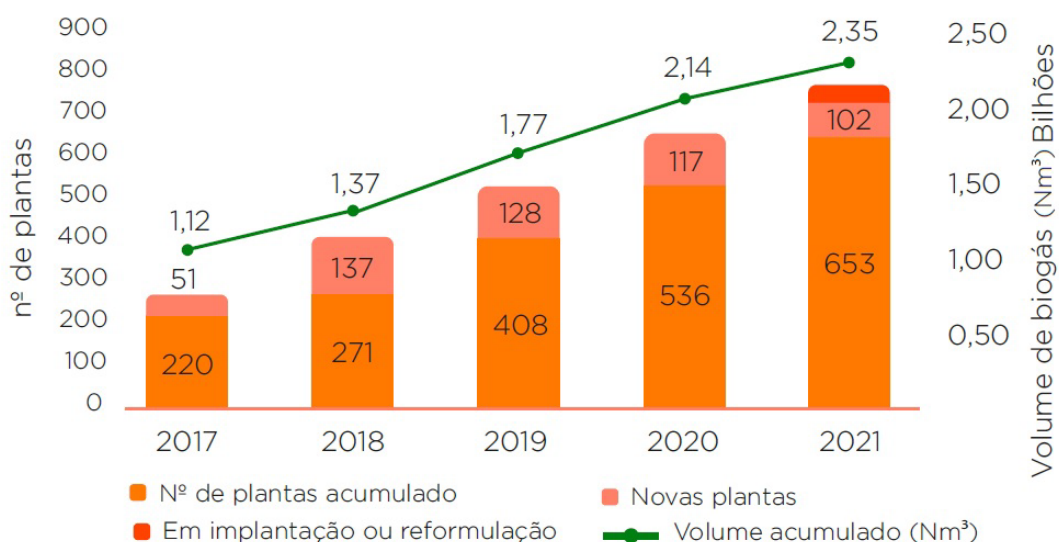
A produção nacional de biogás de 2017 para 2021, saltou de 3 MMm³/d para 6 MMm³/d e o número de plantas de 270 para 755 como ilustra a Figura 3 (CIBIOGÁS, 2021). Este relatório ainda indica que a região Sul possui 261 plantas de biogás que majoritariamente utilizam do modelo de negócio associado a geração distribuída de energia elétrica.

Como o volume indicado pela Figura 3 está dimensionado em biogás por ano, utiliza-se para comparação com o setor de gás natural, apenas a fração de metano presente no biogás (cerca de 50% do seu volume) e uma produção em dias. Com isso a produção nacional em 2021, pode ser indicada como 3 MMm³/d de biometano equivalente.

Estimativas indicam que o país pode chegar a uma produção de biogás em 2030 equivalente a 6,8 MMm³/d de biometano equivalente, de um potencial teórico de 39 MMm³/d

(BORGES et al., 2021). Estes autores demonstram que o crescimento esperado é na verdade lento e abaixo do potencial para enfrentar os desafios climáticos do país. Portanto, há um potencial em termos de biogás teoricamente capaz de suprir ou aumentar em cerca de 48% a oferta nacional atual de gás natural.

Figura 3 – Produção de biogás no Brasil.



Fonte: (CIBIOGÁS, 2021)

O biometano não é considerado ainda como um vetor para transição do Brasil, mas diante das mudanças estruturais do setor de gás e de novidades que incentivam a cadeia do biogás, é possível ele se tornar um importante vetor durante a próxima década. Novidades do setor de biogás e biometano do Brasil incluem diversos decretos e incentivos para leis, além dos mencionados na problemática (i.e., política de biocombustíveis e a geração distribuída). São alguns destes decretos e incentivos: (i) a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, indicando 25 novas unidades de produção com investimentos próximos a 1,5 bilhões de dólares e geração de 6 mil empregos; (ii) O incentivo a um mercado de crédito de metano, parte do Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano e; (iii) Uma possível isenção de Tributos para aquisição de tecnologia, pelo Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI). Com isso a produção de biometano é esperada aumentar de 0,4MMm³/d para 2,3MMm³/d em 2027, e evitar emissões de 2 milhões de toneladas de carbono equivalente. É importante salientar que mesmo com estas oportunidades para o biogás, há na verdade, um contexto fragmentado de políticas, onde elas se sobrepõem e não apresentam objetivos claros ou incentivos financeiros para a cadeia de suprimento (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; KANDA et al., 2022).

O Brasil ainda não possui incentivos eficientes para aumentar sua produção de biometano. A política nacional de biocombustíveis instaurada em 2020, por exemplo, permite estes produtores serem certificados para produzir créditos de descarbonização. Estes créditos podem então ser comercializados na bolsa de valores. Porém a realidade desta política é incerta. A incerteza é oriunda das metas, obrigações e requisitos para certificação que vem sendo revisadas e questionadas (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022). Como consequência, ainda são poucos os produtores de biometano parte deste programa. Outro incentivo relevante praticado pelo Brasil é relacionado a energia elétrica distribuída. A atual regulamentação para este modo de geração, diz que pequenos produtores podem injetar sua energia na rede de

distribuição de energia elétrica, em troca de créditos que podem ser abatidos em contas futuras. Na prática este incentivo faz com que diversos potenciais produtores de biogás optem por alternativas mais simples de investimento, com custos menores de operação e instalação, como é o caso da energia solar (BORGES et al., 2021).

