



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

Cosme Polese Borges

**Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: Uma análise funcional e
prospectiva**

Florianópolis
2020

Cosme Polese Borges

Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: Uma análise funcional e prospectiva

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Mauricio Uriona-Maldonado, Dr.

Coorientador: Prof. Caroline Rodrigues Vaz, Dr(a).

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

POLESE BORGES, COSME

Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: :
Uma análise funcional e prospectiva Dissertação / COSME
POLESE BORGES ; orientador, Mauricio Uriona-Maldonado,
coorientador, Caroline Rodrigues-Vaz, 2020.

211 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Matriz Energética. 3.
Biogás. 4. Sistemas Tecnológicos de Inovação. 5. Dinâmica de
Sistemas. I. Uriona-Maldonado, Mauricio. II. Rodrigues
Vaz, Caroline. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção. IV. Título.

Cosme Polese Borges

Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil: Uma análise funcional e prospectiva

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Sieglinde Kindl da Cunha, Dr(a).
Universidade Positivo

Prof.(a) Alessandro Sanches Pereira, Dr(a).
Curtin University/Austrália

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Prof. Enzo Morosini Frazzon , Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Mauricio Uriona-Maldonado, Dr.
Orientador

Florianópolis, 19 de Julho de 2020.

Este trabalho é dedicado a todos que visam a manutenção das gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a todos que fizeram parte desta jornada que em seu ápice resultou neste trabalho. Em especial minha família, Lodovico, Fausta, Cosme, Nina Rosa, Josyane, Ramsés e Geórgia por terem me presenteado as condições para buscar mais este objetivo.

Reconheço e agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina que através do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, me possibilitou a realização desta pesquisa, bem como a CAPES e ao CNPq por terem me suportado minha qualificação.

Aos meus orientadores Mauricio Uriona Maldonado e Caroline Rodrigues Vaz pela orientação e auxílio em superar minhas dificuldades.

Aos que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação, em especial meus examinadores, Sieglinde Kindl da Cunha e Alessandro Sanches Pereira. Ainda, ao entusiasta do biogás Anélio Thomazoni, que me abriu as portas para a rede dos produtores de biogás.

Por fim aos meus amigos Tiago Ferrari Luna, Timothy Robert Silberg, Tainara Volan, Rafael Marcuzzo, André Menengucci Pires, Diego Martin Tuozzo e Leidiane Ferronato Marinani que tornaram esta séria jornada, mais divertida.

“Se você falar de energia, comida ou água, nós vivemos nesta rede, todos nós, mas não sabemos de onde vem nossa comida e as conseqüências dos sistemas que a produzem e distribuem, tampouco de onde vem nossa energia e as conseqüências de nosso uso destes recursos.” [Tradução livre]
(Peter Senge, 1990)

RESUMO

O mundo busca integrar energia e ambiente através de transições para sustentabilidade, a celeridade é importante face a desafios como reduzir o aquecimento global e a destruição de ecossistemas. Uma inovação promissora se refere ao biogás, um biocombustível produzido durante a decomposição de matéria orgânica, portanto, uma fonte de energia descentralizada que ainda pode prestar serviços ambientais. O Brasil possui diversas iniciativas de sucesso no setor de biogás, vasto potencial e condições para o crescimento do setor, no entanto, carece de estudos prospectivos e regulamentações para auxiliar tomadores de decisão na compreensão de quanto e como o biogás pode complementar a oferta de energia do país. Este trabalho tem como objetivo avaliar a contribuição do biogás na matriz energética brasileira nas próximas décadas. Como procedimentos, primeiro, é realizada uma análise de conteúdo de publicações científicas internacionais, ainda, em publicações nacionais busca-se definir os setores econômicos com os quais o biogás interage; segundo, é conduzida uma análise do estado atual do setor do biogás no Brasil, por meio da lente das funções de um sistema tecnológico de inovação, com base na percepção dos atores do sistema; terceiro, é feita uma análise prospectiva com simulação computacional para testar intervenções e compreender a capacidade teórica do biogás em complementar a matriz energética do país. Os resultados das análises de conteúdo indicaram barreiras, como a necessidade de capital para infraestrutura, incentivos financeiros concedidos a energias fósseis, além de diversos mecanismos de bloqueio como a falta de alinhamento de instituições financeiras. As avenidas para promover o biogás se encontram na formação de mercado e criação de incentivos. A análise funcional apontou grande necessidade de se instaurar o Programa Nacional de Biogás e Biometano (PNBB), visto que as atividades empreendedoras são o motor do sistema enquanto a legitimidade é a função menos desenvolvida. A análise prospectiva indicou que a produção nacional de biogás pode atingir em 2030 o equivalente a 6,8 milhões de metros cúbicos de metano por dia (de um potencial teórico de 39 milhões por dia), podendo representar cerca de 3,54TWh ou cerca de 0,6% da demanda atual de energia elétrica do país. Como recomendação, o governo deveria criar um grupo de trabalho entre diversos ministérios, agências reguladoras federais e estaduais, bem como, a sociedade civil, para instaurar metas e objetivos para o desenvolvimento do sistema de inovação do biogás. Estes poderiam fazer o Brasil mais promissor em explorar seu potencial teórico de biogás.

Palavras-chave: Biogás. Brasil. Difusão. Sistema Tecnológico de Inovação. Transições.

ABSTRACT

The world seeks to integrate energy and the environment by sustainability transitions, speed is important due to challenges such as reducing global warming and the destruction of ecosystems. A promising innovation involves biogas, a biofuel produced during the decomposition of organic matter, therefore, a decentralized energy source that can still provide environmental services. Brazil has several successful initiatives in the biogas sector, vast potential and conditions for sectoral growth, however, it lacks prospective studies and regulations to assist decision makers in understanding how much and how biogas can complement the energy supply from the country. This work aims to evaluate the contribution of biogas in the Brazilian energy matrix in the coming decades. As procedures, first, a content analysis of international scientific publications is carried out, yet, in national publications, it seeks to define the economic sectors with which biogas interacts; second, an analysis of the current state of the biogas sector in Brazil is conducted, through the lens of the functions of a technological innovation system, based on the perception of the actors in the system; third, a prospective analysis with computer simulation is conducted to test interventions and understand the theoretical capacity of biogas to complement the country's energy matrix. The results of the content analysis indicated barriers, such as the need for capital for infrastructure, financial incentives granted to fossil fuels, as well as several blocking mechanisms such as the lack of alignment of financial institutions. The avenues to promote biogas are found in market formation and the creation of incentives. The functional analysis pointed out a great need to establish the National Biogas and Biomethane Program (PNBB), since entrepreneurial activities are the engine of the system while legitimacy is the least developed function. The prospective analysis indicated that the national production of biogas can reach in 2030 the equivalent of 6.8 million cubic meters of methane per day (of a theoretical potential of 39 million per day), which may represent about 3.54TWh or about 0.6 % of the country's current electricity demand. As a recommendation, the government should create a working group between different ministries, federal and state regulatory agencies, as well as civil society, to establish goals and objectives for the development of the biogas innovation system. These could make Brazil more promising in exploring its theoretical biogas potential.

Keywords: Biogas. Brazil. Diffusion. Technological Innovation System. Transitions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Oferta Interna de Energia do Brasil	21
Figura 2 – Transição para Era dos Gases	26
Figura 3 – STI em fase formativa	39
Figura 4 – STI em fase de expansão	40
Figura 5 – STI em fase de maturação	41
Figura 6 – Linhas de pesquisas no estudo de transições para sustentabilidade energética	42
Figura 7 – Caminhos percebidos para transições sociotécnicas	42
Figura 8 – Composição do biogás	45
Figura 9 – Processo de produção do biogás	47
Figura 10 – Distribuidoras de energia elétrica no Brasil	67
Figura 11 – Biomassa na matriz elétrica	69
Figura 12 – Frota por combustível	71
Figura 13 – Distribuidoras de gás canalizado	73
Figura 14 – Companhias de Saneamento Básico	78
Figura 15 – Principais rotas tecnológicas do STIBB	82
Figura 16 – Acontecimentos da Nova Era do Biogás	85
Figura 17 – Análise do biogás no Brasil pela PMN	87
Figura 18 – Métodos adotados	90
Figura 19 – Amostragem de artigos	92
Figura 20 – Estágios 1 a 3 de uma análise fatorial.	99
Figura 21 – Estágios 4 a 5 de uma análise fatorial.	100
Figura 22 – Estágios 6 a 7 de uma análise fatorial.	103
Figura 23 – Abordagens de simulação por níveis de abstração	104
Figura 24 – Diagrama de estoque e fluxo	105
Figura 25 – Diagrama de estoque e fluxo	105
Figura 26 – Curva de adoção de uma tecnologia	106
Figura 27 – Influência dos parâmetros na difusão	107
Figura 28 – Região de atuação dos respondentes	111
Figura 29 – Nível de atuação dos respondentes	111
Figura 30 – Desempenho por questão	112
Figura 31 – Médias e desvios da amostra de respondentes	113
Figura 32 – Médias e desvios sobrepostos	114
Figura 33 – Diagrama de caixas de cada questão	116
Figura 34 – Diagrama de caixas de cada questão por tipo de respondente	118
Figura 35 – Diagrama de caixas de cada questão por região do respondente	120
Figura 36 – Mecanismos de bloqueio	130

Figura 37 – Modelo de enlaces causais	134
Figura 38 – Setor da criação de animais ANI	137
Figura 39 – Setor de resíduos sólidos urbanos RSU	138
Figura 40 – Setor da vinhaça e torta de filtro	139
Figura 41 – Setor do tratamento de efluentes	140
Figura 42 – Modelo de difusão para plantas de biogás	141
Figura 43 – Setor do efeito do aprendizado	142
Figura 44 – Setor da atratividade	143
Figura 45 – Potencial de metano por rota	144
Figura 46 – Produção de metano no cenário BAU	145
Figura 47 – Plantas em operação no cenário BAU	145
Figura 48 – Preços decrescentes	146
Figura 49 – Efeito do preço	147
Figura 50 – Atratividade percebida	147
Figura 51 – Resultados da sensibilidade do Grupo A	149
Figura 52 – Resultados da sensibilidade do Grupo B	150
Figura 53 – Cenários com incrementos de atratividade	152
Figura 54 – Atratividade percebida cenário R	152
Figura 55 – Plantas operando cenário R.	153
Figura 56 – Número de publicações sobre transições e biogás	179
Figura 57 – Rede principal de autores	181
Figura 58 – Mapeamento de palavras chave	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Atividades indicadoras das funções de um STI	37
Tabela 4 – Exemplos para definição do modelo de negócio	46
Tabela 5 – Rendimento de biogás por tonelada de diversos substratos	47
Tabela 6 – Equivalência energética do biogás	49
Tabela 7 – Biogás e o mercado de energia elétrica	70
Tabela 8 – Projeção do volume de resíduos produzidos no Brasil	77
Tabela 9 – Volume de produção do agronegócio	80
Tabela 10 – Teses e Dissertações selecionadas sobre Biogás	94
Tabela 11 – Funções do STIBB e questões referentes	96
Tabela 12 – Etapa de validação do formulário	96
Tabela 13 – Estatísticas de confiabilidade	97
Tabela 14 – Estatísticas de item-total	97
Tabela 15 – Variância total explicada em autovalores	102
Tabela 16 – Matriz de componentes rotativa	121
Tabela 17 – Parâmetros do setor ANI	136
Tabela 18 – Parâmetros do setor RSU	137
Tabela 19 – Parâmetros do setor VIN	138
Tabela 20 – Parâmetros do setor ETE	139
Tabela 21 – Parâmetros de entrada do modelo	146
Tabela 22 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo A	148
Tabela 23 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo B	150
Tabela 24 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo B	151
Tabela 25 – Revistas que mais publicaram sobre biogás e transições até 2019	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEGAS	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANI	Resíduos da criação de animais
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BAU	<i>Business as Usual</i>
BIG	Banco de Informações de Geração
CBIO	Crédito de Descarbonização
CH4	Metano
CIBIOGAS	Centro Internacional de Energias Renováveis
CO2	Dióxido de carbono
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
COP	Conferência das Partes
DA	Digestão Anaeróbica
DS	Dinâmica de Sistemas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços
IPBES	Plataforma Intergovernamental Político-Científica sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mm3/d	Milhões de metros cúbicos por dia
MME	Ministério de Minas e Energia
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Pesquisa e Desenvolvimento
PDE	Plano Decenal de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PLANASB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNBB	Proposta de Programa Nacional de Biogás e Biometano
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RA	Resíduos Agrossilvopastoris
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
REN	Resolução Normativa
RI	Resíduos da Indústria
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SI	Sistema de Inovação
STI	Sistema Tecnológico de Inovação
STIBB	Sistema Tecnológico de Inovação Brasileiro do Biogás
STRN	<i>Sustainability Transitions Network</i>
tCO ₂ -eq	Toneladas equivalentes de dióxido de carbono
TUSD	Taxa de Utilização do Sistema de Distribuição
VIN	Vinhaça e torta de filtro
VRES	Valor de Referência Específico
WBA	<i>World Biogas Association</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>i</i>	Conjunto de quatro setores possíveis produtores de biogás
<i>N_c</i>	Número de cabeças de gado (Un.)
<i>N_s</i>	Número de cabeças de suínos (Un.)
<i>N_p</i>	Número de cabeças de aves (Un.)
<i>I</i>	Produção média diária de dejetos (Kg/d.un)
<i>T</i>	Produção de biogás por tonelada de dejetos ($m^3 CH_4 / ton$)
<i>Fr</i>	Rendimento de metano por tonelada (CH_4/ton)
<i>P</i>	População brasileira (hab.)
<i>n</i>	Produção específica por habitante (kg / dia)
<i>M_{fv}</i>	Fração orgânica do lixo municipal (%)
<i>Em</i>	Eficiência geral da coleta (%)
<i>T_s</i>	Massa de cana produzida (ton/ano)
<i>P_v</i>	Produção de vinhaça por tonelada de cana-de-açúcar (m^3/ton)
<i>COD_v</i>	Valor típico da Demanda Química de Oxigênio da vinhaça (kg/m^3)
<i>E_{fv}</i>	Eficiência de remoção da carga orgânica da vinhaça em um reator anaeróbico (m^3)
<i>f_v</i>	Fator específico da produção de biogás por massa de DQO removida na digestão anaeróbica (m^3/kg)
<i>E_{cv}</i>	Eficiência da coleta de gás(%)
<i>Q</i>	Volume total de efluentes produzidos por dia ($m^3/hab.d$)'
<i>G</i>	Produção média de volume de efluente por dia por pessoa($m^3/hab.d$)
<i>S_o</i>	Concentração da demanda de oxigênio químico do afluente pelo reator(kg/m^3)
<i>S</i>	Concentração do efluente COD (kg/m^3)
<i>Y</i>	Rendimento total da produção sólida (kg_l/kg_e)
<i>F(T)</i>	Fator de correção volumétrico devido a temperatura
<i>I_p</i>	Índice de perda de gás no reator devido a fugas (%)
<i>p</i>	Coeficiente de inovação
<i>q</i>	Coeficiente de imitação
<i>A_i</i>	Usuários adotantes pela inovação e imitação (plantas de biogás)
<i>C_i</i>	Estoque de adotantes no tempo t (plantas de biogás)
<i>A_p</i>	Atratividade percebida
<i>OP_i</i>	Estoque de plantas operando no tempo t (plantas de biogás)
<i>E_{op}</i>	Efeito do aprendizado no preço
<i>U</i>	Experiência inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	PROBLEMÁTICA DE PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	JUSTIFICATIVA	24
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	28
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	ABORDAGEM DOS SISTEMAS DE INOVAÇÃO	29
2.2	ALENTE TEÓRICA DOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS DE INOVAÇÃO	32
2.2.1	Funções de um STI	34
2.2.2	Fases de desenvolvimento de um STI	38
2.3	LENTE PARA ANALISAR TRANSIÇÕES SOCIOTÉCNICAS	40
3	CAMPO TECNOLÓGICO DO BIOGÁS	44
3.1	COMPOSIÇÃO, PRODUÇÃO E APLICAÇÕES	44
3.2	INTERAÇÕES DO BIOGÁS COM DIFERENTES SETORES DA ECONOMIA	49
3.2.1	Biogás nos setores agropecuários	50
3.2.1.1	Agropecuária familiar	51
3.2.1.2	Agropecuária industrial	53
3.2.1.3	Agricultura energética	54
3.2.2	Biogás nos setores de resíduos	56
3.2.3	Biogás nos setores de transporte	59
3.2.4	Biogás nos setores de energia elétrica	62
3.2.5	Biogás nos setores de gás natural	64
3.3	ALINHAMENTOS DO BIOGÁS COM OS SETORES ECONÔMICOS NO BRASIL	66
3.3.1	Setor de energia elétrica	66
3.3.2	Setor de transportes e combustíveis	70
3.3.3	Setor de saneamento	74
3.3.3.1	Resíduos sólidos urbanos	75
3.3.3.2	Estações de tratamento de esgoto	76
3.3.3.3	Resíduos Agrossilvopastoris	78
3.3.4	O sistema de inovação do biogás do Brasil	80
4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS	89
4.1	REVISÃO ESTRUTURADA DA LITERATURA	90
4.2	ANÁLISE FUNCIONAL	94

4.2.1	Análise de dados	98
4.3	ANÁLISE PROSPECTIVA	102
5	RESULTADOS DA ANÁLISE FUNCIONAL	110
5.1	ANÁLISE DESCRITIVA	110
5.1.1	Análise das médias individuais	112
5.1.2	Análise dos diagramas de caixa	115
5.2	ANÁLISE FATORIAL	121
5.2.1	Fator 1 - Reconhecimento de existência de um SI por parte dos atores	122
5.2.2	Fator 2 - Legitimidade formal e informal complementar do biogás e subprodutos	123
5.2.3	Fator 3 - Expectativas entre as atividades empreendedoras	124
5.2.4	Fator 4 - Características transformadoras estruturais	124
5.2.5	Fator 5 - Construção de incentivos e políticas para formação de mercado	125
5.2.6	Fator 6 - Perspectivas futuras positivas do marco institucional	125
5.3	AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES	126
5.4	MECANISMOS DE INDUÇÃO E BLOQUEIO	129
6	RESULTADOS DA ANÁLISE PROSPECTIVA	133
6.1	CONSTRUÇÃO DO MODELO	133
6.1.1	Modelo de mercado potencial	136
6.1.2	Modelo de difusão das plantas de biogás	139
6.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	143
6.2.1	Testes de sensibilidade	148
6.2.2	Grupo A	148
6.2.3	Grupo B	149
6.3	SIMULAÇÃO E CENÁRIOS	150
6.4	DISCUSSÃO DE CENÁRIOS	153
7	CONCLUSÃO	156
7.1	CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS FINAIS	160
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	164
	REFERÊNCIAS	166
	APÊNDICE A – BIBLIOMETRIA	178
	APÊNDICE B – CONSULTA SOBRE O SISTEMA TECNOLÓGICO DE INOVAÇÃO DO BIOGÁS DO BRASIL (STIBB)	186
	APÊNDICE C – TABELA DE CORRELAÇÕES	190
	APÊNDICE D – RESULTADO DA ANÁLISE FATORIAL	191
	APÊNDICE E – EQUAÇÕES DO MODELO DESENVOLVIDO	192
	APÊNDICE F – PEDIDO DE DIVULGAÇÃO PARA ABIOGÁS	198

APÊNDICE G – DIAGRAMAS DE CAIXAS DE TIPOS DE RESPONDENTES POR QUESTÃO	200
APÊNDICE H – GRÁFICOS DE BARRAS POR REGIÃO	207
APÊNDICE I – GRÁFICOS DE BARRAS POR ATUAÇÃO	209

1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna enfrenta atualmente diversos problemas ambientais, como a poluição, perda de biodiversidade e o aquecimento global, mas também econômicos como a necessidade de gerir corretamente recursos finitos e a má distribuição de riqueza. Enquanto isso todos os países buscam manter ou ampliar os níveis de qualidade de vida da sua população, intensificando suas produções de energia e padrões de consumo, sem considerar as consequências passadas, atuais e futuras oriundas destes problemas.

Os cenários futuros onde estes problemas são minimizados, são caracterizados pela necessidade de quase quadruplicar a matriz energética mundial até 2050, basicamente com a adição de fontes de energia com baixo nível de emissões de carbono, como bioenergia, energia eólica e solar (DURÃO, 2017). No campo acadêmico, esta temática tem ganhado força a partir da rede *Sustainability Transitions Network* (STRN), a qual argumenta que por si só, as melhorias incrementais nos métodos e modelos atuais não serão suficientes para enfrentar os problemas da sociedade moderna, ao invés disso são necessárias mudanças radicais nas estruturas e conexões que formam os paradigmas atuais (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012; GEELS; SOVACOOOL *et al.*, 2017; KOHLER *et al.*, 2019). A rede reconhece ainda que as economias industriais foram aprisionadas (sofrem de *Lock-in*) em sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis através de um processo de co-evolução tecnológica e institucional impulsionado por retornos crescentes resultantes das economias de escala (UNRUH, 2000).

Diante destes problemas um biocombustível com potencial de promover a sustentabilidade de matrizes energéticas, reduzir emissões em diversos setores da economia, como os de energia, resíduos urbanos, agricultura e transporte, e que ainda pode ampliar os níveis de qualidade de vida da população, é o biogás (RAVEN; GEELS, 2010; RAVEN, 2004). Este é o gás composto mais comum encontrado na Terra, é formado durante a decomposição de matéria orgânica e composto principalmente de metano e dióxido de carbono (BLEY JR., 2015). O metano Metano (CH₄) é o principal composto do biogás e possui potencial de aquecimento global cerca de 21 vezes superior ao do dióxido de carbono Dióxido de carbono (CO₂). No entanto, durante sua queima o CH₄ resulta em CO₂ e água, reduzindo significativamente seu impacto climático negativo e tornando, com isso, lucrativa a atividade de processar resíduos (WBA, 2019). 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 bio-digestão tem como produtos o biofertilizante e o biogás;
- 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.

O campo tecnológico do biogás hoje faz parte de um promissor Sistema de Inovação (SI), mesmo sendo explorado há várias décadas para uso doméstico (e.g., cocção e iluminação) em nações em desenvolvimento como China e Índia (BOND; TEMPLETON, 2011), foram nas últimas décadas que a tecnologia passou de apenas doméstica para níveis industriais (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009; GAVA *et al.*, 2017; RAVEN; GEELS, 2010). Um SI é visualizado por meio de uma lente teórica (*framework*) utilizada para estudar o processo de mudança tecnológica, focando em marcos institucionais que impulsionem a adoção de inovações, ainda, este processo é complexo, não linear, envolve diversas organizações e instituições que possuem como objetivo desenvolver e difundir inovações (URIONA MALDONADO; GROBBELAAR, 2019). Um SI é um sistema sociotécnico e ainda, no âmbito deste estudo, busca promover uma integração entre ambiente e tecnologia de forma mais sustentável, parte de uma necessária descarbonização do setor de energia (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). A complexidade de explorar este gás decorre primeiro de um processo interno de aprendizado (curva de aprendizado do setor em si) e o desenvolvimento externo (demanda, incentivos e entre outros), dois processos que tendem a evoluir de forma não linear (GEELS; DEUTEN, 2006).

O biogás tem ganhado espaço na agenda energética de diversos países, principalmente em nações com elevado desenvolvimento econômico e social, principalmente no contexto Europeu (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). Em países desenvolvidos como Alemanha (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016; HORSCHIG; ADAMS *et al.*, 2018) e Suécia (FALLDE; EKLUND, 2015), o biogás já faz parte essencial da matriz, sendo utilizado tanto para geração de eletricidade, como um substituto renovável do Gás Natural (GN) na forma de biometano. Vale ressaltar que existem questões mais complexas gerando este incentivo, algumas abrangentes como a diretiva europeia para extinção de aterros, outras mais locais como incentivos para o processamento de rejeitos agrícolas.

1.1 PROBLEMÁTICA DE PESQUISA

A partir de uma perspectiva holística existe uma recente necessidade de explorar as energias renováveis, isto decorre de problemas globais ambientais e econômicos. A evidência disso pode ser constatada com a entrada em vigor do Acordo de Paris em 2016. O acordo foi assinado por 195 países e estabeleceu a necessidade de todos os signatários definirem objetivos em termos de reduções de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). No final de 2018 os objetivos foram ratificados na Polônia durante a Conferência das Partes (COP) 24, como por exemplo, a meta de limitar o aquecimento em 1,5°C até o final do século, além de estipular a necessidade de um auxílio de 100 bilhões de dólares aos países mais pobres para o cumprimento das metas globais de curto prazo.

Em recente relatório sobre o planeta Terra, publicado pelo Plataforma Intergovernamental Político-Científica sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES) e com base na revisão de mais de 15 mil pesquisas científicas e fontes governamentais, foi apontado que desde 1980 as emissões de gás carbônico dobraram, levando a um aumento das temperaturas do mundo em pelo menos 0,7°C (IPBES, 2019). O relatório ainda complementa indicando que do número aproximado de cerca de oito milhões de espécies de animais e plantas existentes na Terra, próximo de um milhão de espécies estão agora ameaçadas de extinção. Não obstante, a geração de resíduos deve dobrar nos próximos 20 anos, e além disso os países em desenvolvimento serão mais impactados negativamente por não terem acesso às tecnologias já instituídas nos países desenvolvidos para tratar essas questões (THE WORLD BANK, 2018).

Em suma, as metas para conservar e utilizar os recursos naturais de forma sustentável não podem ser alcançadas pelas trajetórias atuais. As metas já para 2030 só poderão ser alcançadas por meio de mudanças transformativas em fatores econômicos, sociais, políticos e tecnológicos (IPBES, 2019). A mitigação eficaz das alterações climáticas exigirá transformações de grande alcance em diversos setores como eletricidade, calor, agricultura, transporte e entre outros (GEELS; SOVACOOOL *et al.*, 2017). Os quais requerem uma melhor integração, não somente com o ambiente, mas também entre eles de forma que possam co-evoluir em estruturas mais fortes e duradouras.

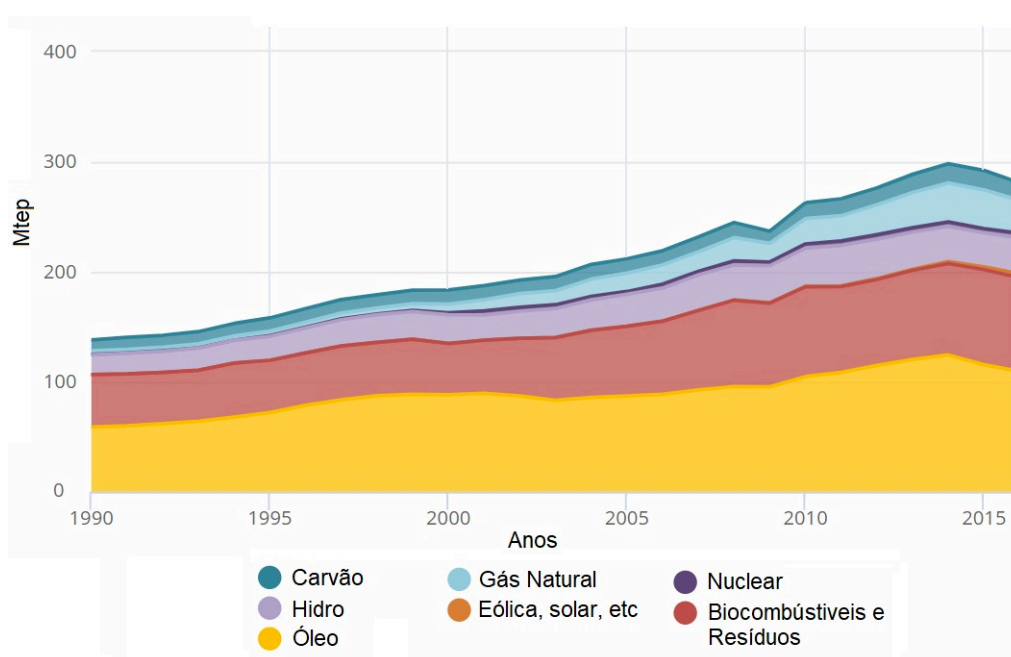
Centralizando o contexto da problemática para o Brasil, tem-se um país de proporções continentais (8,5 milhões de quilômetros quadrados), com extensa população (210 milhões de habitantes) e biodiversidade (cerca de 20% do total de espécies da Terra) e considerado em desenvolvimento, com base em seus níveis de crescimento econômico e desenvolvimento social. Com isso o Brasil é também um grande gerador de resíduos orgânicos e GEE¹. As emissões do Brasil representam cerca de 2% das emissões antrópicas de GEE, fazendo do país o sétimo maior emissor do mundo. Se-

¹ Ministério do Meio Ambiente - Biodiversidade Brasileira

gundo o Sistema de Estimativa de Emissão de GEE, as emissões do Brasil em 2005 atingiram 3,15 bilhões de Toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂-eq) e hoje atingem aproximadamente 2,4 tCO₂-eq. O desmatamento é responsável por quase metade deste montante (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018).

Além dos problemas referentes as emissões, o contexto econômico do país também pode afetar os problema destacados. Segundo o Plano Decenal de Energia (PDE) de 2018, nos últimos anos o país enfrentou um retrocesso em termos de produtividade e consumo, mas esperava-se um crescimento no Produto Interno Bruto (PIB) para os anos vindouros, no entanto a situação de Pandemia declarada pela Organização Mundial da Saúde, altera as previsões de crescimento para níveis negativos. Ainda o documento aponta que a Produção de Energia Primária alcançou 260 Milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) em 2017, com projeção para atingir 325Mtep em 2027, considerando ainda um ganho de eficiência na ordem de 19Mtep. Como característica atualmente a matriz do país é fortemente relacionada com duas fontes, o petróleo (38%) e os biocombustíveis (30%), depois em menor escala com a hidráulica (11%) e o gás natural (10%), como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Evolução da Oferta Interna de Energia do Brasil



Fonte: IEA, 2018

Com relação a demanda de energia elétrica o Brasil também enfrenta problemas, inicialmente o consumo deve aumentar de 624TWh, em 2017, para 889TWh em 2027 e ainda deve ultrapassar os 1.600TWh em 2050 (EPE, 2018, 2016). Porém, mais importante, o país é caracterizado por apresentar um extenso potencial hídrico, que em 2016 representou cerca de 65% da oferta, aproximadamente 407TWh. Embora esta

característica da matriz renda bastante energia com poucas emissões, ela é vulnerável a índices pluviométricos, que quando baixos implicam na entrada de usinas térmicas, por exemplo movidas a GN. Com relação ao GN, o relatório aponta que o Brasil importa 36% da sua demanda, cerca de 30 Milhões de metros cúbicos por dia (Mm³/d) são importados. Existe uma outra questão referente ao GN, mais especificamente, ao crescimento esperado de sua oferta oriunda da exploração do pré-sal, que se reflete em uma agenda governamental para o aumento do consumo de gás. Este fator pode ser importante para o crescimento do mercado de biogás, agindo como um desbravador de novas demandas.

Outro problema que o Brasil enfrenta refere-se ao mercado de fertilizantes, no ano de 2018 dos 35 milhões de toneladas consumidos, apenas 8 milhões provieram da indústria nacional (ANDA, 2019). Neste aspecto o biofertilizante resultante da produção de biogás em biodigestores é uma alternativa interessantes para redução dessas dependências. Na teoria é algo importante, mas na prática passa a ser um gargalo para a produção de biogás, pois não existe estrutura para receber o biofertilizante, além disso a qualidade oscila, o balanço de nutrientes varia e o mercado consumidor geralmente não está próximo da oferta.

Sobre o contexto socioeconômico, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população deve alcançar 233 milhões de habitantes em 2046 antes de começar a decair, o que justifica parte do crescimento da demanda energética, bem como do volume de resíduos gerados. Neste contexto, o problema dos resíduos é ainda mais evidente, pois o Brasil mesmo tendo instaurado em 2011 uma Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ainda apresenta grandes problemas com relação a destinação e separação de resíduos sólidos urbanos, resíduos da agricultura e de tratamento de efluentes, além de outros como a logística reversa pós-uso e pós-consumo de produtos manufaturados.

Considerando as características da sua população, produção de alimentos, combustíveis, pecuária e diversos processos de produção que eliminam substratos uteis para produção de biogás o Brasil ainda se encontra longe de ser um ator reconhecido pelo comprometimento com o desenvolvimento do setor de biogás (MILANEZ *et al.*, 2017; MARIANI, 2018).

Algumas barreiras locais podem ser destacadas para o desenvolvimento do biogás no Brasil, como por exemplo, o pouco conhecimento técnico sobre a fonte, a necessidade de aumentar a competitividade da fonte para validar economicamente projetos de menor escala, a falta de conhecimento de instituições financiadoras para lidar com projetos de biogás, a falta de infraestrutura e tecnologia (e.g., redes de gasoduto, lixões abertos), a necessidade de sistematização de banco de dados, necessidade de compreensão do potencial do país e entre outros (DURÃO, 2017). Outra barreira importantíssima diz respeito aos subsídios que o país aplica a combustíveis fósseis e

a prioridade em escoar a produção de gás natural, estimada para quase duplicar nos próximos dez anos. A análise destas barreiras mostra que além de fatores técnicos, o país precisa fortalecer e criar novas conexões entre as instituições que regulam e operam os sistemas sociotécnicos vigentes (DESCLAUX, 2019).

Uma das contribuições mais importantes do biogás é exatamente de requerer a atenção de vários setores e sistemas para que ajam em conjunto para promover o desenvolvimento esperado (e.g., setor de resíduos cooperando com o transporte público, produzindo biogás para descarbonização das cidades) (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016). Então, um SI do biogás bem desenvolvido (e.g., com fortes interdependências entre o SI e o contexto, tecnologias bem desenvolvidas com projetos dominantes), pode além de resolver problemas pontuais ambientais, gerar emprego e renda para os setores envolvidos. O fato de ser uma fonte descentralizada e não intermitente, permite que seja flexível e estocável. Investir neste segmento significa energia disponível no longo prazo, independência energética e em muitos casos, mas nem todos, desenvolvimento sustentável da matriz energética (CAVICCHI, 2016).

A produção de biogás é uma inovação que fundamenta a interação entre diversos setores, que também apresenta um mecanismo de reconfiguração entre e em cada um deles. O que significa que com os incentivos corretos, ela pode se integrar no regime atual sem causar disrupturas ou grandes mudanças nos setores (e.g., o transporte público movido a biometano, ainda utiliza da tecnologia de motores a combustão) (GEELS; SCHOT, 2007; DURÃO, 2017). No entanto, estes setores são resistentes a mudanças, pois desenvolvem redes e relações de interdependência com compradores, fornecedores, bancos e outros atores com os quais se relacionam, criando rotinas difíceis de serem rompidas. Setores industriais criam organizações específicas para realizar lóbi e manter o sistema como ele é, se este os trazem vantagens (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012).