Um estudo recente para as redes de gás natural e para descarbonizar o setor de transportes, buscou um planejamento integrado de gás natural e biometano para o estado de São Paulo. O estudo aponta um potencial aumentar a oferta de gás em 11 MMm³/d de biometano equivalente, e ainda determina distancias mínimas e as localizações ideais de 120 plantas de liquefação, 35 pontos de injeção e 7 postos de abastecimento para abastecimento de veículos com biometano liquefeito (NUNES FERRAZ JUNIOR et al., 2022). O uso do GNL como combustível é neste caso imprescindível para que o biometano liquefeito passe a ser um produto a mais ofertado pelos postos locais. Como o biometano pode ter uma produção sazonal, é imperativo o uso do GNL para suprir os períodos de menor produção. Deste modelo que os estados do Sul do Brasil necessitam, modelos que possam indicar as oportunidades de incluir o GNL e o biometano em redes locais capazes de suprir principalmente o setor de transportes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ABORDAGEM DOS SISTEMAS DE INOVAÇÃO

A corrente teórica que deu origem a abordagem dos Sistemas de Inovação (SI) inicia na década de 80, quando buscou-se identificar e explicar as forças que movem o progresso econômico, mais especificamente, as complexas interações que definem e orientam as possíveis direções em que esse progresso ocorre. Desta forma o conceito de evolução é incorporado a teoria econômica, onde agentes baseiam suas decisões pela decisão racional de obter lucro, mas fazendo analogia com a biologia, de forma que as mudanças transformativas ou o progresso ocorrem como resultado de quatro processos evolucionários (NELSON; WINTER, 1982). Estes processos evolucionários determinam que há competição entre inovações e que esta competição seleciona as mais relevantes economicamente, a introdução dos sistemas de inovação propõe que a relevância seja holística, buscando observar, analisar e estudar os impactos de longo prazo das inovações no desempenho das funções sociais. O progresso dentro da teoria econômica evolucionária então é tido como uma consequência fundamental do avanço conjunto entre sociedade e tecnologia, sob a influência dos paradigmas e trajetórias tecnológicas que serviram de base para os sistemas sociotécnicos. Transições nestes sistemas não são algo comum, é natural para o sistema buscar a estabilidade, por isso tais mudanças substanciais são geralmente custosas e de longo prazo (MARKARD; TRUFFER, 2008).

Com o objetivo particular de analisar a dinâmica entre estas estruturas, e mais especificamente para estudar o rápido desenvolvimento da industrialização japonesa na década de 80 a abordagem dos Sistemas Nacionais de Inovação foi a primeira menção ao termo, que também pode ser referido como substantivo, caracterizando assim a existência de um sistema. Desde então, o escopo de análise obteve lentes mais específicas, como esta já citada como primeira, a nacional, setorial ou mesmo global (BINZ; TRUFFER, 2019; LUNDVALL, 1992). O mais importante é perceber que nestas lentes existem, mas não sempre, um foco tecnológico, o foco é importante pois permite simplificar o escopo de análise, reduzindo a complexidade de analisar a dinâmica entre as diversas estruturas e políticas pertencentes a um SI. A composição da abordagem dos Sistemas de Inovação com o foco em um campo tecnológico é referida como Sistemas Tecnológicos de Inovação (STI) (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991).

Abordagens STI têm sido usadas para estudar a emergência entre tecnologias de energia de baixo carbono, como turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, mobilidade elétrica e células de hidrogênio. A lente dos STI é particularmente útil por fazer uso de uma terminologia funcional, que segue especificamente a estrutura de sete funções que quando balanceadas e com bom desempenho promovem o desenvolvimento de um STI (HEKKERT, 2007). O desenvolvimento de um STI é condicionado a sua combinação e alinhamento com as estruturas de sistemas existentes, em uma perspectiva de ciclo de vida, eles podem ser classificados em fase formativa, expansão, maturação e declínio (MARKARD, 2018)

Um SI é constituído por elementos e relações que interagem com o propósito de produzir, difundir e utilizar conhecimentos novos e economicamente úteis (EDQUIST, 1997). A estrutura de um SI pode ser pensada como uma série de empresas interagindo e inovando junto de por exemplo, sistemas educacionais, sistemas sociotécnicos, mercados de trabalho e sistema financeiro, entre outros, e na base da teoria essas interações ou fluxos de conhecimento são moldados por instituições (e.g., leis, regras, regulamentos, cultura, idioma). Além disso, é como se existissem limites para o fluxo de conhecimento, como os padrões localizados de aprendizagem, o compartilhamento e o uso de informações. Uma forma de apreciar estes fluxos é estudando a dinâmica destes sistemas e as políticas associadas, em áreas bem específicas como: (1) políticas de Pesquisa e Desenvolvimento, (2) políticas de difusão de inovação, (3) políticas de ciência e tecnologia e (4) políticas de aglomeração regional (GROBBELAAR; MALDONADO, 2019).

O objetivo de um SI então pode ser definido em termos de uma trajetória (e.g., bioenergia) ou uma tecnologia (e.g., etanol, biogás), assim, existe este nome mais adequado, o de Sistema Tecnológico de Inovação (STI), o objetivo destes sistemas é a difusão do uso e do conhecimento de uma tecnologia (EDQUIST, 1997). Uma das formas de analisar um STI é pela análise de um conjunto de funções desempenhadas pelo sistema que promovem seu desenvolvimento. A análise de funções pode ser conduzida a partir de dados de entrevistas, revisões de literatura e outros métodos mais quantitativos, como é o caso de enquetes (e.g., dicotômicas e politômicas).

Sistemas de Inovação são tipos especiais de Sistemas Adaptativos Complexos (SAC), que se caracterizam por sua abertura, complexidade, emergência, interdependência, não linearidade, auto-organização e comportamento adaptativo. Devido a essas características, o fluxo de informações através das fronteiras não é facilmente visto. Existem vários subsistemas que definem um CAS e alguns comportamentos são resultados de interações entre esses subsistemas que não são evidentes isoladamente. As partes do sistema podem ter a mesma entrada e ainda gerar resultados diferentes, ao contrário das perspectivas lineares. Várias partes de um sistema coordenam suas ações, sem planejamento centralizado, adaptando ou mudando seu ambiente para atender às suas necessidades (EDQUIST, 1997). Em suma, um dos princípios mais importantes da teoria de SI é entender que um sistema é um conjunto de elementos interconectados que produzem padrões de comportamento ao longo do tempo. O comportamento pode ser restringido, desencadeado ou dirigido por forças externas, mas seus resultados são decorrentes de características que compõem o sistema (MEADOWS, 2008; SENGE; FORRESTER, 1980).