O Sistema Tecnológico de Inovação Brasileiro do Biogás (STIBB) já demonstra que a difusão da tecnologia de produção de biogás proporcionou um aumento expressivo no interesse e em investimentos nacionais no setor de biogás, especialmente, depois de 2012 quando uma nova era para o biogás se instaurou no país, a partir de algumas leis estaduais sobre o biogás e agências reguladoras que reconheceram o biogás como energia renovável (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019). No entanto, o seu desenvolvimento ainda é lento, por vezes desconhecido, e difícil de ser mensurado, estes são os problemas do sistema, diante do contexto apresentado, este sistema precisa ser desenvolvido de forma célere e mais previsível. Frente esta necessidade, os setores da economia precisam reconhecer o papel do biogás na transição para sustentabilidade nos setores de energia e agricultura.

Em complemento, pesquisas iniciais indicaram que a literatura está dispersa em destacar um agrupamento de fatores que influenciam cada setor da economia em

promover um SI para o biogás. Embora as barreiras para o desenvolvimento do biogás já foram agrupadas (veja (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019)). Recomendações mais práticas para cada setor, podem auxiliar tomadores de decisão a compreender a necessidade de integração inter-setorial que o biogás necessita para ser mais presente na matriz energética. A percepção dos agentes envolvidos é crítica para a formação de uma identidade para o SI, assim como suas perspectivas para o futuro deste SI.

1.2 OBJETIVOS

A questão que este trabalho busca responder é: Como o biogás pode contribuir para a matriz energética do Brasil nas próximas décadas?

Para buscar uma resposta para a questão de pesquisa, outras três foram formuladas para fundamentar a resposta da primeira, são elas: Como o biogás tem contribuído para diferentes setores econômicos ao redor do mundo? Qual o estado de penetração e oportunidades para o biogás entre os principais setores econômicos? Qual o estado de desenvolvimento destes setores no Brasil para permitir uma reconfiguração que inclua esta fonte de energia renovável?

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a contribuição do biogás na matriz energética Brasileira nas próximas décadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Levantar na literatura internacional como o biogás cria relevância entre os principais setores econômicos com que ele interage.

Levantar na literatura nacional a situação dos setores econômicos com que o biogás interage.

Avaliar o estado atual do setor de biogás, por meio de análise funcional;

Avaliar o desenvolvimento futuro do setor de biogás, por meio de simulação.

1.3 JUSTIFICATIVA

A importância deste tema pode ser destacada pelo plano do governo brasileiro publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), sobre o plano de ciência tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis 2018 - 2022, há um trecho específico para o biogás (MCTIC, 2018). Neste plano, o biogás e o biometano são apresentados como combustíveis renováveis, produzidos pelo processo de digestão anaeróbica de materiais orgânicos, podendo ser empregado no tratamento de diversos tipos de substratos. Estes substratos possuem grande

potencial econômico, ambiental e social, e podem contribuir para a sustentabilidade (i.e., preservação de recursos naturais) e eficiência energética de importantes setores econômicos, dentre os quais se destacam os setores sucroenergético, alimentício e de saneamento. O plano considera estratégico desenvolver ações de forma a contribuir para superar os seguintes desafios tecnológicos identificados na temática de biogás e biometano:

- Desenvolver tecnologias mais eficientes para a produção e o uso do biogás e biometano em pequena, média e grande escala;
- Contribuir para a inserção do biometano na matriz energética nacional;
- Difundir o conhecimento acerca das matérias-primas existentes para a produção de biogás e biometano e capacitar recursos humanos para atender à demanda futura de empreendimentos;
- Desenvolver metodologias analíticas para certificação de biometano que possam facilitar a inserção de pequenos produtores no mercado;
- Desenvolver novos usos do biogás e do biometano em aplicações industriais e nos transportes, incluindo a produção de hidrogênio e gás de síntese.

Assim, considera-se que avaliar a contribuição do biogás na matriz energética é de importância estratégica para o Brasil, considerando principalmente o problema de reduzir emissões de GEE e o volume de resíduos descartados no país, ao mesmo tempo em que há um aumento na demanda energética. O biogás é uma solução importante na construção de um cenário de baixo carbono, sendo um ótimo complemento para as outras energias renováveis, que são essencialmente intermitentes e diferentes do biogás, que pode ser produzido de forma contínua (ANGELIDAKI *et al.*, 2018). Além disso, o biogás apresenta um grande potencial ainda inexplorado, especialmente no caso do Brasil, devido a sua extensa população, agricultura e consequente produção de resíduos, algo destacado em diversos estudos (FERREIRA *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2018; ZANETTE, 2009; ABIOGÁS, 2018; SANTOS *et al.*, 2018).

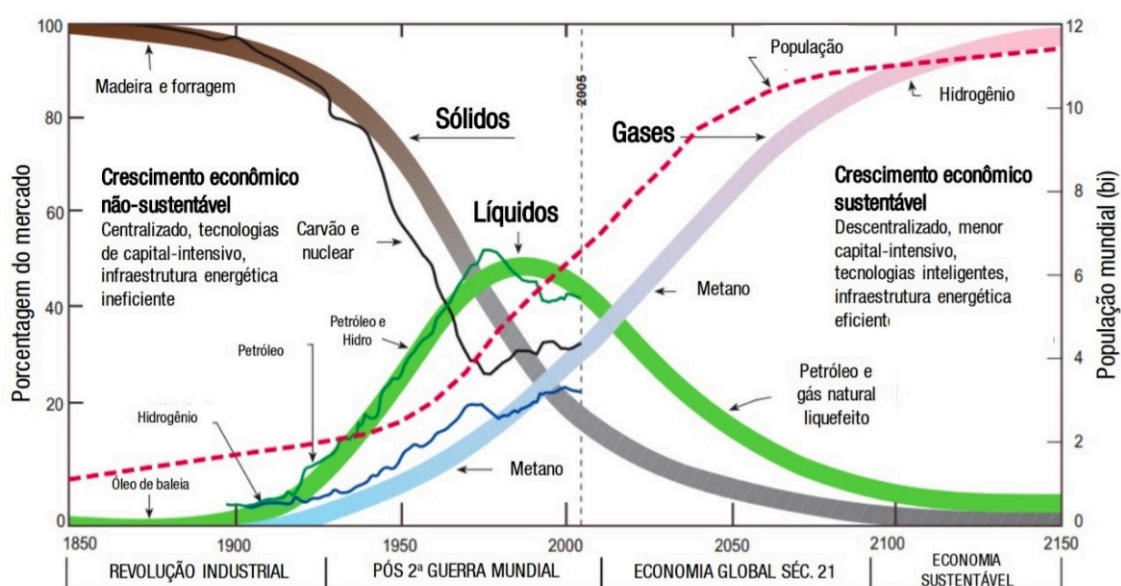
Uma parte da justificativa pode ser trazida do cenário global, para por exemplo comparar o desenvolvimento do biogás com outras energias renováveis. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2017) em 2015 a oferta total de energia alcançou 13.647 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). Deste montante, provieram de energias renováveis 13,4% (1.823Mtep), da bioenergia 9,4% (1.282Mtep) e do biogás apenas 0,16% (22Mtep). Mesmo com um número pouco expressivo o biogás é a terceira fonte que mais cresceu no período de 1990 até 2015, apresentando crescimento médio de 12,8% por ano (p.a.), ficando abaixo apenas da energia solar fotovoltaica (45,5% p.a.) e da energia eólica (24% p.a.). Em contraste ao aproveitamento,

o potencial a partir de estimativas da WBA apontam que o biogás poderia cobrir cerca de 6% (818Mtep) da oferta global de energia primária WBA (2019) .

Ao observar especificamente o balanço energético nacional do Brasil de 2018 o biogás aparece com uma contribuição de apenas 206 mil tep, do total de 288 milhões de tep, com crescimento de 2017-2018 de 6%. Em outras palavras, o crescimento é lento, quando comparado a média global do período 1990-2015 (12,8%). Ainda que o país apresente uma excelente participação de renováveis (43% do total), o biogás aparece como incipiente em uma desejada transição para sustentabilidade do setor energético.

Uma revisão que sustenta a transição energética abordada deste trabalho indica que uma nova Era dos Gases, como mostra a Figura 2, determinará que a humanidade deixe para trás 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 altamente eficiente no aproveitamento energético. Inicialmente reduzindo o consumo de combustíveis mais agressivos ao meio ambiente e aumentando o consumo de gás natural. Posteriormente, haverá um grande aumento dos gases renováveis, do biogás ao gás sintético, passando para o biometano, quando finalmente a transição deve se estabilizar com o alto uso de hidrogênio (HEFNER, 2002; KINNON; BROUWER; SAMUELSEN, 2018)

Figura 2 – Transição para Era dos Gases



Fonte: Hefner (2002)

O Brasil mesmo como um dos líderes em energias renováveis, tem contribuído pouquíssimo para uma transição para era dos gases, menos ainda para uma transição

para os gases renováveis como é o caso do biogás. Portanto a produção de biogás requer análises prospectivas que auxiliem formadores de políticas a considerar as diversas externalidades positivas, com o objetivo de auxiliar sobre os ganhos energéticos, de redução de emissões e sobre os efeitos do acúmulo de experiência em um setor pouco explorado e com grande potencial (MARIANI, 2018).

Este tema de pesquisa é oportuno devido ao aproveitamento energético do biogás ser imprescindível para o desenvolvimento, tendo em vista a necessária redução das emissões de GEE nos setores de energia, agricultura, transporte e resíduos (HEFNER, 2002; BLEY JR., 2015). Além disso, as trajetórias atuais implementadas para expansão da produção de energia (e.g., subsidiando energia fóssil) e para a disposição de resíduos (e.g., sem aproveitamento energético), não consideram as externalidades negativas consequentes da sua implantação (e.g., dependência de trajetória). O biogás pode trazer ao Brasil um potencial sustentável de acesso a energia que pode ser de forma teórica igualado a capacidade de produção de GN do pré-sal (ABIOGÁS, 2018).

Salientando a oportunidade, no contexto internacional a produção de biogás já avançou em diversas frentes como, na melhoria dos processos de tratamento de resíduos sólidos e esgotos, no desenvolvimento de processos para digestão anaeróbica, na produção de calor e energia, na purificação do produto para compatibilizá-lo com as utilizações existentes de gás natural (biometano) e na extração de químicos, um dos motivos deste avanço é o enfoque energético prevalecendo ao enfoque no processamento de resíduos (MILANEZ *et al.*, 2017; ANGELIDAKI *et al.*, 2018). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) Se considerada a flexibilidade de uso e de armazenamento do biogás e o cenário delineado para geração distribuída, sua penetração no mercado de energia é extremamente promissora, especialmente após 2030, quando uma série de adaptações legais e conhecimentos técnicos estiverem sido efetivamente implementados (EPE, 2018).

Não obstante, a possibilidade de criação de fontes de suprimento descentralizadas e em pequena escala é tida como fundamental para o desenvolvimento sustentável, agora em um sentido mais amplo, o de garantir recursos finitos para gerações futuras (IEA, 2017). Mais especificamente, em setembro de 2015, os 193 países da Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) adotaram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Esta agenda conta com dezessete Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) e segundo a WBA o biogás auxilia no cumprimento de nove ² destes objetivos.

² Objetivo 2 - Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável;

Objetivo 3 - Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades;

Objetivo 5 - Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas;

Objetivo 6 - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos;

Objetivo 7 - Garantir energia limpa e acessível para todos;

Objetivo 9 - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este projeto está organizado em sete capítulos:

- O capítulo 1 trata da introdução, problemáticas e objetivos;
- O capítulo 2 apresenta o referencial teórico que adentra a lente dos SIs e melhor explica a lente dos Sistema Tecnológico de Inovação (STI);
- O capítulo 3 é dedicado a explicar o objeto de estudo, o Biogás, mas também adentra aspectos de sua influência nos setores da economia, assim como contextualiza a situação atual destes setores na região geográfica de estudo, o Brasil;
- O capítulo 4 detalha os procedimentos metodológicos, como a revisão estruturada de literatura, a análise funcional de um STI com base na opinião dos agente envolvidos e a análise prospectiva com Dinâmica de Sistemas;
- O capítulo 5 apresenta os resultados da análise funcional, onde consta os resultados da coleta de dados, uma análise descritiva e uma análise fatorial destes dados;
- O capítulo 6 apresenta os resultados da análise prospectiva, apresentando o modelo desenvolvido, com base na teoria da difusão de inovação e do modelo de curva logística de Frank Bass, o modelo busca incorporar os fatores encontrados na análise fatorial para formular e comparar cenários;
- O capítulo 7 apresenta a conclusão, as considerações finais e as recomendações de trabalhos futuros.

e fomentar a inovação;

Objetivo 11 - Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;

Objetivo 13 - Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos;

Objetivo 15 - Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo expõe a perspectiva teórica base para a construção e análise desta dissertação. Em síntese, uma seção decorre sobre as definições de um Sistema de Inovação, a teoria da inovação, seu papel no desenvolvimento econômico e na mudança tecnológica. A segunda seção que descreve efetivamente a lente teórica (*Frameworks*) para análise de transições em sistemas sociotécnicos, os Sistemas de Tecnológicos de Inovação (STI).

2.1 ABORDAGEM DOS SISTEMAS DE INOVAÇÃO

Segundo o Manual de Oslo uma inovação ¹ pode ser classificada de acordo com seu impacto na sociedade. Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), as inovações incrementais que gradualmente fortalecem o caminho tecnológico vigente e as inovações radicais, que causam mudanças transformativas em sistemas econômicos, por vezes alterando significativamente a forma com que as diversas funções sociais (e.g., habitação, trabalho, lazer, mobilidade, educação, saúde, segurança) são cumpridas (OCDE, 2018). Na literatura acadêmica explorada nesta seção, estas mudanças nas formas de cumprimento das funções sociais são definidas como transições sociotécnicas (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012).

A corrente teórica seguinte inicia na década de 80, quando buscou-se identificar e explicar as forças que movem tal progresso, 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, fazendo analogia com a biologia, de forma que as mudanças transformativas ou o progresso ocorrem como resultado de quatro processos evolucionários (NELSON; WINTER, 1982; DOSI *et al.*, 1988):

- **Variação:** se refere a expectativas, visões e padrões cognitivos em esforços deliberados e intencionais na busca por inovações.
- **Seleção:** ocorre devido ao contexto, que incorpora não apenas os mercados, mas também regulamentos, comportamento social, estruturas industriais, conhecimento e influências culturais;
- **Retenção:** fornece e reforça as regras para manter as soluções de trabalho, estabilizando trajetórias tecnológicas através, por exemplo, de rotinas cognitivas e heurísticas adotadas por engenheiros;

¹ Segundo o manual, uma inovação é um novo ou aprimorado, produto ou processo (ou uma combinação dos mesmos) que difere significativamente dos produtos ou processos anteriores, este ainda sendo disponibilizado para usuários em potencial (produto ou processo).

- Mutação: como um tipo de inova o fora do paradigma atual e sujeita a uma nova aptidão (lucratividade).

Com o desenvolvimento da teoria evolucionária foi formalizado também o conceito de paradigma tecnológico (DOSI, 1982). Paradigma   o que fundamenta a referência para o progresso, sendo composto por crenças, expectativas e conhecimentos que ilustram certas oportunidades, porém, simultaneamente impedem o desenvolvimento de alternativas viáveis, como um poder de exclusão (KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998). Ao considerar por exemplo como os engenheiros trabalham, o paradigma   uma visão do problema tecnológico associado as suas possíveis solu es. Ao identificar os problemas a serem resolvidos, o paradigma exerce influência na mudança tecnológica. Dessa forma, o padrão de atividade de resolu o de problemas e a dire o do progresso   a trajetória tecnológica (DOSI, 2006).

O progresso então   tido como uma consequência fundamental do avanço conjunto entre sociedade e tecnologia, sob a influência dos paradigmas tecnológicos que serviram de base para os sistemas sociotécnicos. Estes são os sistemas de interesse para esta teoria, pois possuem como objetivo o cumprimento das fun es sociais, como por exemplo transporte, comunica o, fornecimento de água, fornecimento de energia, entre outros, são nestes sistemas (GEELS, F., 2005). Transi es nestes sistemas não são algo comum,   natural para o sistema buscar a estabilidade, por isso são geralmente custosas e de longo prazo. Além disso, são complicadas de serem analisadas por dependerem do desenvolvimento em conjunto de novas configura es, estruturas de mercado, atores e institui es, além de depender de contextos espaciais e históricos (MARKARD; TRUFFER, 2008).

O progresso tecnológico então pode ser analisado pela lente dos SIs. Esta lente teórica considera que a mudança tecnológica   um processo não linear, complexo, dinâmico, interativo e multidirecional, formados pelas diversas intera es, entre atores, agentes públicos e privados que lidam com ciência, tecnologia e inova o, com o objetivo de promover o desenvolvimento e a difusão de inova es (URIONA MALDONADO; GROBBELAAR, 2019). A teoria reconhece estes objetivos como sendo ao mesmo tempo uma aço individual e coletiva (FREEMAN; SOETE, 1997; EDQUIST, 1997). Um SI pode ser definido como uma rede de agentes interagindo em um área econômica/industrial sob uma estrutura institucional e envolvidos na gera o, difusão e utiliza o de tecnologias (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991).

Em outras palavras, os sistemas de inova o são normalmente definido em termos institucionais. Em todas as defini es utilizadas, vários aspectos econômicos, sociais, e institui es políticas que influenciam a inova o são elementos centrais e não elementos que circundam a tecnologia. Institui es não podem ser definidas apenas por locais físicos ou organiza es como as de pesquisa e desenvolvimento, como institutos e universidades, bancos, sistemas de patentes, agências reguladoras, de

fato o conceito de instituição compreende algo mais amplo, como as regras moldando o progresso tecnológico. Ainda, organizações são estruturas formais com um propósito explícito e eles são criados conscientemente, são jogadores ou atores. (EDQUIST, 1997).

De forma pragmática o ponto central da lente dos SI, as instituições, são conjuntos de hábitos comuns, rotinas, práticas, regras ou leis estabelecidas que regulam as relações e interações entre indivíduos e grupos". Em contraste a tecnologia, esta é mais facilmente importada e assimilada do que instituições, portando quando um SI começa a se instaurar em outro país, a tecnologia precede as regras (EDQUIST, 1997).

A teoria dos SI utiliza da visão sistêmica sobre os processos de inovação, para buscar como facilitar ou promover transições em sistemas complexos. Três perspectivas são incluídas nesta definição: a visão sistêmica, como uma forma de observar o mundo em termos de conexões e padrões com o intuito de entender como o comportamento de um sistema emerge; os processos de inovação, que correspondem ao desenvolvimento e a difusão de tecnologias; e a teoria dos sistemas complexos, que correspondem a sistemas compostos por várias partes interdependentes e relativamente autônomas (MEADOWS, 2008).

Um dos princípios mais importantes da teoria dos SI é conceituar um sistema como um conjunto de elementos interconectados de forma que eles produzem o próprio padrão de comportamento ao longo do tempo. Então, o sistema pode ser polido, restrito, acionado ou dirigido por forças externas, mas a resposta a essas forças é característica do próprio sistema. Ainda, essa resposta raramente é simples no mundo real, pois o sistema é mais que simplesmente a soma de suas partes (MEADOWS, 2008).

A base do pensamento sistêmico por trás desta teoria é, portanto, ver totalidades: investigando sistemas inteiros dentro de um limite, entendendo seus componentes, funções, e interconexões (SENGE, 2018). Estes sistemas são constituídos de estruturas, tais como laços de reforço e balanceamento, auto-organização e hierarquias (MEADOWS, 2008).

- Laços são cadeias de conexões causais que podem ser fontes de estabilidade e instabilidade, assim como de continuidade e descontinuidade ou resistência à mudança. Laços positivos tendem a reforçar ou ampliar o que está acontecendo no sistema. Laços negativos neutralizam e se opõem esta ampliação com o intuito de balancear o sistema;
- Auto-organização descreve a capacidade de sistemas de se estruturar para aprender, diversificar, e tornar-se mais complexo ao longo do tempo. Contudo, a auto-organização também tende a criar resiliência para mudanças radicais, pois os sistemas tendem a manter coerência em suas funções.

- Hierarquia refere-se aos arranjos entre sistemas, subsistemas e seus componentes. A troca ou *trade-off* entre autonomia e coordenação em sistemas hierárquicos é complicada, potencialmente restringindo ou fomentando subsistemas específicos.

A teoria dos SI foi formulada em meados dos anos 80 e a partir daí ganhou diversos focos para reduzir o escopo dos complexos níveis de análise, como foco nacional (DOSI *et al.*, 1988; FREEMAN, 1993; LUNDVALL, 1992), regional (COOKE; URANGA; ETXEBARRIA, 1997), setorial (MALERBA, 2002) e até mesmo em nível global (BINZ; TRUFFER, 2017). Além destas divisões geográficas, o foco pode ser um campo tecnológico específico, através da lente dos Sistemas Tecnológicos de Inovação (STI) (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991; WIECZOREK; HEKKERT, 2012). Ainda existem outras lentes para análise da mudança tecnológica.

2.2 ALENTE TEÓRICA DOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS DE INOVAÇÃO

Estes sistemas são constituídos de atores, instituições, conexões e tecnologias agindo com o objetivo de difundir uma tecnologia específica. A lente teórica dos STI é particularmente útil por apresentar também um conjunto de ferramentas que auxiliam o analista a propor questões políticas mais praticáveis e assertivas (BERGEK *et al.*, 2008). As características centrais dos STIs são a competência econômica (a capacidade de desenvolver e explorar novas oportunidades de negócios), o agrupamento de recursos e a infraestrutura institucional, sendo definidos em termos de fluxos de conhecimento/competência, em vez de fluxos de bens e serviços comuns (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991).

Além disso, os STIs podem ser combinados com as outras lentes, de forma que um campo tecnológico pode ser estudado sob os diferentes focos, seja ele nacional, regional ou setorial. Porém, são as diferenças e características de contextos mais amplos, como por exemplo entre um país desenvolvido e um em desenvolvimento, que dificultam generalizar a aplicação da ferramenta (EDSAND, 2019).

Esta corrente destaca o papel da inovação tecnológica, como principal determinante dos saltos de produtividade que vêm caracterizando o desenvolvimento do sistema econômico, e atribuem à ação das empresas privadas, em sua busca por lucros, a função de principal agente propulsor das inovações (DOSI, 2006).

A análise de um STI possibilita identificar obstáculos sistêmicos que possam dificultar o desenvolvimento e difusão de algum tipo de inovação (NEGRO; ALKEMADE; HEKKERT, 2012). Esta análise abrange as atividades que contribuem para o desenvolvimento, aplicação e disseminação de novos conhecimentos tecnológicos em um SI, também conhecidas como "funções dos sistemas de inovação" (BERGEK *et al.*, 2008).

A lente teórica dos STI 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 Multi-Níveis (do inglês, *(Multi-Level Perspective (MLP))*) (EDSAND, 2019).

Um STI pode ser acessado ou comparado utilizando da análise funcional, a relação das funções que eles cumprem podem ser acessadas para derivar recomendações políticas, por exemplo apoiar o desenvolvimento de uma tecnologia específica (BERGEK *et al.*, 2008; NEGRO; HEKKERT, 2008; MARKARD; TRUFFER, 2008). A ferramenta serve para descrever a situação atual e o desempenho de STIs, que se referem ao desenvolvimento e a difusão de uma tecnologia específica. Esta ferramenta envolve o mapeamento das determinantes da inovação, conhecidas como funções, e possibilita a análise sistemática do STI. Através desta análise, são identificados os componentes estruturais que formam o sistema e avaliados os desempenhos das funções, e de suas relações de interdependência, para o desenvolvimento da tecnologia (HEKKERT *et al.*, 2007; BERGEK *et al.*, 2008).

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 (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014; MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012).

Vale ressaltar que a lente das funções não é a única para derivar recomendações para um SI. Há também por exemplo, segundo Wieczorek e Hekkert (2012) o modelo de instrumentos sistêmicos de políticas (do inglês, *policy systemic instruments*), trata de ferramentas que focam no nível do SI, em vez de se concentrar em partes específicas e processos de suporte que desempenham um papéis cruciais na gestão de processos de inovação. Em síntese a ideia básica por trás destes instrumentos sistêmicos é que eles visam resolver problemas que surgem no nível do SI e que influenciam negativamente a velocidade e direção dos processos de inovação. A presença destas falhas do sistema são frequentemente consideradas uma nova lógica política, substituindo a falha de mercado. Os autores ainda argumentam que a partir da combinação de abordagens para estudar um SI - as análises estruturais e funcionais - podem ser combinados e fornecer análises de uma estrutura política sistêmica que ajuda a identificar problemas sistêmicos e sugerir instrumentos sistêmicos para enfrentar os obstáculos identificado.

2.2.1 Funções de um STI

A terminologia funcional a ser utilizada neste trabalho segue especificamente a proposta por Hekkert *et al.* (2007), e baseia-se nas sete seguintes funções:

- Função 1 - Atividades empreendedoras

O papel do empreendedor é transformar o potencial do desenvolvimento de novos conhecimentos, redes e mercados em ações concretas para gerar e aproveitar as oportunidades de negócios. Um STI evolui sob consideráveis incertezas em termos de tecnologias, aplicações e mercados. Do ponto de vista social, a principal força para reduzir a incerteza é a experimentação empreendedora. Esta experimentação gera um processo de aprendizagem social sobre a tecnologia e implica uma pesquisa de novas tecnologias e aplicações onde os empresários inerentemente falham ou obtêm sucesso (BERGEK *et al.*, 2008; KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998)

O papel dos empreendedores portanto é transformar o potencial de desenvolver novos conhecimentos, redes e mercados em ações concretas para gerar e aproveitar as oportunidades de negócios. Os empreendedores podem ser tanto novos participantes que observam uma oportunidade de negócios em novos mercados, quanto empresas estabelecidas que desejam diversificar suas estratégias de negócios para tirar proveito de desenvolvimentos tecnológicos recentes (HEKKERT *et al.*, 2007).

- Função 2 - Desenvolvimento de conhecimento

O recurso mais fundamental na economia moderna é o conhecimento. Portanto, o processo mais importante é aprender. O desenvolvimento de conhecimento envolve os vários tipos de aprendizagem possíveis, que incluem "aprender pesquisando", "aprender fazendo", "aprender usando" e "aprender interagindo". Esta função considera que a base de conhecimento global do STI evolui em relação ao STI local em termos de conhecimento (BERGEK *et al.*, 2008). A aprendizagem gerada também é responsável por aumentar o desempenho da tecnologia, através de curvas de aprendizado (ARGOTE; EPPLE, 1990).

- Função 3 - Difusão de conhecimento através de redes

Esta função abrange como o conhecimento é difundido e combinado no sistema. A difusão do conhecimento é essencial entre as redes que envolvem o STI (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991) e deve se estender em um sentido amplo, onde as atividades de pesquisa e desenvolvimento devem servir ao governo, aos competidores e ao mercado (HEKKERT *et al.*, 2007).

Desta forma, as decisões políticas (padrões e metas de longo prazo) devem ser consistentes com alinhamentos e descobertas recentes sobre a tecnologia, enquanto

as mudanças nos padrões e valores afetam o planejamento de pesquisa e desenvolvimento. Assim, a atividade de rede gerada por esta função pode ser considerada como uma condição prévia para aprender interagindo. Quando se trata de redes de produtores de tecnologia, também pode ser considerada uma condição prévia para aprender usando (HEKKERT *et al.*, 2007).

- Função 4 - Orientação de pesquisa

A orientação da pesquisa refere-se às atividades dentro do sistema de inovação que podem afetar positivamente a visibilidade, desejos e compreensão dos usuários da tecnologia (HEKKERT *et al.*, 2007). Esta função representa a combinação de incentivos e pressões, que devem ser suficientes para induzir as organizações a entrarem no STI. Além disso, esta função engloba mecanismos que influenciam a direção da pesquisa dentro do STI em termos de tecnologias concorrentes, aplicações, mercados, expectativas, etc (BERGEK *et al.*, 2008).

Enquanto a função 1 é responsável pela criação de variedade tecnológica, esta função representa o processo de seleção. Ao mesmo tempo, enquanto as funções 1 e 2 referem-se a mecanismos de aprendizagem, sem discutir a direção do processo de aprendizagem, a orientação de pesquisa indica que a mudança tecnológica não é autônoma (HEKKERT *et al.*, 2007)

- Função 5 - Formação de mercado

Para um STI emergente ou em processo de transformação, os mercados podem não existir, os clientes potenciais podem não ter articulado sua demanda ou não conseguirem fazê-lo, a relação preço/desempenho da nova tecnologia pode ser inibitiva e as incertezas podem prevalecer em muitas dimensões (BERGEK *et al.*, 2008)

Além disso, novas tecnologias muitas vezes têm dificuldade em competir com tecnologias tradicionais. Consequentemente, é importante criar espaços protegidos, entre os quais uma possibilidade relevante é a formação de mercados de nicho temporários para aplicações específicas da tecnologia (KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998). A formação de mercados, temporários ou não, possibilita o aprendizado sobre a nova tecnologia (funções 1 e 2) e o desenvolvimento de expectativas (função 4) (HEKKERT *et al.*, 2007).

- Função 6 - Mobilização de recursos

À medida que um STI evolui, é necessário mobilizar uma série de recursos, abrangendo tanto recursos financeiros quanto humanos, para possibilitar o desenvolvimento das atividades necessárias (HEKKERT *et al.*, 2007). Esta função evolui à medida em que um STI é capaz de mobilizar competência/capital humano através da

educação em domínios científicos e tecnológicos específicos, bem como no empreendedorismo, gestão e finanças, capital financeiro e outros recursos como produtos complementares, serviços, infra-estrutura de rede, etc. (BERGEK *et al.*, 2008).

- Função 7 - Criação de legitimidade/combater a resistência à mudança

A legitimidade pode ser conceitualizada como o alinhamento (ou desalinhamento) percebido entre entidades e conjuntos socialmente construídos de normas, valores, crenças e práticas em seu contexto (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016). Para se desenvolver bem, uma nova tecnologia deve tornar-se parte de um esquema estabelecido, ou então suprimi-lo. Muitas vezes, atores com interesses diferentes se opõem a essa força de destruição criativa (HEKKERT *et al.*, 2007). Neste caso, coalizões de defesa podem atuar como um catalisador: chamam a atenção para a tecnologia (função 3) e para a disponibilização de recursos e regimes fiscais favoráveis (função 5), criando legitimidade para uma nova trajetória tecnológica. Se bem sucedidas, as coalizões de defesa crescem em tamanho e influência, podendo induzir ao espírito de destruição criativa (HEKKERT *et al.*, 2007).

Outra observação sobre a legitimidade é que ela se apresenta em três tipos: legitimidade cognitiva, refere-se ao grau em que uma entidade é conhecida, compreendida e dada como certa. A legitimidade normativa, diz respeito à conformidade com valores sociais e crenças amplamente compartilhadas, enquanto a legitimidade reguladora (ou sociopolítica) está associada ao cumprimento de regras, leis e regulamentos. Portanto a legitimidade da tecnologia é vista como resultado da ação coletiva e como resultado de efeitos de *feedback* sistêmico no sentido de círculos virtuosos (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016).

Estas sete funções descritas até aqui podem ser mensuradas a partir de algumas atividades, como ilustra a Tabela 3. Na concepção desta tabela a biomassa foi utilizada como tecnologia referência para ser analisada (TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015). Portanto a tabela é consultada para desenvolver a análise do sistema de inovação do biogás neste trabalho.

A análise funcional de um STI foi concebida tendo como foco em países considerados desenvolvidos, como Alemanha, Holanda e Suécia, deixando uma brecha referente a análise de países em desenvolvimento (EDSAND, 2019). Principalmente no que se refere a conexão entre eles, devido a muitos recursos relacionados a inovação passarem dos desenvolvidos para os outros. O autor então propõe uma subdivisão para algumas funções que servem para ajuste focal da lente dos STIs.

- Função 2b - Absorção de conhecimento

A capacidade de absorção de um país é a sua capacidade de aprender e implementar as tecnologias e práticas de países que já possuem a tecnologia desenvolvida

Tabela 3 – Atividades indicadoras das funções de um STI

Função	Atividades indicadoras
F1	Fabricação e/ou instalação de tecnologia Entrada de firmas ou empresas
F2	Realização de pesquisas de mercado/viabilidade Desenvolvimento de materiais de promoção Desenvolvimento de novos protótipos Testes de performance de modelos Desenvolvimento de tecnologias complementares Acesso a tendências de combustíveis Acesso das tendências da biomassa Acesso de matérias primas para tecnologia Conduzir estudos de impacto
F3	Treinamentos para técnicos e usuários Condução de campanhas de sensibilização Organização de eventos, seminários e conferências Demonstrações e exposições da tecnologia
F4	Definição de metas Desenvolvimento de regulações e políticas Definir expectativas Providenciar premiações Publicar resultados de pesquisas
F5	Subsídios (dividindo os custos de investimento) Padronizações Incentivos em forma de redução de impostos Reforma de regulamentações Procurações públicas
F6	Providenciar incentivos financeiros (financiamento) Providenciar empréstimos (crédito) Mobilizar recursos humanos, consultores e técnicos Providenciar melhores equipamentos
F7	Conduzir atividades de lóbi

Fonte: Tigabu, Berkhout e Beukering (2015)

e cooperam para sua transferência. Portanto, um indicador melhor do que as atividades de pesquisa e desenvolvimento, para avaliar a capacidade de absorção dos países na extremidade receptora de uma transferência de tecnologia é o seu nível de ensino técnico e superior. Não obstante, este conhecimento é utilizado para domesticar as tecnologias, fazendo adaptações aos níveis locais (EDSAND, 2019).

- Função 6b - Mobilização de recursos internacionais

Esta função separa a mobilização de recursos em governamentais e internacionais. Visto que a maioria dos países em desenvolvimento recebe doações e empréstimos para assistência técnica (por exemplo, para capacitação de recursos humanos) e financiamento de projetos para energias renováveis, além de outros esforços de mitigação, por parte de organizações bilaterais e multilaterais (EDSAND, 2019).

- Função 7b - Criação de legitimidade informal

As indústrias e associações formais podem utilizar sua força financeira existente para formar divisões especializadas responsáveis por fazer lóbi em seu nome. No entanto, o lóbi também pode ocorrer a partir de grupos de pessoas que não possuem uma organização inicial, solidez financeira ou influência econômica e política. Essa forma de lóbi pode envolver indivíduos engajados e grupos de pesquisa ambientais ou universitários menores, por exemplo defendendo tecnologias limpas. Acessar a opinião pública por medias sociais são um exemplo de como mensurar este efeito, se o país em questão possuir extensa conectividade (EDSAND, 2019).