Tabela 1 Funções de um STI. Fonte: Elaborado pelo autor.

I. Atividades empreendedoras: os empreendedores transformam novos conhecimentos e informações, reunidos de suas redes e mercados, em ações que aproveitam oportunidades de negócios (HEKKERT et al., 2007). Um TIS evolui à medida que tecnologias e mercados se modificam ou surgem dentro de uma gama de incertezas. A principal força para reduzir a incerteza

<p>é a experimentação, um processo de aprendizagem (BERGEK et al., 2008; KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998).</p>
<p>II. Desenvolvimento de conhecimento: o desenvolvimento do conhecimento envolve tipos de aprendizagem via pesquisa, uso e interação com a tecnologia ou mercados (BERGEK et al., 2008). As curvas de aprendizado gerado a partir das atividades citadas são responsáveis por aumentar o desempenho da tecnologia.</p>
<p>III. Difusão de conhecimento através de redes: o conhecimento é difundido e combinado quando indivíduos que queiram transformar informações em conhecimento, o recebam da perícia (competência) de outros (CARLSSON; STANKIWICZ, 1991). Embora a informação, que consiste de dados organizados que podem ser transferidos a baixo custo, o conhecimento é obtido por meio de uma soma de informações e esforço cognitivo; portanto, novos conhecimentos são difíceis de transferir, uma vez que requerem aprendizagem por parte do destinatário.</p>
<p>IV. Orientação da pesquisa: a orientação se refere a visibilidade, desejo e compreensão do usuário em relação a uma tecnologia e suas possíveis aplicações e concorrentes (BERGEK et al., 2008). Enquanto a experimentação empreendedora é responsável por criar variedade tecnológica, esta função representa como as novas tecnologias são selecionadas e adotadas. As orientações indicam que a mudança tecnológica não é autônoma (HEKKERT et al., 2007).</p>
<p>V. Formação de mercado: mercados bem estabelecidos fazem um TIS desenvolver rapidamente e podem sustentar até mesmo um TIS em fases de formação de baixo desempenho (e.g., relação preço/desempenho pouco conhecido) (BERGEK et al., 2008). Além disso, novas tecnologias podem ter dificuldades para competir com as tradicionais, conseqüentemente, é importante criar espaços protegidos temporários, como nichos, às vezes para aplicações muito específicas da tecnologia (KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998).</p>
<p>VI. Mobilização de recursos: os recursos financeiros e humanos possibilitam as atividades de TIS necessárias, bem como a educação em empreendedorismo, gestão, capital financeiro, produtos, serviços, redes e infraestruturas complementares (BERGEK et al., 2008; HEKKERT et al., 2007). Esta função fica mais evidente à medida que o TIS entra em fases de expansão e maturação (MARKARD. 2018).</p>
<p>VII. Criação de legitimidade: legitimidade é o alinhamento (ou desalinhamento) percebido entre entidades e conjuntos de regras, leis, regulamentos, normas, valores, crenças e práticas socialmente construídos (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016). Novas tecnologias devem se tornar parte de um esquema estabelecido ou suprimi-lo, e ambas podem criar legitimidade tanto a favor quanto contra o TIS (HEKKERT et al., 2007).</p>

A análise de um STI possibilita identificar obstáculos sistêmicos que possam dificultar o desenvolvimento e a difusão de algum tipo de inovação (NEGRO; ALKEMADE; HEKKERT, 2012). As funções descrevem os elementos necessários nos processos de inovação, visando uma mudança sistêmica, com a intenção de sustentar a formulação de políticas. As funções do sistema auxiliam no mapeamento de políticas, identificando falhas em políticas e justificam a intervenção de novas políticas (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). Na verdade, a lente teórica dos STI não é a única para este tipo de análise e inclusive é questionada por ser limitada em entender como uma inovação emergente interage com o ambiente ou contexto em que se insere (MARKARD; TRUFFER, 2008). O contexto deve ser entendido como um nível de análise que compreende áreas de uma estrutura de ordem superior (e.g. outros sistemas de inovação, o estado de desenvolvimento de setores econômicos, sistemas legais e políticos etc.). Uma forma de vencer esta dificuldade é a combinação desta lente com a Perspectiva de Multiníveis (do inglês, *Multi-Level Perspective* [MLP]) (EDSAND, 2019).

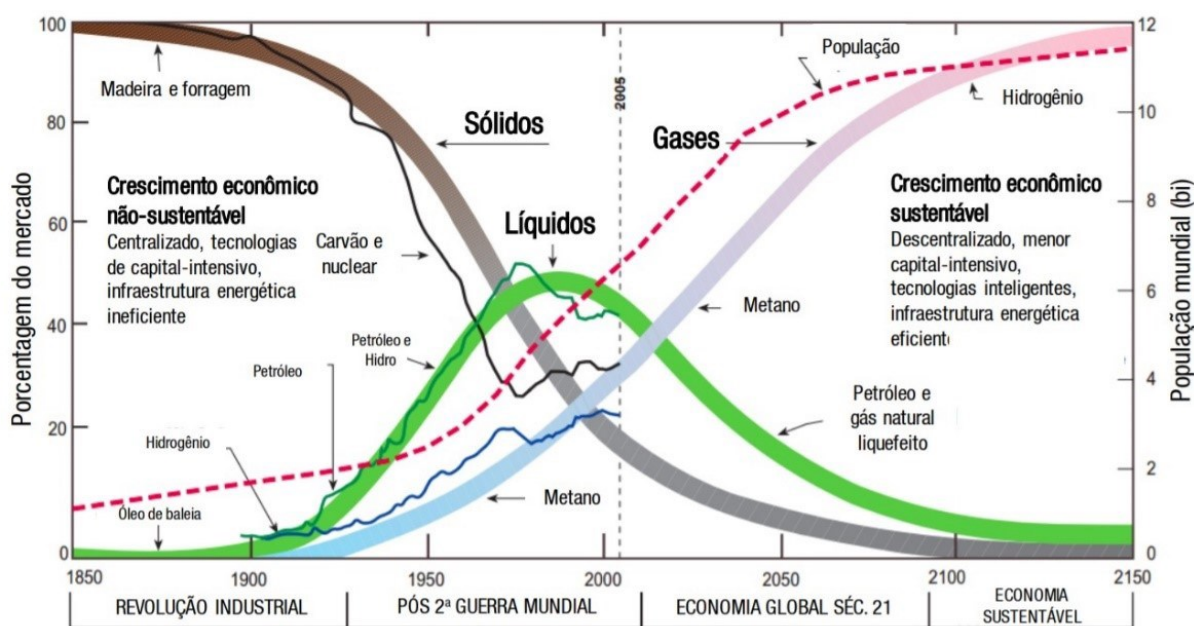
2.1. A TRANSIÇÃO NA CADEIA DO GÁS

Uma das principais justificativas relacionadas a importância do uso do biogás, esta implícito a molécula de Metano (CH₄) que o compõe. Relatórios indicam que para manter o aquecimento da terra abaixo de 1,5 graus Centígrados, as emissões de metano devem diminuir

cerca de 35%. Então, uma das principais necessidade de aproveitar o bi metano, não e energética e sim ambiental. Esta necessidade reside no fato de que, o metano tem um potencial de aquecimento global cerca de 25 vezes superior a molécula de Dióxido de carbono (CO₂) (considerando uma vida útil de 100 anos) (IPCC, 2019). No entanto, durante sua queima, o metano resulta em CO₂ e água, reduzindo significativamente seu impacto climático negativo. Com esta queima o biogás pode tornar lucrativa a atividade de processar resíduos (WBA, 2019). Estes fatos fizeram com que o uso do biogás fosse incentivado ao redor do mundo, como por exemplo pela Europa (BREMOND et al., 2021) e China. Segundo a associação *World Biogas Association* (WBA) ainda há uma série de externalidades positivas, que fazem do biogás altamente estratégico e competitivo. São algumas delas: Ocorre em alto grau de descentralização; permite a destinação adequada dos resíduos gerados; a biodigestão tem como produtos o biofertilizante e o biogás; é o único combustível que tem origem em passivos ambientais; único energético que possui pegada de carbono negativa em seu ciclo de vida; pode ser utilizado para gerar energia elétrica de base, ao contrário de outras energias renováveis, que são intermitentes.

A segunda justificativa que sustenta a transição energética abordada neste trabalho e contextual e macroeconômica. Esta transição indica um futuro determinado por uma Era dos Gases, como ilustra a Figura 4. Uma Era dos Gases determinara que a humanidade abandone uma forma de crescimento econômico não sustentável, centralizado, intensivo em capital e ineficiente energeticamente, e vá gradativamente encontrando um modelo de crescimento descentralizado, desenvolvido tecnologicamente, menos capital-intensivo e eficiente no aproveitamento energético (HEFNER, 2002).

Figura 4 – Transição para Era dos Gases



Fonte: Hefner (2002)

Para acelerar esta transição os modelos de negócio de biometano precisam ser mais presentes ao redor do mundo. A dificuldade em utilizar modelos de negócio que produzam biometano é que para capturar e usar o metano oriundo do tratamento de resíduos em operações energéticas, uma série de aparatos técnicos precisam ser instalados (e.g., biodigestores, filtros, bombas e tubulações), bem como, certos tipos de conhecimentos devem ser estabelecidos, estes conhecimentos têm o objetivo de supervisionar sua cadeia de valor. Esta combinação de

características confirma a existência de um sistema de inovação (GROBBELAR, MALDONADO, 2019)

A dificuldade em se promover sistemas de inovação de biogás e biometano, é que requerem cooperação e incentivos financeiros para toda a sua cadeia de suprimento (e.g., matéria prima, pré-tratamento, processamento, conversão, produto e mercado) (ULMANEN; BERGEK, 2021). Em específico para produção de biometano, o equipamento para remover o dióxido de carbono do biogás pode representar 60% do capital investido (NUNES FERRAZ JÚNIOR et al., 2022).

Em outro aspecto tem-se a importância para a transição, de se usar o biometano para as redes de gás natural e para descarbonizar o setor de transportes, ao invés de utilizá-lo como biogás para geração de energia elétrica. Esta importância pode ser destacada pelo contraste encontrado por estudos de Análise de Ciclo de Vida. Estas análises demonstraram reduções próximas 500kg/MWh (i.e., até 5,8 toneladas de CO₂eq/Tep fornecido pelo combustível), para cenários onde o biogás é utilizado como combustível, deslocando gasolina e diesel; mas apenas cerca de 300kg quando o gás é utilizado para produção de energia elétrica (NATIVIDAD PEREZ-CAMACHO; CURRY; CROMIE, 2019). Diante deste contraste, se justifica o uso mais nobre do biogás na sua forma de biometano, com o objetivo de substituir combustíveis fósseis no setor de transportes. Os autores ainda destacam que o uso do biometano para injeção em redes de gás, com objetivo de aquecimento de residências, representa apenas 191kg/MWh. Ainda, uma outra Análise de Ciclo de Vida realizada sobre a produção de biogás oriundo da produção de suínos confinados, indica que a geração de eletricidade pode mitigar 100% das emissões de gases de efeito estufa, enquanto a produção de biometano mitiga até 114% das emissões destes gases (HOLLAS et al., 2022).