2.2.2 Fases de desenvolvimento de um STI

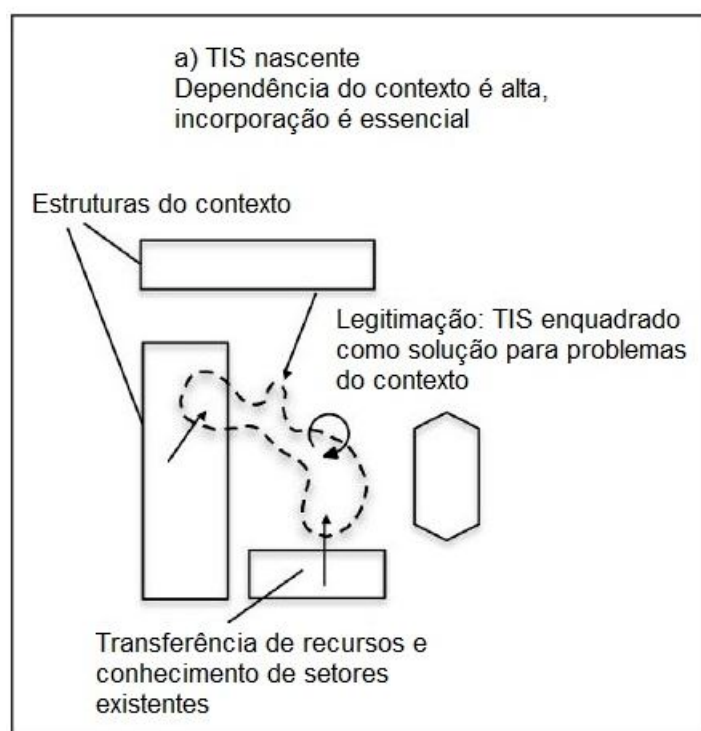
Embora os STIs busquem o desenvolvimento e a permanência da tecnologia em questão, é natural que possuam um ciclo de vida. O cumprimento das funções apresentadas pode ser espelhado em quatro fases de desenvolvimento de um STI, nomeadamente, formação, expansão, maturação e eventualmente o declínio. O ciclo de vida destes sistemas é importante não somente para compreender o nível de desenvolvimento do STI mas também para compreender a retração do STI anterior, assim, o STI pode ser visto como uma entidade que espelha a dinâmica da tecnologia correspondente (MARKARD, 2018).

A fase formativa (veja a Figura 3) é caracterizada por um pequeno número de atores, vendas praticamente inexistentes e pouco crescimento. A integração vertical é alta porque não há fornecedores ou fornecedores especializados. Os recursos financeiros provêm, em grande parte, de financiamento de pesquisa, muitas vezes por intermédio de órgãos públicos. Os atores tendem a manter o foco em pesquisa e desenvolvimento, experimentação e prototipagem.

Na fase formativa, o STI depende muito das estruturas de contexto (por exemplo, universidades, programas de Pesquisa e Desenvolvimento (PD), indústrias existentes, tendências sociais mais amplas, desafios de sustentabilidade e entre outros) e tende a se adaptar a elas para criar legitimidade. O STI nascente também é caracterizado por ideias concorrentes e uma grande variedade de projetos de tecnologia. As aplicações não são claras ou estão mal definidas, assim como os parâmetros de desempenho. É altamente incerto se os conceitos acabarão ganhando espaço e se haverá demanda e aplicações lucrativas (MARKARD, 2018).

A fase de expansão (veja Figura 4) é caracterizada por alto crescimento e altas taxas de entrada, mas também pode sofrer abalos com altas taxas de saída. O volume de vendas cresce, mas ainda muito abaixo do potencial de mercado. Nesta fase, o STI contém uma massa crítica de atores em diferentes papéis, apresentando um nível crescente de especialização. Atores intermediários, como associações específicas de tecnologia ou comitês de padronização começam a aparecer. Existe forte concorrência, além de conflitos em relação a quais padrões devem ser implementados. Cadeias de

Figura 3 – STI em fase formativa



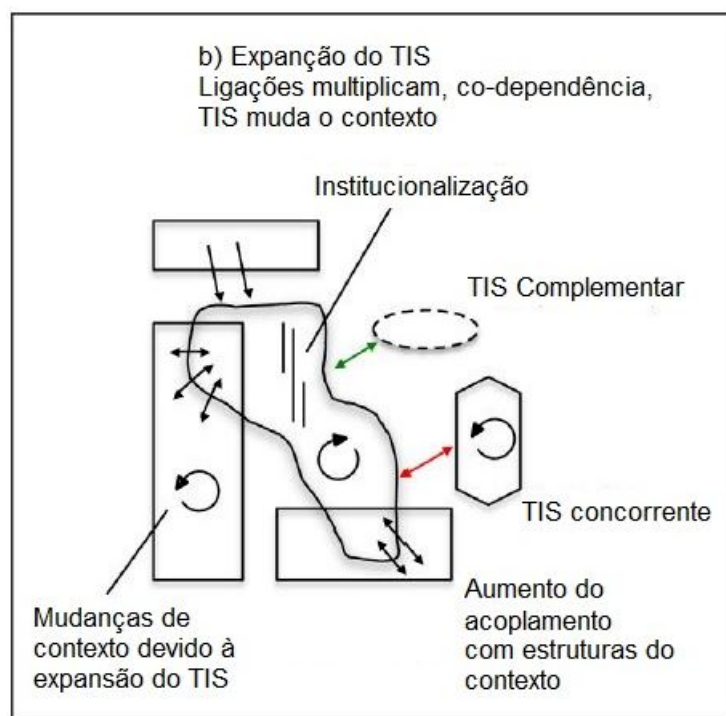
Fonte: Adaptado de Markard (2018)

valor se estabelecem e os atores colaboram regularmente em redes formais e informais. A diversidade de tecnologia diminui e um design dominante pode surgir. Em fase de crescimento, os laços entre o STI e o contexto se multiplicam (MARKARD, 2018).

A fase de maturação (veja Figura 5) é caracterizada por alta nas vendas e baixas taxas de crescimento. Nesta fase, o STI é muito estável, com baixo número de entradas e saídas. A base de atores é caracterizada por um alto grau de especialização, com muitas organizações que prestam serviços complementares para a tecnologia focal. Há um alto grau de estruturação, institucionalização e estabilidade. Produtos e aplicações são claramente definidos. A tecnologia não é apenas amplamente conhecida, é amplamente aceita. Mercados, cadeias de valor e redes estão bem estabelecidos e estáveis. O desempenho da tecnologia é alto, mas ainda pode estar aumentando e pode se ramificar em novas aplicações. Há uma variedade de laços estreitos de co-dependência entre o STI e as indústrias fornecedoras, usuários e infra-estruturas em seu contexto (MARKARD, 2018).

Por fim ainda existe uma fase de declínio, quando as vendas decaem e mais atores saem do STI. Intermediários perdem sua relevância, as cadeias de valor estabelecidas, e as redes se separam. Os atores do STI são confrontados com visões sobre o futuro da tecnologia, junto de uma desestabilização de estruturas institucionais. Lutas entre atores aumentam em comparação com a fase madura. Projetos

Figura 4 – STI em fase de expansão



Fonte: Adaptado de Markard (2018)

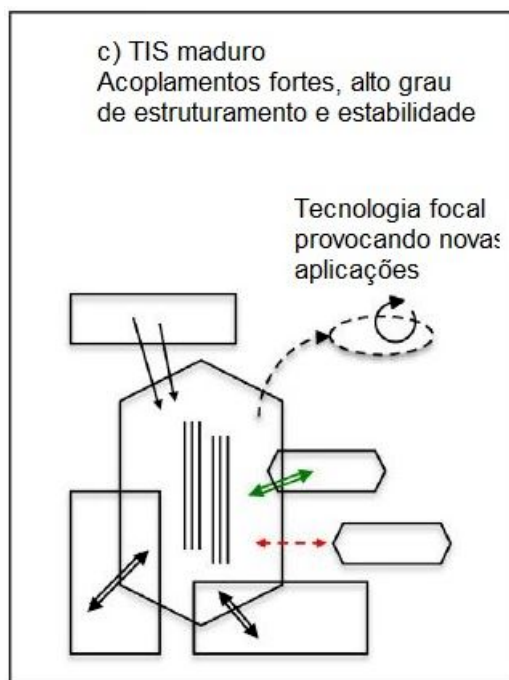
de tecnologia com foco no desempenho de parâmetros podem ser questionados e ações defensivas podem ser tomadas, por exemplo através de lóbi político, afetando o contexto. Finalmente, os laços estabelecidos se dividem e em resposta, as indústrias complementares também diminuem ou se adaptam ao novo STI emergente.

2.3 LENTES PARA ANALISAR TRANSIÇÕES SOCIOTÉCNICAS

Em decorrência das complexidades apresentadas, que dificultam a análise da mudança tecnológica, diversas lentes teóricas vêm sendo propostas como ferramentas, como mostra a Figura 6, estas lentes possuem como objetivo principal auxiliar a tomada de decisão para políticas de inovação, ou melhor, controlar a transição em direção a padrões mais socialmente desejados, como é o caso da sustentabilidade (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). Segundo os autores a Perspectiva Multi-Nível (PMN) e a Gestão das Transições são lentes para níveis mais amplos. Já o Gerenciamento Estratégico de Nicho e os STI, são mais voltados para o estudo do surgimento e os primeiros passos para difusão de inovações (MARKARD, 2018).

O princípio destas lentes teóricas está no reconhecimento de que tecnologias e infraestruturas dominantes agem como pressões de seleção através de padrões e disposições impostas às características dos sistemas sociotécnicos, criando uma

Figura 5 – STI em fase de maturação



Fonte: Adaptado de Markard (2018)

dependência de trajetória que por vezes resulta no bloqueio ou *Lock-in* de tecnologias dominantes dentro destes sistemas (KÖHLER *et al.*, 2019).

Uma lente que merece ser descrita é a Perspectiva Multi-Nível, em alguns casos ela é utilizada de forma complementar aos STIs (EDSAND, 2019; MARKARD, 2018). Esta perspectiva define três níveis conceituais, o mais superior compreende os eventos de ambiente, como as grandes mudanças nos preços do petróleo, a pressão atual por mitigar o aquecimento global e a poluição, mais recentemente a situação de Pandemia é um fator de ambiente muito forte que cria diversas pressões sobre os níveis inferiores. O Nível intermediário é o chamado de Regime, compreende os sistemas sociotécnicos, as instituições e as estruturas físicas que buscam se perpetuar ao longo dos anos. Já o nível inferior, chamado de Nicho, é onde as inovações são criadas e florescem, geralmente dentro de espaços protegidos onde não competem com as soluções já instauradas do regime (GEELS, F. W., 2002).

Outro aspecto importante elucidado a partir da PMN é a noção dos caminhos para transição (do inglês, *transition pathways*). Estes caminhos definem a natureza da interação das inovações quando em determinado momento se deparam com as tecnologias dominantes no regime. A Figura 7 caracteriza a natureza dos quatro caminhos.

Ainda dentro desta teoria assume-se que economias industriais foram bloqueadas em sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis através de um processo de co-evolução tecnológica e institucional impulsionado por retornos crescen-

até padrões de comportamento e atividades (GEELS, F. W., 2002).

Princípios orientadores e processos cognitivos favorecem desenvolvimentos incrementais ao invés de mudanças de paradigma, e as preferências dominantes do consumidor estabilizam instituições de mercado, oferta e demanda, preços e o comportamento do usuário (GEELS, F. W., 2002; NELSON; WINTER, 1982). Estes fatores influenciam a trajetória do sistema em um laço de reforço, causando um detrimento nas alternativas viáveis do passado (SMITH; RAVEN, 2012).

Transições sociotécnicas são, portanto, processos co-evolutivos, envolvendo mudanças em uma variedade de elementos e dimensões, a partir de inovações incorporadas a sociedade (GEELS, F. W., 2002; KOHLER *et al.*, 2019). No entanto estas transformações não são necessariamente tecnológicas, podem surgir em novas práticas de usuários, novos regulamentos, conexões industriais, infraestrutura e simbolismos (MARKARD; RAVEN; TRUFFER, 2012). A transição é um processo não linear, gradual, geralmente de longo-prazo que envolve mudanças estruturais, consistindo em um conjunto de mudanças conectadas em tecnologia, economia, instituições, comportamentos, cultura, ecologia e crenças que se reforçam (KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998).

3 CAMPO TECNOLÓGICO DO BIOGÁS

Este capítulo expõe a perspectiva utilizada para observar o objeto de estudo e seu uso na construção desta dissertação. A primeira seção detalha o objeto de análise, o biogás, a segunda apresenta as perspectivas que o fazem estratégico diante das transições para sustentabilidade, a terceira realiza uma contextualização perante os principais setores econômicos que interagem com o campo tecnológico do biogás (Saneamento, Agronegócio, Energético e Transportes), por último a quarta seção caracteriza o setor de biogás do Brasil.

O referencial da seção 3.2 foi elaborado utilizando como base uma revisão sistemática da literatura (Apêndice A) e o da seção 3.3 na revisão de materiais nacionais, relatórios, teses, dissertações, livros e notas técnicas. Os passos da revisão são apresentados na seção de procedimentos metodológicos (4.1).

3.1 COMPOSIÇÃO, PRODUÇÃO E APLICAÇÕES

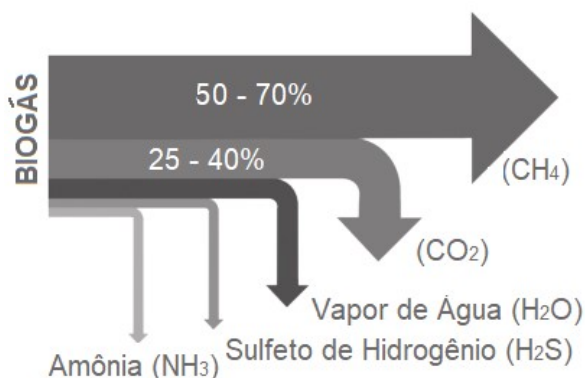
Nesta seção explora-se como e porque o biogás pode ser tratado como uma rota tecnológica. Busca-se definir o objeto, sua composição, principais fontes e alguns aspectos técnicos da sua produção, mas sem adentrar nas especificidades dos diferentes tipos de biodigestores (e.g., balão de lagoa coberta) nem nos processos químicos que a operam (e.g., metanogênese, tempo de retenção), ao invés disso, aplicações e dificuldades são exploradas.

A degradação natural de materiais orgânicos (biomassa) resulta na produção de biogás por micro-organismos sob condições anaeróbicas (sem a presença de oxigênio), um gás renovável que pode ser usado para produzir eletricidade, calor ou combustível (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). Além disso algumas, aplicações mais nobres são sugeridas, como na produção de materiais para bio-economia (e.g., ceras e plásticos) (HORSCHIG; WELFLE *et al.*, 2019).

O biogás é formado principalmente de metano (CH_4) (50 – 70%) e dióxido de carbono (CO_2) (25 – 40%) como ilustra a Figura 8. O metano é o combustível, assim o biogás é tanto mais puro quanto maior seu teor de metano. O gás sulfídrico (H_2S) formado no processo de fermentação é o que dá o odor pútrido característico à mistura quando o gás é liberado, sendo também o responsável pela corrosão que se verifica nos componentes físicos do sistema (SGANZERLA, 1983). O substrato utilizado, em geral deve conter mais de 65% água para que possa ser bombeada para dentro e para fora do reator. O substrato também deve ser relativamente homogêneo e conter poucos componentes estruturais para obter um processo de fermentação rápido e eficiente. portanto, não é adequado e os resíduos de grama ou agrícolas devem ser corte em pedaços muito pequenos antes de serem adicionados à digestão processo. Proteínas e gorduras seriam os materiais mais indicados para o processo pois possuem bastante

matéria orgânica e energia química (MARKARD; TRUFFER, 2008)

Figura 8 – Composição do biogás



Fonte: Elaborado pelo autor

Embora a bio-digestão e o processo de produção de biogás sejam conhecidos e praticados há mais de um século, principalmente em pequena escala na China e na Índia, foram nas últimas décadas que ele ganhou presença na matriz de diversos países, principalmente nos desenvolvidos onde a tecnologia já está mais desenvolvida. Isso se deve a alguns fatores como, ao amplo processo de aprendizado através de pesquisa, prática, inovações em tecnologias, sistemas e participação governamental suportados por estes países. Mas, os principais fatores pelos quais a bio-digestão foi incentivada são: o potencial de redução das emissões de GEE e a diversificação da matriz energética renovável (DURÃO, 2017).

Uma particularidade dos projetos de biogás é que os modelos de negócio de produção são locais e altamente personalizados, em outras palavras, dependem do contexto onde são inseridos, dos substratos disponíveis, das tecnologias e do mercado possível de ser acessado para escoar a produção. O iniciador deste negócio pode ser um município, uma empresa industrial, um fazendeiro ou qualquer ator que esteja interessado na energia derivada do biogás. Nesse caso, o desenvolvimento da solução perpassa três etapas de planejamento, iniciando pelo mapeamento das quantidades potenciais de biomassa, planejamento do processo de produção de biocombustível, que envolve a seleção de tecnologia, e a previsão da demanda pelo combustível (TSVETKOVA; GUSTAFSSON, 2012).

Na primeira etapa, os substratos podem ser obtidos a partir de diferentes setores ou da cooperação entre unidades produtoras para assim permitir escala e viabilidade técnico-financeira para implantação de plantas de biogás. Mais importante é que geralmente quando uma cooperação deste tipo ocorre, pode ser constituída uma interação entre sistemas sociotécnicos que pode resultar em um aprimoramento do alinhamento entre eles (GEELS; RAVEN, 2007). Diferentes substratos orgânicos então podem ser

utilizados para produção de biogás, quando apenas um é utilizado o processo é chamado de mono-digestão, quando os substratos são combinados chama-se co-digestão. A combinação pode ser muito útil para viabilidade dos projetos, principalmente quando o substrato principal está disponível em uma época específica do ano (e.g., milho) (SGANZERLA, 1983).