A adoção do modelo de negócio para uso do biometano em redes de gás depende de incentivos e oportunidades. Estudos sobre estes modelos indicam que a independência do produtor para ter acesso e conexão as redes de gás natural é a principal força motriz da aceitação da tecnologia de biodigestão (AHMED et al., 2022). Em outro lado, com relação as forças inibitórias, existe uma grande dificuldade na necessidade frequente de manutenção dos biodigestores, o longo período para se obter retorno financeiro, e ainda a falta de especialistas são três dos aspectos mais críticos para aumentar a adoção de biodigestores.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em sequência, são abordados brevemente os métodos adotados para cada objetivo específico e apresenta-se o enquadramento e a relevância teórica deste trabalho. Os métodos inicialmente reconhecem que a concepção de um planejamento que visa integrar o setor energético com os setores de resíduos implica em uma análise multidimensional. Segundo (PINTO JUNIOR, 2007) existem diversas dimensões para estas análises, como: macro e microeconômica, tecnológica, ambiental e política. De maneira esquemática todas as dimensões estão atreladas a duas questões da política energética: (i) a insegurança do abastecimento de energia; e (ii) o uso racional dos recursos naturais. O planejamento, sugerido deve buscar integrar estas dimensões de forma a incentivar o desenvolvimento do biometano no interior dos estados. Para suscitar este desenvolvimento os governos dispõem de instrumentos que afetam estas dimensões, como as políticas de tributação e de preços, os subsídios, incentivos e tarifas. As tarifas são de especial interesse, pois através da atuação das agências reguladoras, como planejadoras do sistema, torna-se possível suscitar o desenvolvimento esperado. Este planejamento deve incluir objetivos que especificamente vão além dos períodos de concessão das distribuidoras de gás canalizado.

O arcabouço teórico desta tese se molda dentro da Teoria dos Sistemas de Inovação, oriunda da economia evolucionária. Para esta teoria estes instrumentos que resultam da concessão de um serviço público podem ser chamados de inovações institucionais (EDQUIST, 1997). Algumas destas inovações foram criadas junto a indústria do petróleo na década de 30 e ainda hoje muitos países mantêm condições de monopólio em transporte e distribuição em setores de gás natural (JUNIOR, 2007) [p.23]. Diante deste contexto de inovações e desenvolvimento, o objetivo das concessionárias passa a ser ambíguo diante das necessidades de promover fontes renováveis, pois de um lado os investimentos são motivados pelo lucro e de outro lado, pelo desenvolvimento sustentável de sua própria cadeia. Este olhar holístico dos sistemas de inovação é muito útil para descrever as barreiras de um setor de energia renovável que está em desenvolvimento, por isso, a teoria é utilizada como base estrutural.

Para o cumprimento do primeiro objetivo específico a literatura que em parte já foi destacada nesta introdução, deve determinar as características mais importantes de modelos de negócio de biometano. A técnica de revisão estruturada é uma revisão bibliográfica, que combina de análise centométrica e análise de conteúdo. O método consiste geralmente de cinco fases: (i) construção da base de dados, (ii) filtragem para formulação da base de dados a ser analisada, (iii) análise centimétrica para destacar palavras, autores e histórico do tema de pesquisa, (iv) análise de conteúdo para atingir o objetivo específico, (v) identificação de lacunas de pesquisa (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019). A literatura nacional neste método será acessada por bases nacionais e deve incluir publicações distintas, incluindo teses e dissertações além de artigos revisados por pares.

A dinâmica de sistemas é o método selecionado para o cumprimento do segundo objetivo específico. Ela foi selecionada pois pode facilmente estimar o potencial de biometano de diversas fontes de biomassa (BORGES et al., 2021). Neste método o problema é definido em termos de uma hipótese dinâmica sobre dados históricos. Esta hipótese é testada em diversos cenários pela variância dos parâmetros de um modelo e indicam se a hipótese é correta ou não (STERMAN, 2000). Grande parte dos modelos de adoção de tecnologia renovável usam variações de modelos de difusão tecnológica (BASS, 1969). A dinâmica de sistemas também segue cinco fases: (i) determinação do problema, (ii) definição da hipótese dinâmica, (iii) formulação do modelo, (iv) verificação do modelo e (v) formulação e avaliação de políticas.

A justificativa para este método é relacionada a disponibilidade de biomassa na região Sul. Devido as características heterogêneas das regiões do Brasil, cada uma apresenta capacidades diferentes para trabalhar com suas cadeias de gás natural, biogás e biometano. Estas diferenças indicam a necessidade de agir tanto de forma abrangente quanto de forma local. No caso da região Sudeste, o potencial de biogás é altamente associado a indústria da cana de açúcar e dos aterros sanitários, porém a região Sul não possui a mesma vocação. No Sul o potencial é mais associado a produção de animais, como suínos, aves e bovinos. O número de animais nos três estados e apresentado na tabela 1 (IBGE, 2021). A cadeia de produção de animais proporciona uma variedade de resíduos para produção de biogás, como os dejetos gerados pela sua alimentação, os dejetos oriundos do processo de abate e entre outros (HOLLAS et al., 2022).