Posteriormente na segunda etapa, há a seleção do meio tecnológico de produção. Os métodos mais comuns são os reatores de fermentação anaeróbica (e.g., biodigestores, que existem em diversos modelos), aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes, ainda, cada um terá um modelo de negócio específico. A Tabela 4 apresenta algumas alternativas relacionadas a estas rotas tecnológicas e também alguns modelos de negócio geralmente associados a cada uma, já se referindo a terceira etapa (DURÃO, 2017). As siglas se referem a Resíduos Agrossilvopastoris (RA), Resíduos da Indústria (RI), Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

Tabela 4 – Exemplos para definição do modelo de negócio

Tipo	Tecnologia	Escala	Modelo
RA	Biodigestores	até $2.500m^3/d$	Digestato/Cogeração
RI	Lagoas tecnológicas	2.500 a $12.500m^3/d$	Digestato/Cogeração
RSU	Gás de aterro	$> 12.500m^3/d$	Biometano
ETE	Biodigestores		Digestato/Autoconsumo

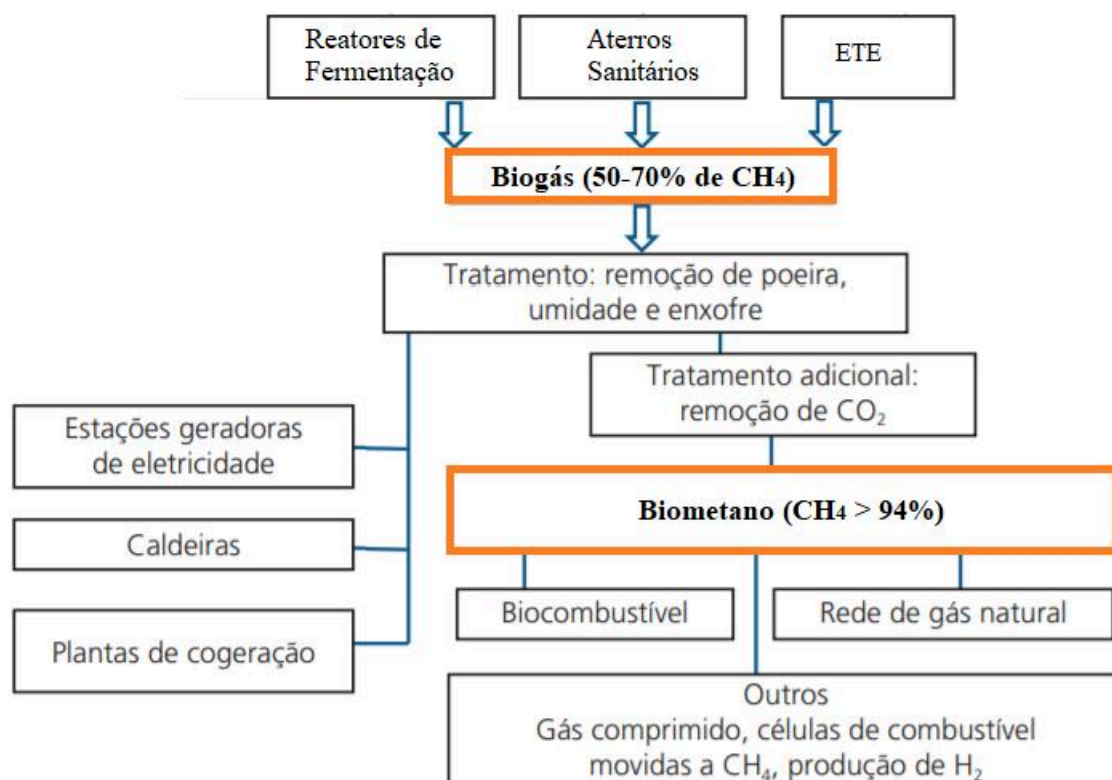
Fonte: Adaptado de Durão (2017)

Os modelos de receita podem variar além dos mencionados na Tabela 4, devendo seguir as realidades locais. A produção de hidrogênio, dióxido de carbono, gás natural liquefeito, e biomateriais podem ser alternativas mais complexas, mas que podem auxiliar na viabilidade dos projetos. A Figura 9 ilustra o processo de fabricação do biogás em diferentes alternativas produção e receita (RABONI; URBINI, 2014).

Assim, a qualidade e a sazonalidade da biomassa utilizada para a produção de biocombustíveis afetam diretamente os produtos de saída, bem como a maneira como eles podem ser distribuídos, e potencialmente toda a ideia de negócio. Isso significa que os fornecedores de biomassa precisam estar profundamente integrados com os produtores do combustível e os consumidores (TSVETKOVA; GUSTAFSSON, 2012).

Os substratos diferem muito na capacidade de produção de biogás bem como no manejo, e as estimativas de produção são geralmente teóricas, dependem muito das características dos projetos. Substratos embasados em dejetos animais, produzem relativamente pouco, teoricamente, cerca de $30m^3/t$ de dejetos e necessitam tratamento (aquecimento) para remoção de patógenos, outras matérias produzem mais, por exemplo grama $100m^3/t$, milho e restos de alimentos $200m^3/t$, o óleo de cozinha reaproveitado chega a $800m^3/t$. Os materiais ricos em carboidratos são convertidos

Figura 9 – Processo de produção do biogás



Fonte: Adaptado de Raboni e Urbini (2014)

rapidamente enquanto os gordurosos são convertidos lentamente, os tempos de retenção no biodigestor variam entre 30 e 60 dias (ABILOGÁS, 2018). A tabela 5 resume alguns dos rendimentos de biogás por tonelada de diversos substratos.

Tabela 5 – Rendimento de biogás por tonelada de diversos substratos

Biomassa	Produção de biogás [m³/ton biomassa]
Fração orgânica dos RSU (e.g., lixo orgânico)	150 - 200
Vinhaça, torta de filtro, palha e bagaço	20 - 100
Dejetos animais	12 - 70
Abatedouros	30 - 185
Cama de aviário	100 - 200
Resíduos agroindustriais (e.g., soro de leite, grãos)	60 - 110
Resíduos de lavouras (e.g., café, soja, mandioca)	50 - 500
Glicerina (produção de biodiesel)	600 - 650
Culturas energéticas (e.g., milho, sorgo)	180 - 220
Lodos de esgoto	40 - 60

Fonte: Adaptado de Albarracin (2016)

Como definido no início do capítulo o biogás é um combustível renovável que pode ser usado para produzir eletricidade, calor ou combustível (biometano). Contudo,

cada aplicabilidade tem suas características, por exemplo, para geração de calor ou iluminação em pequena quantidade não há grandes necessidades de purificação, já para usos mais intensivos, por exemplo, em motores a combustão interna, se faz necessário maior purificação para assegurar a vida útil do equipamento (BAXTER; WELLINGER; MURPHY, 2013). Os maiores ganhos no entanto, são decorrentes da combinação da produção de energia elétrica e de calor, no que é chamado de cogeração. A cogeração é uma opção bem vista nas chamadas vilas energéticas (BARICHELLO, 2015)

Para as utilizações mais simples como fogão, lampião, chuveiro o biogás requer pouco tratamento, no entanto para outros equipamentos a presença de água em forma de vapor, e gases corrosivos, como o gás sulfídrico no biogás, são os principais problemas para a viabilização do seu armazenamento e uso na produção de energia. Equipamentos mais sofisticados, como micro turbinas, motores de combustão interna e compressores têm sua vida útil extremamente reduzida. A remoção destas substâncias indesejadas é imprescindível para a viabilidade do seu uso a longo prazo. Para a utilização do biogás proveniente de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, faz-se necessário também a remoção de siloxanos (CASARIN, 2016).

A opção de produzir biometano é mais complexa devido a necessidade de adicionar um processo de filtragem de metano ou enriquecimento do dióxido de carbono, que geralmente só é justificado economicamente para grandes volumes de gás. No entanto, pesquisas recentes visam baratear esta etapa criando um método de purificação de passo único de biogás bruto para biometano, com ganhos operacionais na ordem de 60% comparado a tecnologias mais difundidas (e.g., lavagem com água ou amina) (ŽÁK *et al.*, 2018).

O poder calorífico do biogás varia de 5.000 a 7.000 $kcal/N m^3$, dependendo da quantidade de metano presente na mistura. O gás natural por exemplo possui poder calorífico superior de 9400 $kcal/N m^3$. A tabela 6 auxilia comparando a energia do biogás com outros energéticos. Nota-se que para transformar o biogás em energia elétrica considera-se uma baixa eficiência da máquina térmica que hoje com a cogeração podem chegar a 50 %. Por exemplo utilizando turbinas a vapor associadas a turbinas a gás formando o ciclo combinado. O calor necessário para a produção de vapor é proveniente dos gases de exaustão da turbina a gás (BLEY JR., 2015).

Porém a análise financeira favorece os motores de combustão interna, principalmente por dispensarem a necessidade de compressão do gás antes do uso. A utilização do biogás em motores de combustão interna com ciclo Otto, é derivada de motores desenvolvidos para gasolina, diesel ou gás natural com potência entre 50 e 600 kW. Com pouca ou nenhuma modificação, esses motores são aptos a funcionar com o biogás de baixo teor de enxofre, atingindo eficiências elétricas entre 34 e 42% e vida útil de 60.000 horas. O calor gerado durante a combustão do gás também pode ser utilizado para o aquecimento do biodigestor evitando sua operação em tem-

peraturas abaixo de 20°C, uma vez que abaixo deste limite a atividade microbiana é extremamente reduzida (CASARIN, 2016).

Tabela 6 – Equivalência energética do biogás

Energético	Equivalência de 1 Nm³
Gasolina	0,613 L
Diesel	0,579 L
GLP	0,454 kg
Álcool	0,790 L
Carvão mineral	0,735 kg
Lenha	1,538 kg
Energia elétrica (22 % eficiência do motogerador)	1,428 kWh

Fonte: Adaptado de Casarin (2016)

A temperatura dos gases de exaustão destes motores a biogás geralmente varia entre 370°C a 540°C o que permite a utilização para produzir água quente ou vapor. Então o calor excedente pode ser vendido para a vizinhança através de redes de distribuição de calor. Essas redes são linhas duplas de tubos isolados de aço ou Polietileno de Alta Densidade que transportam a água geralmente a 90°C e retornam com água a 70°C, podendo variar de 4 a 8 km. Essa forma de comercialização é adotada nas chamadas vilas bioenergéticas, ainda inexistentes no Brasil (BARICHELLO, 2015).

Por fim é importante salientar a necessidade de uma operação segura e devidamente licenciada. Caso as plantas não forem operadas corretamente, podem representar riscos ao meio ambiente e a saúde humana. Devido à engenharia de processos um pouco complexa, a manipulação de grandes quantidades de resíduos em decomposição e o fato de gases altamente inflamáveis serem produzidos e armazenados durante o processo produtivo, é imprescindível que pessoas capacitadas atuem na operação e manutenção da tecnologia. Portanto, são necessárias medidas de proteção adequadas para que os riscos dentro e no entorno de plantas de biogás possam ser limitados e reduzidos (DURÃO, 2017).

3.2 INTERAÇÕES DO BIOGÁS COM DIFERENTES SETORES DA ECONOMIA

O objetivo desta seção é encontrar intervenções relevantes em setores da economia que tenham influência na transição para o uso do biogás. Portanto visa esclarecer a complexa relação do biogás com alguns setores econômicos e também visa destacar possíveis efeitos resultantes da co-evoluções entre eles. Esta seção foi construída junto de uma análise bibliométrica (Apêndice A), pois faz parte dos procedimentos metodológicos, em síntese, os artigos analisados são resultado de uma busca estruturada em algumas bases de dados, em artigos que incluíssem o tema de

transições sociotécnicas e o biogás, 33 artigos foram revisados para estruturar esta seção.

O biogás produzido através da Digestão Anaeróbica (DA) é particularmente útil pela combinação de dois fatores: a produção de um gás combustível e o tratamento de resíduos orgânicos, e em alguns casos, também a produção de fertilizantes (HOPPE; SANDERS, 2014). Diante disso e do contexto (*landscape*) atual, esta técnica tornou-se essencial para o desenvolvimento sustentável, no entanto, as diferentes oportunidades e possibilidades para formular ótimos modelos de negócio para produção de biogás são difíceis de tomarem forma devido a necessidade de interação entre diversos setores.

Dito isto, a tecnologia para esse fim precisa ser desenvolvida em diversas rotas tecnológicas e sob diversas especificidades regionais (MARTIN; COENEN, 2015; HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014; NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019). Devido a estas complexidades, o biogás pode ser observado pela lente do STI, constituído de diversos nichos emergindo anexados a sistemas mais amplos. Não obstante, o STI inclui atores, instituições, regulamentações, modelos de negócio e artefatos que viabilizam seu desenvolvimento (RAVEN, 2004; RAVEN; GEELS, 2010).

Uma análise preliminar da literatura destacou cinco principais setores que oferecerem oportunidades para o biogás: agricultura, resíduos urbanos, eletricidade, transporte e gás natural. Portanto a análise de conteúdo, dividida nas próximas sub-seções utiliza desta divisão, onde dois setores agem como produtores e outros três como facilitadores ou clientes. Ao sintetizar estes fatores sob o ponto de vista de cada setor, pode-se auxiliar a formulação de políticas de incentivo.

Quando políticas são formuladas para promoção do biogás, elas muitas vezes não apresentam o grau de coordenação necessário para promover o STI de forma eficiente. Os setores acabam sendo promovidos por políticas unilaterais que buscam destacar a importância da tecnologia apenas no seu domínio, quando deveriam ser horizontais e incorporar diversos setores (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014). Mudanças que incorporam sistemas complexos como os em questão, no entanto, geralmente requerem a criação de novas infra estruturas, tecnologias complementares, significado simbólico, indústrias, subsídios, programas de apoio e regulamentação. Além disso, a produção de biogás lida com melhorias sistêmicas e inovações nos setores, identificadas como pontos-chave na abordagem das transições para lidar com o 'aprisionamento' (do inglês, *lock in*) (KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998).

3.2.1 Biogás nos setores agropecuários

Este setor compreende essencialmente as atividades da agricultura, que tem por objetivo a cultura do solo para produção de alimentos úteis ao homem, mas também junta a pecuária, com o objetivo de criar bens de consumo mediante a criação de animais (e.g., gado, suínos, aves e entre outros). Portanto para os agricultores, a

produção de biogás e biometano é uma peça em um quebra-cabeça muito maior para o fechamento de ciclos de nutrientes (SMINK *et al.*, 2015). A junção destas peças ainda necessita que avalie-se os diversos modos do agronegócio (e.g, familiar, industrial e energética). Em outras palavras, durante as fases de formação dos nichos em cada um destes modos, diversos aspectos podem prevalecer e canalizar o caminho tecnológico em desenvolvimento para uma ou várias direções com diferentes resultados. Um aspecto em comum entre estes modos, em uma visão de cima para baixo, é a expectativa de reduzir as emissões de metano (GEELS; RAVEN, 2007).

Com esta visão, diferentes países criaram parâmetros específicos para separação entre produtor de biogás em escala descentralizadas e em plantas centralizadas (e.g., pelo volume de dejetos processados, pelo volume de gás produzido, pelo tamanho do biodigestor) (RAVEN; GEELS, 2010). Em razão da complexidade, o tamanho das plantas é resultado de peculiaridades do projeto, pois de forma geral, os biodigestores são neutros em relação a suas dimensões. Geralmente são os tipos de políticas de incentivo e as preferências locais que estipulam os designs dominantes (WIRTH, 2014).

A produção de biogás neste setor permite monetizar fluxos de resíduos que por muito tempo foram considerados um fardo (HOPPE; SANDERS, 2014; RAVEN; GEELS, 2010). Porém, sua produção requer novas habilidades dos produtores, que podem ser consideradas complexas, por exemplo: monitorar e registrar os volumes de resíduos, sua disposição, sua utilização e ainda suas emissões. Embora existam diversos ganhos com a produção de biogás, é a redução de custos e as fontes de renda com energia (elétrica ou térmica) que motivam os investimentos no biogás em propriedades rurais (LYYTIMAKI, 2018). Embora sejam específicos como descritos nas seções a seguir.

3.2.1.1 Agropecuária familiar

A literatura destaca o biogás como uma oportunidade para os agricultores familiares saltarem do uso da madeira, por cima (*leapfrog*) do uso de combustíveis fósseis (e.g., gás de cozinha), direto para uma fonte de energia mais sustentável. Complementando com uma proteção da biodiversidade, pois o consumo de madeira é uma das razões para o desmatamento e a degradação do meio ambiente (CAMPBELL; SALLIS, 2013; LYYTIMAKI, 2018).

Característico principalmente em países em fase de desenvolvimento, os biodigestores de menor porte (entre 4 e 11m³) que produzem biogás e biofertilizante, buscam incentivar a agricultura familiar. O biogás nestes setores é utilizado geralmente para cocção de alimentos e iluminação. Ainda vale ressaltar que muitos dos agricultores neste contexto não possuem acesso a energia elétrica, gastam tempo juntando madeira e ainda possuem dificuldades em lidar com a burocracia para conseguir o su-

portes financeiros. Então os biodigestores são úteis não somente para reduzir custos, eles realmente melhoram a qualidade de vida dos agricultores (WANG *et al.*, 2016; TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015; BÖSSNER *et al.*, 2019).

A estratégia de difusão é mais promissora é através da conscientização e estabelecimento de metas (direcionamento de pesquisa), e menos promissora se focada na promoção de habilidades e capacidades (difusão de conhecimento). Ainda, as produções em pequena escala podem surgir através de programas específicos em estabelecimentos de diferentes finalidades, por exemplo escolas e prisões (criando legitimidade informal) (TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015). A agropecuária familiar ainda pode assumir a forma de cooperativas, em alguns casos pequenos biodigestores são conectados por gasodutos e direcionados a uma central termoelétrica, porém o mais comum em cooperativas é a utilização de um biodigestor centralizado onde os produtores levam seus dejetos para serem processados e trocam por fertilizantes (GEELS; RAVEN, 2007). Um fator essencial então é a criação de um programa de pacote tecnológico integrado sobre plantas de fertilizantes e biogás para geração, purificação, enriquecimento, engarrafamento e distribuição canalizada de biogás, além de centros de treinamento sobre biogás (SCHMIDT; DABUR, 2014).

Outro fator relevante se refere a fuga da mão de obra do campo. O que vêm acontecendo há algumas décadas é que a falta de boas condições de vida no campo impulsiona o êxodo rural ¹. A produção de biogás provém condições para reduzir este efeito, provendo melhores condições de vida para estas pessoas (CAMPBELL; SALLIS, 2013). Não obstante, também é uma forma de proteger o eco-turismo quando este é um fator relevante para a região (BÖSSNER *et al.*, 2019).

Nos sistemas familiares também sugere-se que os experimentos e projetos pilotos devem ser desenvolvidos nos locais de uso e com fácil acesso aos interessados. Em outras palavras, há uma necessidade de que centros de inovação, universidades e outros apoiadores operem em campo, próximos aos usuários da tecnologia. Por exemplo, grupos indígenas necessitam de um projeto mais flexível e focado na cultura ao invés da tecnologia (CAMPBELL; SALLIS, 2013).

Um fator limitante importante para a expansão do biogás neste setor é a necessidade de conduzir corretamente a operação e a manutenção dos equipamentos. Para operação, a dificuldade mais clara é a coleta dos resíduos de animais, principalmente quando estes são criados fora de currais, e para manutenção é a limpeza dos filtros. Para minimizar estes problemas o monitoramento das instalações e o treinamento dos usuários deve ser contínuo, não apenas nos primeiros meses ou anos, sempre ressaltando a segurança (BÖSSNER *et al.*, 2019). O mais importante para os produtores terem em mente é que as usinas de biogás não podem ser montadas e deixadas sozi-

¹ Êxodo rural é o termo pelo qual se designa a migração do campo por seus habitantes, que, em busca de melhores condições de vida, se transferem de regiões consideradas de menos condições de sustentabilidade a outras, podendo ocorrer de áreas rurais para centros urbanos

nhas, mas devem ser preenchidas, monitoradas e esvaziadas constantemente, ou seja, eles precisam ser integrados às rotinas diárias dos agricultores (CAVICCHI, 2016).

Para os produtores de tecnologia, programas de biogás podem ser um grande negócio, principalmente através de cooperativas de produtores. Em outras palavras, os agricultores que participam no financiamento conjunto de instalações, não apenas fornecem receitas para partes interessadas que instalam os digestores, mas também vêm a tecnologia do biodigestor como investimento no futuro da comunidade. Ainda há a possibilidade de investir no uso de materiais construtivos locais (e.g. madeira, ardósia, plásticos e entre outros). Esta possibilidade é uma boa alternativa para os produtores de tecnologia, pois podem reduzir significativamente os custos de instalação e manutenção (BÖSSNER *et al.*, 2019).

3.2.1.2 Agropecuária industrial

Os projetos de biogás são diferentes em locais onde os setores agropecuários são mais desenvolvidos e industrializados e a concentração de dejetos é muito maior. Nestes projetos as plantas de biogás são maiores, possuem processos e modelos de negócio mais complexos como a produção de biometano e/ou eletricidade. Portanto, causam resultados e impactos muito diferentes do contexto dos pequenos produtores. A literatura indica que as políticas de incentivo (e.g., tarifas especiais para energia elétrica injetada na rede, as *Feed-in tariffs*) são reconhecidas por impulsionar a difusão destas plantas (RAVEN; GEELS, 2010; HOPPE; SANDERS, 2014; MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016).

Este setor adota a produção de biogás para solucionar o excesso de resíduos acumulados de suas atividades (e.g. criação de animais ², produção de etanol, cerveja, matadouros e entre outros). A primeira onda das plantas de biogás nestas atividades começou na década de 90 em países mais desenvolvidos (principalmente na Alemanha) com plantas de pequeno porte (e.g., 70kW) construídas de certa forma em que as plantas eram adaptadas aos fazendeiros. Os principais objetivos eram a fertilização aprimorada, o enriquecimento do solo (húmus, capacidade de retenção de água), melhor gerenciamento do esterco (incômodo com odor, moscas e patógenos) e proteção das águas subterrâneas (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016).

Já nos anos 2000 a segunda onda surgiu junto de leis dedicadas as energias renováveis fazendo com que as plantas assumissem um novo propósito (*framing*). Agora as plantas eram de grande porte (420kW) processando resíduos de animais misturados com culturas dedicadas (e.g. milho) e o propósito principal mudou, sendo visto neste momento com o objetivo de fonte de renda, oferecendo energia como um produto agrícola parte de uma transição mais ampla. No entanto uma terceira onda, ainda

² Principalmente na atividade de Operação de alimentação animal concentrada (do ingles, Concentrated Animal Feeding Operation (CAFO))

mais recente vem causando alguns desalinhamentos na legitimidade da tecnologia, basicamente, com mais incentivos as plantas diminuíram seu foco no processamento de resíduos e aumentaram o foco em substratos com alta produção de biogás. O novo propósito passa a ser com foco em investimentos e o negócio em si, como uma oportunidade de gerar retornos atrativos, partindo cada vez mais para as culturas energéticas (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016; CAVICCHI, 2016). Este tipo de mudança, diante da literatura dos sistemas de inovação, pode ser chamado de reposicionamento (do inglês, *TIS Redeployment*).

Alguns empreendedores deste modo ainda podem ter dificuldades nos modelos de negócio de cooperativas (mesmo sendo os mais promissores) por motivos associados a posse dos bens. Uma análise comportamental afirma que estes atores possuem um tipo de desejo em ser melhor que o vizinho, e esse comportamento é associado a ideia de posse (WIRTH, 2014). Os produtores precisariam aprender a utilizar o serviço ao invés do produto, passando por uma transformação cognitiva e normativa, o que iria potencializar a difusão de cooperativas de biogás. No entanto a literatura apresenta que a ideia de posse é essencial para obter e manter a identidade dos fazendeiros.

A produção agrícola de biogás é subsidiada em países desenvolvidos, de forma que são os custos logísticos que inibem o aumento da produção para onde as distâncias são muito grandes. Este fator causa uma falta de interesse de consumidores (firmas) na aquisição de biofertilizantes e causa problemas com o tamanho das plantas (e.g. plantas de grande porte permitidas somente em áreas industriais, não em áreas rurais) (FENTON; KANDA, 2017; LYYTIMAKI, 2018). Além disso, conseguir o subsídio também é um processo árduo e burocrático que geralmente leva ao atraso dos projetos de biogás. O que se sugere é um subsídio voltado ao fortalecimento dos padrões cognitivos em função da reciclagem dos nutrientes e não embasada somente nos ganhos energéticos (RAVEN; GEELS, 2010).

Um aspecto importante sugerido na literatura sobre a elegibilidade dos empreendedores para receber incentivos em forma de capital para investimento é a associação a cursos de capacitação sobre operação e segurança das plantas (WIRTH, 2014). Outro aspecto relevante diz respeito as tecnologias complementares. Por exemplo um produtor pecuarista, além do biodigestor ele precisa de capacidade de armazenamento de substratos e digestato; instalações de pré-processamento; e celeiros inovadores que permitam a rápida captura de estrume (para evitar a perda de biogás) (HOPPE; SANDERS, 2014).

3.2.1.3 Agricultura energética

Em geral, o desenvolvimento do biogás nestes setores também possui tecnologia em proporções industriais. Porém, quando os nichos se desenvolvem por meio de incentivos diretos ou indiretos a sistemas de culturas energéticas, a produção de

biogás ganha características específicas, como o foco na produção de energia, acompanhado de um risco de tornar o empreendimento menos aderente a proposta de sustentabilidade (GAVA *et al.*, 2017; CAVICCHI, 2016). Outra característica importante na agricultura energética é a tendência a projetos mais padronizados (e.g. rápido crescimento com plantas padronizadas de 520kW e subsídios adequados (SUTHERLAND; PETER; ZAGATA, 2015)). Fazendas multifuncionais adotam o biogás para atingir o máximo possível de rentabilidade (i.e. integração vertical e autonomia) a partir do mercado formado pelos subsídios e regulamentações. Buscam se tornar fornecedores de recursos energéticos, mantendo um balanço entre a produção de alimentos/rações e materiais para co-digestão (i.e., em alguns casos processam matéria orgânica de até 70km) (GAVA *et al.*, 2017). Algumas dessas fazendas estabelecem parcerias com organizações industriais, as quais assumem o investimento e a burocracia dos contratos. Assim, fazendeiros que possuem uma planta em seu terreno lidam apenas com sua própria produção de resíduos e a operação da planta. Na literatura, estas organizações industriais são chamadas de Empresas de Serviço de Energia (do inglês, *Energy Service Companies (ESCOs)*) (SCHMIDT; DABUR, 2014). Outra nova função atribuída a estas fazendas multifuncionais se refere a um turismo de energia, o termo sugere que turistas sejam encorajados a visitar fazendas multifuncionais para ter contato com as possibilidades associadas a agroenergia (SUTHERLAND; PETER; ZAGATA, 2015).

Muitas críticas são direcionadas aos sistemas de biogás a partir de culturas dedicadas, como a competição de alimentos versus energia, problemas com monocultura de milho, efeitos negativos como odor, ruído e substâncias oriundas dos transportes (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016). Ainda estas plantas podem gerar resultados insustentáveis como por exemplo oposição social, distribuição inadequada dos benefícios, contas de energia mais altas e o aumento da competição pelo acesso a substratos para co-digestão (elevando os preços dos substratos) (RAVEN; GEELS, 2010). Isso geralmente ocorre porque políticas socio-econômicas por vezes falham em captar o lado ecológico e as regionalidades para atingir os resultados esperados (e.g. novas oportunidades de trabalho e negócios, capacitação e empoderamento da comunidade, energia acessível) (CAVICCHI, 2016).

Outros fatores de discussão que circulam o tema das culturas dedicadas se referem ao o preço do aluguel de terras agrícolas, a percolação em valas de irrigação, e a parte do gás produzida que é apenas queimada (e.g. em caso de os incentivos a produção de energia são apenas para uma volume fixo de energia) (HOPPE; SANDERS, 2014). Para superar estes desafios, sugere-se políticas com o objetivo obrigatório de reduzir a cota de combustíveis fósseis em prédios e transportes públicos, também que os ganhos de cooperativas sejam mais incentivados e ganhem destaque nas mídias, assim como as vilas energéticas para utilizar o calor produzido nas plantas, e por último também a diversificação dos modelos de negócio (e.g., biometano, hidrogênio,

biomateriais e entre outros) (CAVICCHI, 2016). O modelo de negócio para injeção de biometano nas redes de gás natural também desperta muito interesse e pode superar estes desafios, porém apresenta dualidades na cooperação entre produtores e distribuidoras de gás. Esta cooperação é onde o papel dos atores construtores do sistema (do inglês, *system builders*) ganha destaque (SMINK *et al.*, 2015).

A formação de redes entre produtores de biogás deste setor aponta a indústria *upstream*, os centros de pesquisa, e as uniões (associações) sobre o biogás como nós de influencia que podem ajudar a difusão do conhecimento. Os recursos auto-acessíveis (e.g. materiais disponíveis ao público) são importantes fornecedores de informações na fase de decisão de adoção, por isso ganham destaque mesmo na formação das redes. Então, o sucesso dos projetos é geralmente associado à capacidade dos modelos de negócio de lidar com a complexidade em três aspectos: financiamento, fornecimento e operação. Não obstante as indústrias *upstream* devem se engajar em pesquisa e desenvolvimento no núcleo do STI, a fermentação biológica. Além disso devem providenciar treinamento, manutenção e identificação de rotações de culturas adequadas (GAVA *et al.*, 2017).

O conceito de economia circular também introduz alguns assuntos críticos, por exemplo com relação ao uso de fertilizantes oriundos da biodigestão. Basicamente advertindo contra a utilização de resíduos urbanos ou industriais para tratamento em reatores de culturas energéticas. Foi raciocinado que esses resíduos podem conter contaminantes (e.g. resíduos de medicamentos, substâncias orgânicas nocivas, metais pesados e microplásticos) que podem comprometer tanto os rendimentos de gás quanto a qualidade do fertilizante. A economia circular no entanto pode se beneficiar com a produção de fertilizantes sob medida, atendendo às necessidades específicas de agricultores (LYYTIMAKI, 2018).

A literatura aponta também uma falta de transparência ao produtor negociar com o distribuidor estatal. O que acontece é que empresas estatais possuem uma grande participação de mercado na produção, distribuição e venda de combustíveis fósseis e energia, e o domínio dessas empresas (e seu poder de precificação) dificulta a competição com pequenas e independentes empresas de bioenergia (BÖSSNER *et al.*, 2019). Ainda em complemento, é este modelo de ancoragem, cada vez mais intrínseco, onde agricultores produtores de biogás dependem e ao mesmo tempo moldam as instituições para sustentar o aproveitamento deste energético, que gera insegurança aos produtores de biogás (SUTHERLAND; PETER; ZAGATA, 2015).

3.2.2 Biogás nos setores de resíduos

Os sistemas relevantes para produção de biogás relacionados aos resíduos, compreendem diferentes tipos de efluentes líquidos e sólidos geralmente próximo a regiões urbanas. Culturalmente estes sistemas são limitados a coleta e disposição

(LONNQVIST *et al.*, 2018). Assim, têm-se nesta etapa da revisão, argumentos que destacam a importância de grandes e pequenas estações de tratamento de efluentes, assim como a separação de resíduos sólidos e sua disposição em aterros. Novamente a análise se torna complexa e requer uma distinção entre estes sistemas ou setores.

De forma abrangente, o planejamento urbano e a infraestrutura são essenciais para que este setor se desenvolva de forma adequada, observando a particularidade de que estes setores são altamente institucionalizados (i.e. respeitam regulamentações) (SÄRKILAHTI *et al.*, 2017). Assim, o ator central neste setor são os municípios, que possuem o papel de requerer do setor uma redução do impacto de suas atividades, lembrando que é do operador a escolha dos modelos de negócio para abordar essas reduções (sendo o biogás apenas uma opção) (LONNQVIST *et al.*, 2018).

Estes modelos podem requerer ainda uma cooperação com os sistemas agropecuários, pois o substrato das plantas de biogás muitas vezes é destinado a aterros sanitários. O ideal claro é criar uma economia circular fazendo o substrato retornar ao campo, mas nem sempre é possível. A literatura ainda destaca outra relação entre estes setores, afirmando que quanto mais uma cidade cresce, mais resíduos produz e mais aumenta o custo das terras aráveis devido a competição por recursos (FALLER; SCHULZ, 2018).

Uma dificuldade para o desenvolvimento destes sistemas, está na convivência e necessidade de regulação de diversas empresas envolvidas. Com tantas empresas prestando serviços de utilidade (e.g., água, aquecimento central, eletricidade e telefonia) e os trabalhos de manutenção relacionados, está cada vez mais complexo a inclusão de novas utilidades. Este tipo de dificuldade toma forma ao considerar, por exemplo, novos sistemas de coleta de resíduos (e.g., sistemas a vácuo, coleta seletiva). O que a literatura destaca neste âmbito é que as novas soluções são geniais e excelentes, mas a realidade trazida pelas construtoras (e.g., custos) e agências ambientais (e.g., possíveis impactos) comprometem o desenvolvimento de certos nichos tecnológicos (SÄRKILAHTI *et al.*, 2017).

O tratamento de efluentes envolve a separação e captura para tratamento das águas classificadas como águas cinzas e águas negras³. As formas tradicionais de tratamento de efluentes, são altamente centralizadas e envolvem um pré-tratamento onde o lodo restante pode ser processado em biodigestores e/ou reciclados para a agricultura. Geralmente estas plantas operam longas distâncias e são criticadas pelo seu alto uso de energia e baixo aproveitamento de recursos. Para este setor se desenvolver e fazer proveito do biogás são necessários parceiros competentes, locais adequados, tecnologia madura e principalmente benefícios mais tangíveis e visíveis a população local (SÄRKILAHTI *et al.*, 2017).

³ A primeira é o efluente que tem origem nas máquinas de lavar, chuveiros e pias de banheiro; já a segunda é aquela proveniente de vasos sanitários.

As alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos que produzem biogás, podem seguir a rota tecnológica dos aterros sanitários ou de biodigestores. Os aterros processam uma gama variada de resíduos ⁴ e produzem uma alta quantidade de biogás devido ao volume de resíduos que recebem. Devido as proporções da maioria dos aterros, o gás gerado possui composições diferentes dependendo da área onde é feita a captação do gás. Importante salientar que utilizar de aterros não permite a produção de fertilizante (LONNQVIST *et al.*, 2018). Existem ainda diretivas recentes em alguns países que proíbem a disposição de resíduos orgânicos residenciais em aterros sanitário, obrigando uma destinação mais nobre (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014)

A alternativa de separar a fração orgânica dos resíduos e destina-la a biodigestores é mais custosa e requer mais operações que destinar a aterros, no entanto ela é capaz de produzir mais biogás e permite a utilização do substrato como fertilizante. Os biodigestores podem processar além de resíduos residenciais, resíduos de podas do paisagismo, de restaurantes e da indústria alimentícia (e.g., abatedouros, cervejarias). Essas plantas são geralmente maiores que as plantas agrícolas e podem variar entre 100 e 500 kW, enquanto a maioria das unidades nos sistemas de agricultura atingem entre 50 e 100 kW (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009).

O papel das políticas públicas é destacado como especialmente útil para incrementar a produção de biogás, dando oportunidade para empresa aperfeiçoarem a tecnologia e seus processos até o ponto de se tornarem exportadoras tecnologia (FEVOLDEN; KLITKOU, 2017).

Além disso, as tarifas referentes aos serviços de coleta e tratamento de esgotos e resíduos, podem contar apenas por uma parte dos custos de gerenciamento de toda a cadeia (e.g., não consideram o gerenciamento das emissões). Por isso, institucionalizar a coleta seletiva, a cadeia dos biofertilizantes e a redução dos subsídios aos combustíveis fósseis, são alguns dos desafios para as políticas públicas e para a evolução destes sistemas (LONNQVIST *et al.*, 2018).