Tabela 1 – Número de animais em cada estado da região Sul

	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Total
Bovino [milhões]	8,585	4,533	11,128	24,246
Bubalino [milhões]	0,035	0,010	0,049	0,094
Equino [milhões]	0,272	0,122	0,520	0,914
Suíno - total [milhões]	6,945	7,806	5,860	20,610
Suíno - matrizes [milhões]	0,625	0,905	0,572	2,102
Caprino [milhões]	0,086	0,041	0,062	0,188
Ovino [milhões]	0,574	0,339	2,951	3,864
Galináceos [bilhões]	0,395	0,136	0,165	0,696
Galinhas [bilhões]	0,025	0,018	0,020	0,063
Codornas [milhões]	0,559	1,104	0,780	2,443

Fonte: Elaboração própria, baseado em IBGE

Em outra vertente tem-se a biomassa destinada a unidades de processamento de resíduos. A região Sul possui 902 unidades de processamento, como mostra a tabela 2. Desta quantidade, destaca-se o número de aterros sanitários (205), que representam 31% de todos os aterros deste tipo no país. Analisando o país como um todo, percebe-se a existência de muitos lixões e de aterros controlados. Outra informação relevante desta tabela é o número de unidades de tratamento e compostagem que são pequenos. Esta tabela chama atenção por demonstrar que a região Sul apresenta um número elevado de unidades de tratamento. A região também apresenta os melhores índices do país, em municípios atendidos pela coleta e reciclagem, aproximadamente 98% e 5% respectivamente (SNS, 2022).

Tabela 2 – Número de unidades de tratamento de resíduos sólidos na região Sul

Tipo de unidade de processamento de Resíduos Sólidos	Região Sul	Total - Brasil
Lixão Aberto	28	1545
Unidade de triagem	435	1325
Aterro sanitário	205	652
Aterro controlado	48	617
Unidade de transbordo	73	202
Aterro de Construção Civil	16	78
Unidade de compostagem	13	74
Área de transbordo Construção Civil	21	64
Unidade de manejo de galhadas e podas	21	47
Área de reciclagem de Construção Civil	7	44
Unidade de tratamento (e.g., autoclave)	7	21
Unidade de tratamento por incineração	2	16
Vala específica para Resíduos da Saúde	2	16
Queima em forno	0	2
Outros	24	315
Total	902	5018

Fonte: Elaboração própria, baseado em SNS

Um terceiro potencial que merece atenção é o da indústria da cana-de-açúcar. Este foi deixado por último, pois existem prioritariamente no norte do estado do Paraná, que possui 26 plantas de etanol. O biogás nestas indústrias é produzido da vinhaça, um subproduto da produção de etanol. A vinhaça é um líquido residual gerado durante o estágio de destilação, sendo produzido em uma taxa média de 12 litros por litro de etanol produzido, com base no total de etanol estima-se uma produção de 490 bilhões de litros de vinhaça por ano no Brasil. Com este tipo de informação é possível estimar a produção teórica de biogás destas usinas

(NUNES FERRAZ JUNIOR et al., 2022). Existem ainda outras 8 usinas de biodiesel na região Sul, que no futuro podem também contribuir para a cadeia do biometano.

O terceiro objetivo específico inicia a coleta empírica desta tese e atende uma condição para pesquisas de transições, que recomendam a interação com indivíduos para relevância prática dos objetivos. As municipalidades que tiverem um potencial significativo de biometano serão convidadas a participação na calibragem de diferentes parâmetros do modelo proposto. Estes experimentos são conduzidos com usuários e não-usuários de uma tecnologia ou modelo de negócio para determinar o que cada grupo estaria disposto a abrir mão para possuir mais de uma determinada característica desta tecnologia ou modelo (J.J; HENSHER; J.D, 2000; BEN-AKIVA; LERMAN, 1985). Os municípios podem a partir de um representante que participará deste experimento, ter uma análise de suas matrizes em função de um modelo que suporta a tomada de decisão de agentes reguladores e políticas. Este método possui cinco fases, (i) determinação das características das escolhas, (ii) determinação da direção das escolhas, (iii) elaboração do instrumento e definição da amostra, (iv) coleta com usuários e não usuários, (v) determinação das preferências em função dos custos de uma tecnologia.

O quarto objetivo específico é novamente relacionado a simulação. O objetivo desta nova modelagem e utilizar dos resultados da simulação dinâmica em pontos específicos do tempo, com intervalos de 5 ou 10 anos para simular como a distribuição de gás natural liquefeito e biometano podem ser complementares. Os resultados do experimento de escolha por sua vez devem informar a modelagem de agentes em como os usuários preferem seus projetos de biometano (BURG et al., 2021). Esta combinação permite determinar sistemas de logística e de localização para produtores e redes locais. Este método possui em geral cinco fases: (i) definir o diagrama de agentes e seus papéis; (ii) prover serviços as tarefas, detalhando-as através de um diagrama de atividades; (iii) refinar protocolos de interação; (iv) especificar diagramas de estado; (v) formulação e avaliação de políticas. Esta logica deve ser repetida para os diferentes intervalos temporais. A combinação destas modelagens é resultado de uma re-conceitualização da dinâmica inicial e pode ser aplicada a modelos de difusão tecnológica (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004).

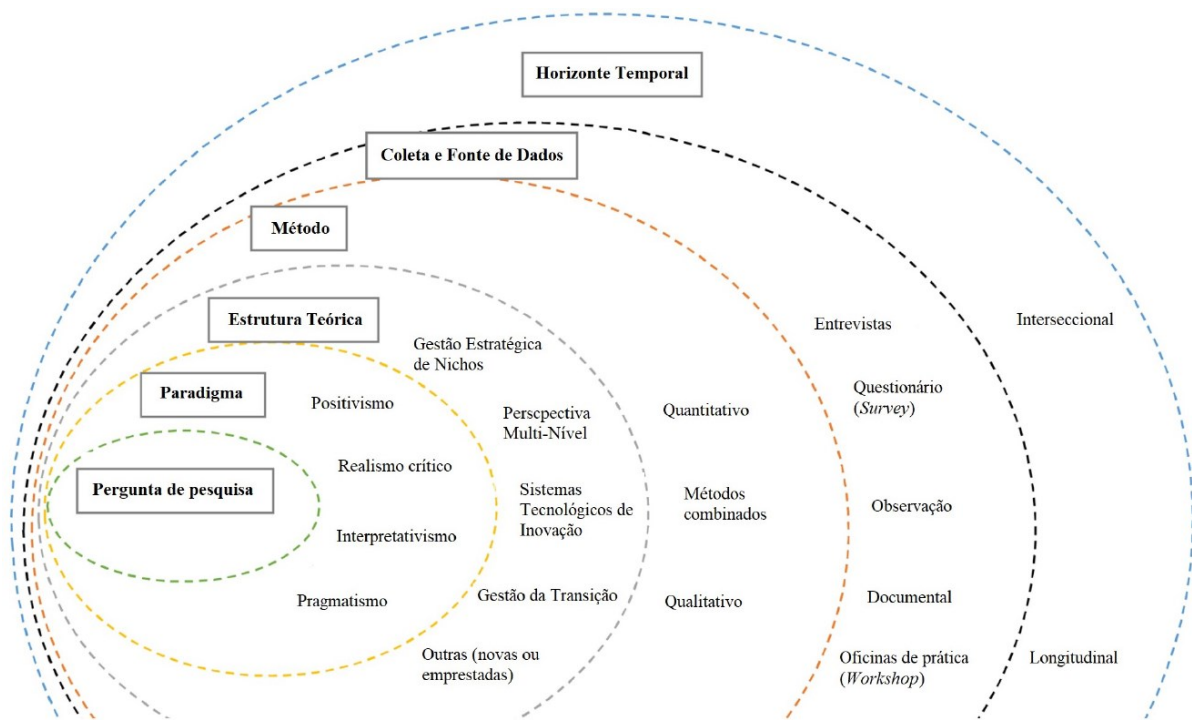
O quinto objetivo se dá pela análise funcional prospectiva e volta a teoria base, a teoria dos sistemas tecnológicos de inovação (EDQUIST, 1997). Esta análise irá apontar as estratégias necessárias para amadurecer os sistemas de inovação de biometano com foco em diferentes funções destes sistemas e no seu ciclo de vida (MARKARD, 2018). As principais funções analisadas são: (i) atividades empreendedoras, (ii) desenvolvimento de conhecimento, (iii) Difusão de conhecimento através de redes, (iv) Orientação de pesquisa, (v) Formação de mercado, (vi) Mobilização de recursos e (vii) Criação de legitimidade/combater a resistência a mudança (BERGEK et al., 2008; NEGRO; HEKKERT, 2008). Este conjunto permite ao analista uma forma de acessar o desempenho de um sistema. Mas neste caso ela será utilizada para determinar o desempenho futuro do sistema. Este olhar para o futuro destaca a relevância teórica deste trabalho para a teoria geral dos sistemas.

Por fim o último destaque para os métodos diz respeito a classificação metodológica deste trabalho. Inicialmente a relevância teórica e científica deste trabalho, podem ser destacadas pela combinação de métodos. A combinação destes métodos é relevante para a teoria pois expande os limites de cada um dos métodos. Neste sentido, a relevância teórica desta é assegurada pela necessidade de compreender e explicar o fenômeno da expansão da rede de gás natural em função dos modelos de biometano a partir da investigação das suas causas e consequências. Revelando a conjectura ou hipótese investigada. Para a relevância prática, possíveis modificações no planejamento de expansão da indústria de gás e biometano da região Sul podem ser geradas.

O enquadramento teórico é realizado a partir da Diagrama de Pesquisa em Transições, como é chamada a imagem da Figura 5 (ZOLFAGHARIAN et al., 2019). A categorização do núcleo mais interno, é o resultado da indução dos autores sobre diversas perguntas de pesquisa. Segundo esta categorização este trabalho, especificamente, investiga a influência de variáveis ou fatores específicos processos de transição subjacentes (perguntas sobre ‘variáveis’). Mas por incluir métodos de simulação, também pode ser categorizado pela investigação de políticas de transição específicas e caminhos de transição.

O Paradigma é a segunda camada do diagrama e pode ser definido pelas premissas de natureza da realidade, limites de conhecimento e valores éticos associados a pergunta. Nesta classificação este trabalho utiliza um paradigma positivista pois pode ser caracterizado pela descrição, controle, imparcialidade e predição necessários para abordar a problemática. A Estrutura Teórica selecionada é a dos Sistemas de Inovação pois esta estrutura expõe como amadurecer tecnologias em fases iniciais. A Gestão de Nichos também poderia ser utilizada, mas não é tão frequentemente usada em pesquisas sobre biogás. O método é quantitativo devido as simulações. A Coleta e Fonte de Dados é do tipo questionário devido utilização de experimentos de escolha. Na última camada, o Horizonte Temporal desta pesquisa pode ser classificado como longitudinais uma vez que visa estudar um fenômeno particular (ou fenômenos) ao longo de um (prolongado) período.

Figura 5 – Diagrama de Pesquisa em Transições



Fonte: Zolfagharian et al. (2019)

4. REFERÊNCIAS

AHMED, Naseer et al. Systematic analysis of factors affecting biogas technology acceptance: Insights from the diffusion of innovation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102122, 2022.

- ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. [S.l.: s.n.], 2019.
- BASS, F.M. A new product growth model for consumer durables. **Management Science**, v. 15, n. 5, p. 215–227, 1969.
- BEN-AKIVA, M.; LERMAN, S. **Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand**. [S.l.]: Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- BERGEK, Anna et al. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. **Research Policy**, v. 37, n. 3, p. 407–429, 2008.
- BORGES, Cosme P. et al. A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.a., 2021.
- BORSHCHEV, Andrei; FILIPPOV, Alexei. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. **The 22nd International Conference of the System Dynamics Society**, Oxford, England, 2004.
- BREMOND, Ulysse et al. A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125065, 2021.
- BURG, Vanessa et al. Farmer’s willingness to adopt private and collective biogas facilities: An agent-based modeling approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105400, 2021. ISSN 0921-3449.
- CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. **Journal of evolutionary economics**, 1 n.2, p. 93–118, 1991.
- CIBIOGAS. Panorama do Biogás no Brasil - Relatório Técnico no 001/2022. **Foz do Iguaçu - Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás**, CIBiogas, p. 20, 2021.
- DE OLIVEIRA, Luiz Gustavo Silva; NEGRO, Simona O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 462–481, 2019. ISSN 1364-0321.
- EDQUIST, Charles. **Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations**, 1997.
- EDSAND, H.E. Technological innovation system and the wider context: A framework for developing countries. **Technology in Society**, v. 58, p. 101-150, 2019.
- EPE. **Plano Decenal de Energia 2031**. [S.l.], p411. 2021.
- EPE. **Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte**. [S.l.], 2020.
- FREEMAN, C.; SOETE, L. **The economics of industrial innovation**. Routledge, 1997.
- GARCIA Kerdan, Ivan et al. Modelling cost-effective pathways for natural gas infrastructure: A southern Brazil case study. **Applied Energy**, v. 255, p. 113799, 2019.
- GRANGEIA, Carolina; SANTOS, Luan; LAZARO, Lira Luz Benites. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management: X**, v. 13, p. 100156, 2022.
- GROBBELAAR, S. MALDONADO, M. U.; Innovation system policy analysis through system dynamics modelling. **Science and Public Policy**, v. 46, n. 1, p. 28–44, 2019.

- HEFNER, Robert A. The age of energy gases. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 27, n. 1, p. 1–9, 2002.
- HOLLAS, Camila Ester et al. Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production. **Journal of Cleaner Production**, v. 354, p. 131654, 2022.
- IBGE, Produção Pecuária municipal. v. 84, 2020.
- IPCC. **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.], 2019. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 996 pp.
- LOUVIERE, Jordan et al. **Stated choice methods – Analysis and Application**. [S.l.]: Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- JUNIOR, Helder Queiroz Pinto. **Economia da Energia**. [S.l.]: Elsevier; Petrobras, 2007. P. 348. ISBN 978-85-352-2408-5.
- KANDA, Wisdom et al. Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas in Brazil. **Energy Research and Social Science**, v. 87, p. 102454, 2022. ISSN 2214-6296.
- KEOGH, Niamh; CORR, D.; MONAGHAN, R.F.D. Biogenic renewable gas injection into natural gas grids: A review of technical and economic modelling studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, p. 112818, 2022. ISSN 1364-0321.
- KINNON, Michael A. Mac et Al. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 64, p. 62–92, 2018. ISSN 0360-1285.
- KEMP, R.; SCHOT, J.; HOOGMA, R. Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. **Technology Analysis & Strategic Management**, Routledge, v. 10, n. 2, p. 175–198, 1998.
- LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation modeling and analysis**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 2010.
- LUNDEVALL, Bengt-Åke. **National Systems of Innovation: towards a Theory of Innovation and Interactive Learning**. London: Printer Publishers, 1992.
- MALERBA, F. Sectoral systems of innovation and production. **Research Policy**, v. 31, n. 2, p. 247–264, 2002. Innovation Systems.
- MARKARD, Jochen. The life cycle of technological innovation systems. **Technological Forecasting and Social Change**, 2018. ISSN 0040-1625.
- MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. **Research Policy**, v. 41, n. 6, p. 955–967, 2012.
- MARKARD, J.; TRUFFER, B. Technological innovation systems and the multi-level perspective: an integrated framework. **Research Policy**, v. 37, n. 4, p. 596–615, 2008.
- MEADOWS, D. **Thinking in Systems: a primer**. Vermont: Chelsea Green Publishing, 2008.
- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Metodologia de pesquisa para Engenharia de Produção e gestão de operações**. Elsevier: Abepro, 2012.

- MOUTINHO DOS SANTOS, Edmilson; PEYERL, Drielli; NETO, Anna Luisa Abreu. **Oportunidades e Desafios do Gás Natural e do Gás Natural Liquefeito no Brasil**. [S.l.]: Letra Capital, 2021. P. 186.
- NATIVIDAD PEREZ-CAMACHO, Maria; CURRY, Robin; CROMIE, Thomas. Life cycle environmental impacts of biogas production and utilization substituting for grid electricity, natural gas grid and transport fuels. **Waste Management**, v. 95, p. 90–101, 2019.
- NEGRO, Simona O.; HEKKERT, Marko P. Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 20, n. 4, p. 465–482, 2008. ISSN 0040-1625.
- NELISSEN, Dagmar et al. **Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane - The maritime shipping perspective**. [S.l.], 2020.
- NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **An Evolutionary Theory of Economic Change**. Harvard University Press, 1982.
- NEVZOROVA, Tatiana; KUTCHEROV, Vladimir. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, 2019. ISSN 2211-467X.
- NUNES FERRAZ JR, Antonio Djalma et al. Liquefied biomethane from sugarcane vinasse and municipal solid waste: Sustainable fuel for a green-gas heavy duty road freight transport corridor in São Paulo state. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130281, 2022.
- SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, SNS. **Diagnostico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - Infraestrutura 2020**. 2022.
- SENGE, P. M.; FORRESTER, J. W. Tests for building confidence in system dynamics models. **TIMS studies in management sciences**, v.14, p.209-228, 1980.
- SINIGAGLIA, Tiago et al. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074–12095, 2022.
- STERMAN, John D. **Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a complex world**. Boston: Mc Graw Hill Higher Education, 2000. 1008p.
- ULMANEN, Johanna; BERGEK, Anna. Influences of technological and sectoral contexts on technological innovation systems. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 40, p. 20–39, 2021. ISSN 2210-4224.
- WBA. **World Biogas Association: Biogas - An important renewable energy source**. 2019.
- ZOLFAGHARIAN, Mohammadreza et al. Studying transitions: Past, present, and future. **Research Policy**, v. 48, n. 9, p. 103788, 2019.