A literatura aponta que este é um setor que se adapta a um caminho de reconfiguração (*Reconfiguration Pathway*). Primeiro as soluções atuais (e.g. aterros abertos) precisam se desenvolver para aterros mais tecnológicos, e assim iniciarem o aproveitamento do biogás com investimentos seguros e de menor escala, para promover a legitimidade da nova solução. Estes passos incrementais podem levar a melhores resultados como a institucionalização da coleta seletiva e posteriormente a criação de um mercado para o biofertilizante. Este mercado de biofertilizante poderá contar por mais da metade das receitas dos projetos quando a coleta seletiva realmente se difundir (e.g. 300 dólares por tonelada) (LONNQVIST *et al.*, 2018).

⁴ Segundo a ABNT NBR 10004/04 e também a lei 12.305/10, mais conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) existem três classes de resíduos: perigosos (Classe I), não perigosos não inertes (Classe II A) e resíduos não perigosos inertes (Classe II B)

Outra barreira relatada neste setor é sua rigidez institucional devido a tantos anos de operação. Geralmente é um setor dominado por poucas empresas e em regimes de concessão. As agências reguladoras podem, ao tempo devido, renovar estas concessões demandando concessionárias com soluções mais avançadas. Soluções paliativas precisam regular o controle de emissões destes setores e promover uma cadeia mais embasada na possibilidade de novas receitas. Soluções antecipadas poderiam aumentar a chance da permanência das concessões instauradas (LONNQVIST *et al.*, 2018).

Os dois sistemas destacados até aqui são os responsáveis pela produção de biogás, e a integração dos dois é uma ótima opção para aumentar a quantidade de matéria orgânica disponível para a produção de biogás (VERNAY *et al.*, 2013). Os setores discutidos a partir daqui são os usuários, ou seja, se referem as formas que o biogás pode ser utilizado. Em outras palavras, é imperativo que um dos anteriores se desenvolva buscando uma integração a um dos seguintes.

3.2.3 Biogás nos setores de transporte

O setor de transportes compreende elementos logísticos que tem como objetivo, movimentar carga, passageiros e serviços. O biogás pode ser utilizado na forma de biometano com o objetivo de incrementar a sustentabilidade deste setor e aumentar sua independência, principalmente nas frotas pesadas, como transporte público e máquinas agrícolas. Estes dois exemplos implicam novamente um grau específico de complexidade, pois ambos operam em contextos diferentes, um rural e outro urbano. O fato mais relevante observado nas narrativas é a utilização da previsibilidade e eficiência requerida do transporte público como um nicho muito efetivo para sustentar o desenvolvimento de algumas inovações (MUTTER, 2019; MARTIN; COENEN, 2015). No contexto rural o apelo é a produção local de parte da energia para as máquinas.

A amostra de artigos destaca claramente a Suécia como um exemplo, onde atualmente cerca de 20% dos quilômetros rodados pelo transporte público do país utilizam o biogás. Parte do sucesso nesta transformação se deve ao objetivo nacional de atingir uma frota de veículos independentes de combustíveis fósseis até 2030 e neutralizar as emissões de CO₂ até 2050 (AMMENBERG *et al.*, 2018; FALLDE; EKLUND, 2015; MAGNUSSON; BERGGREN, 2018; MUTTER, 2019). O interesse no caso Sueco é muito peculiar e específico, a transição do transporte público começou em 1990 e segue com a meta de uma frota pública livre de fósseis em 2020 (MARTIN; COENEN, 2015). Devido a uma questão política emergente, o país enfrenta uma dualidade entre manter o desenvolvimento do nicho do transporte público com o biogás (em fase de maturação), ou mudá-lo para uma frota eletrificada (um nicho ainda em fase formativa). Este problema ameaça a co-evolução dos setores de resíduos com os de transporte.

Os estudos mostram que o biogás tem uma vantagem por requerer apenas uma reconfiguração dos motores a combustão, e desvantagem por necessitar de purificação do biogás para biometano. Ainda assim, a eletrificação da frota urbana parece ser mais promissora, principalmente em territórios urbanos, pois não produzem emissões nas cidades, reduzem os ruídos e possuem eficiência energética superior (aproximadamente duas vezes maior que a dos motores a combustão) (MUTTER, 2019). O problema com a decisão de incentivar a eletrificação, é a conseqüente rejeição de outros tipos de tecnologia. A literatura aponta que neste caso, o ideal seria a consolidação de uma gama de alternativas complementares não fósseis.

Assim como as plantas de biogás nos sistemas da agricultura passaram por um reposicionamento, uma solução que abre espaço para o nicho da eletrificação, refere-se a possibilidade de reposicionamento do biogás para outro nicho de mercado. O biogás pode gradativamente ser reposicionado como solução para ambientes rurais, transportes de longa distância e transporte de bens de baixo valor (FENTON; KANDA, 2017; AMMENBERG *et al.*, 2018). Também pode ser empregado o reposicionamento para outros mercados, como por exemplo: navios e balsas, processos industriais (e.g. produção de aço) e para injeções na rede de GN, ou ainda para geração de energia para equilibrar o sistema elétrico (MAGNUSSON; BERGGREN, 2018).

Alguns fatores puderam ser destacados como impulsionadores do biogás nos setores de transportes. Talvez o mais importante seja a participação das empresas de petróleo na promoção do biogás acentuando a conexão por exemplo entre produtores e consumidores (e.g., veículos leves da administração pública, frota do transporte público, táxis e outros prestadores de serviço) através de suas distribuidoras (VERNAY *et al.*, 2013). Outro fator, são os contratos de longo prazo entre municípios e prestadores de serviço, de 8 até 12 anos, os quais conferem segurança para as companhias públicas que se adaptaram ao uso do biogás (o tempo dos contratos visa cobrir a depreciação dos veículos). Outra medida relevante diz respeito a criação de mecanismos para relacionar o preço do biogás e preço do petróleo, o que é muito bom por um lado, pois providencia um melhor controle da oferta, mas pode ser ruim pelo outro, pois causa oscilações no preço do biogás (AMMENBERG *et al.*, 2018).

Um aspecto complementar se refere aos municípios. Quando os municípios controlam as empresas de gestão de resíduos, tratamento de esgotos e energia eles podem promover o sistema de inovação em suas fases iniciais de forma mais eficiente. O mais interessante é que são os municípios, quando proprietários ou co-proprietários das usinas de biogás, que facilitam a fase de criação do nicho. Para fases mais maduras, no entanto, há uma tendência para privatização e de busca por novos modelos de negócio (MAGNUSSON; BERGGREN, 2018).

Nos setores de transportes há uma necessidade de demonstrar o potencial dos veículos de biogás de maneira sistemática (e.g., no longo prazo, na saúde pública), ao

invés de deixar a tecnologia com mercado seletivo, ou simplesmente como um substituto mais caro para o gás natural. O biogás é muito sensível neste setor diante de prioridades políticas conflitantes e mudança de objetivos estratégicos (FENTON; KANDA, 2017). Outra necessidade para a disseminação do biometano nas frotas de veículos, é manter o biometano isento dos impostos inseridos sobre o petróleo, isso pode tornar o biogás o combustível mais competitivo entre os disponíveis aos consumidores finais (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009).

A literatura considera de alta importância que produtores e usuários finais de biogás compreendam como suas ações e inações são afetados pelo setor em que operam (FENTON; KANDA, 2017). Em outras palavras, é uma excelente ideia para reduzir uma falha sistêmica identificar visualmente os veículos que utilizem biogás (MUTTER, 2019). Políticas nacionais podem afetar este aspecto, por exemplo promovendo requisitos ambientais para veículos que podem garantir ao usuário redução de impostos, vagas públicas de estacionamento sem custos, estes requisitos influenciam diretamente a escolha dos consumidores quando optam por transportes menos poluentes (VERNAY *et al.*, 2013). No entanto, no papel do consumidor, mesmo existindo uma opção menos poluente, considera-se prioritariamente a economia na hora da aquisição de um veículo ou do uso de transporte público (AMMENBERG *et al.*, 2018). Não obstante, deve haver um incentivo para revenda e aquisição de carros que rodem com gases renováveis (FALLDE; EKLUND, 2015). O uso de biogás, principalmente no transporte público serve como uma eficiente maneira de tornar visível a importância da reciclagem para os habitantes das cidade (MAGNUSSON; BERGGREN, 2018).

Um dos problemas da transição nos setores de transportes é que este tende a contar simplesmente com que as alternativas altamente poluentes sejam utilizadas para financiar soluções de desempenho superior. No entanto, políticas que observem apenas as emissões locais dos veículos, falham em captar os serviços externos (e.g., processamento de resíduos) que a produção do biogás promove. Isso ocorre em parte porque as decisões reais são tomadas por outros agentes (e.g., gerentes dos provedores de serviços de transporte, clientes que optam por diferentes combustíveis). (AMMENBERG *et al.*, 2018).

Em síntese esta seção resume que a transformação não é apenas sobre otimizar bens e serviços de transporte ou reduzir o uso de fósseis, conectando ou criando sistemas sócio-técnicos, envolve também o manejo de diversos recursos como água e resíduos de formas mais eficientes. Principalmente a reciclagem de nutrientes trata de fortalecer a integração nestes setores para que permaneçam relevantes (VERNAY *et al.*, 2013; MUTTER, 2019).

3.2.4 Biogás nos setores de energia elétrica

Estes setores são altamente complexos e compreendem as diversas formas de produção, transmissão, distribuição e consumo de eletricidade. A distribuição de energia elétrica é a etapa final no fornecimento de energia elétrica, sendo a parte do setor conectada ao subsistema de transmissão, através do qual faz-se a entrega da energia aos consumidores. Ao considerar a interação deste setor com o biogás, tem-se uma inovação radical no campo do fornecimento de eletricidade devido à dois principais fatores: a natureza descentralizada e a capaz de agir sob demanda (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009). Apesar do grande número de instrumentos políticos que influenciam tecnologias descentralizadas, o desenvolvimento destas tecnologias não têm sido uma prioridade política (LYYTIMAKI, 2018). Vale ressaltar que nem todas são descentralizadas, algumas plantas de grande porte conseguem fazer parte do mercado centralizado (e.g. Usina Biogás Bonfim da Raizen processando vinhaça e localizada Brasil, com capacidade de 20,8 MW, vendendo energia a R\$ 251/MWh).

A tecnologia para produção de biogás no contexto global já é uma das importantes para uma transição no setor de energia em busca da sustentabilidade. Contudo, o biogás ainda é mais caro do que a maioria das tecnologias estabelecidas para o fornecimento de eletricidade e gás, portanto, incentivos financeiros e apoios regulatórios desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e difusão de biogás (WIRTH, 2014).

Concessionárias distribuidoras de energia elétrica em alguns países já vendem energia verde para seus clientes. No entanto precisam lidar com a dualidade de pagar aos produtores de biogás, por sua eletricidade, um preço que esteja além do mínimo obrigatório, geralmente causando um aumento das tarifas de fornecimento, ou, regularizar as micro-redes de distribuição para agirem de forma privada. Por isso, acordos privados entre produtores de biogás e consumidores de energia, desempenham um papel muito importante no desenvolvimento destes sistemas (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009). Em alguns casos estes contratos são questionados pela sua insegurança jurídica. Em outras palavras, nos países onde a tecnologia ainda está se estabelecendo, a regulamentação não é muito clara e nem dinâmica para compreender todas as variedades de nichos que o biogás desperta.

Este modo de operação de plantas de biogás atingiu um certo grau de maturidade tecnológica de forma que a eletricidade pode ser produzida a custos que podem ser cobertos em muitos casos com pagamentos de tarifas prêmio (*feed-in tariff*) na faixa de 0,09 a 0,17 euros por kWh, dependendo, entre outros fatores do tamanho e eficiência da planta (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009). Um exemplo de aplicação mencionado na literatura se refere a Áustria: até 100 kW (16,5 centavos de Euro/kWh), 101–500 kW (14,5 centavos de Euro/kWh), 501–1000 kW (12,5 centavos de Euro/kWh) e acima de 1000 kW (10,3 centavos de Euro/kWh). Plantas que utilizam

substratos de origem urbana (e.g., restaurantes) recebem 25% a menos. A Áustria ainda incluiu um regulamento que compreende uma subvenção geral para investimentos, que pode chegar a 30% do capital investido, mais um subsídio adicional para as usinas que aproveitam o excesso de energia térmica (WIRTH, 2014).

As tarifas prêmio também sofrem de críticas por focar apenas na geração de energia elétrica, o que significa que outros usos para a energia do biogás por vezes mais eficientes, como injeção na rede de gás ou utilização direta em processos industriais, são menosprezados. Além disso, este tipo de incentivo sofre de um tipo de incoerência temporal no intervalo de tempo entre o estabelecimento de metas e o alinhamento do instrumento da política, além de incoerência interna entre a meta e os requisitos do instrumento. Não obstante cada produtor tem que negociar os termos para se conectar a rede de distribuição, o que pode ser complexo e custoso (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014).

Um problema na produção de energia com plantas de biogás é a eficiência, geralmente inferior a 60%, isso acontece porque grande parte do calor produzido não pode ser aproveitado devido à baixa demanda por calor nas proximidades das plantas (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009). Outro problema que a literatura destaca é que subsídios focados para uma parte da energia injetada na rede em um montante fixo (e.g., 999KWh na Itália) tendem a fazer com que os produtores queimem o excedente de biogás, sem utilizá-lo (CAVICCHI, 2016). Outro fator relevante para a inserção do biogás na matriz elétrica é o custo de energia para a indústria pesada, especialmente o custo da eletricidade para as indústrias florestais e metálicas. Então, estabelecer contratos de fornecimento de energia limpa para estes consumidores pode representar uma garantia de demanda no longo prazo (LYYTIMAKI, 2018; HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014).

A literatura recomenda que a escala das plantas não deve exceder 100 kWel, para que a produção de alimentos ainda permaneça o principal objetivo da agricultura. Isso acontece porquê plantas de grande porte tendem a passar por um reposicionamento para o processamento de culturas energéticas. Mas, em usinas de 500 kW também é a formação de cooperativas, e nestes casos a recomendação é incentivar um balanço entre a saída de energia e a co-digestão (WIRTH, 2014). Este argumento deixa de ter validade quando os estados definem junto ao planejamento energético, que determinada quantidade de terras aráveis de um estado devem ser utilizadas para produção de energia (e.g., Alemanha). Este tipo de objetivo ainda é controverso, pois embora acelere a difusão da tecnologia do biogás, causa desalinhamentos entre a agricultura e sua nova função como produtor de energia (MARKARD; STADELMANN; TRUFFER, 2009).

Para as concessionárias de energia ter um produtor de energia descentralizado significa duas coisas, primeiro, é um cliente a menos e segundo, é um fornecedor

que se conectado necessitará de investimento e incentivos. Este problema pode ser minimizado tornando as externalidades positivas mais visíveis. Por exemplo através da mídia, pode-se aumentar a conscientização pública e política necessária para informar, inspirar e envolver atores com a importância da adoção das energias renováveis, principalmente o biogás, pois ele apresenta externalidades positivas pouco perceptíveis aos usuários finais (e.g., processamento de resíduos, energia sob demanda, redução de emissões) (LYYTIMAKI, 2018)

3.2.5 Biogás nos setores de gás natural

Este setor também fazem parte dos sistemas energéticos, altamente institucionalizados e geralmente com setores bem distintos para produção, processamento, transporte, distribuição e consumo. O biogás, purificado para biometano possui uma composição muito similar a do GN e pode ser injetado nas redes de distribuição de GN. Porém, o maior limitante para tornar o fornecimento de gás, mais renovável é que mesmo em grandes usinas o metano da biomassa é cerca de duas a três vezes mais caro que o gás natural (MARKARD; TRUFFER, 2008). Por isso o suporte das municipalidades é essencial através de intervenções políticas que possam favorecer novos caminhos de desenvolvimento econômico regional como no caso do GN renovável(MARTIN; COENEN, 2015).

O preço baixo do GN ⁵ é destacado como um dos fatores impedindo a expansão dos sistemas de biogás, principalmente em países onde o aquecimento de residências e de outras edificações são necessários. Mesmo com novas leis especificando que o aquecimento de água de novas construções deve vir de fontes renováveis, o GN e o óleo ainda são as principais escolhas (FENTON; KANDA, 2017). Em outras palavras, onde o GN está disponível para os consumidores, o biogás não consegue competir em preço (HOPPE; SANDERS, 2014).

Uma alternativa para mitigar a dificuldade da penetração do biogás nos setores de GN é a criação de diferentes produtos a serem comercializados misturando GN com frações de biogás, por exemplo GN com 2% ou 20% de biogás. Esta discussão gira em torno do argumento que uma solução integral utilizando biogás é considerada muito custosa para os clientes das distribuidoras (FENTON; KANDA, 2017). Uma rota tecnológica que pode complementar o biogás e auxiliar a transição dos setores de GN é a gaseificação da biomassa, trata-se de uma técnica de gaseificação sob alta temperatura para conversão de praticamente qualquer tipo de biomassa, em comparação às tecnologias convencionais esta conversão pode ocorrer com maior eficiência de recursos, porém a tecnologia apresenta alguns problemas com escalabilidade e custos

⁵ No Henry Hub (mercado spot de gás natural) o preço do GN tem oscilado entre 2 a 4 USD por milhão de BTU desde 2018, em 2020 alcançou um valor próximo ao mínimo de 2,02 USD por milhão de BTU

(HELLSMARK; JACOBSSON, 2009).

A literatura demonstra que os setores de GN interagem relativamente menos com o biogás que o biogás e os setores de eletricidade. Uma solução promissora para uma melhor integração entre o biogás e GN está na possibilidade de produzir biogás liquefeito. Este líquido, basicamente é metano resfriado a $-163^{\circ}C$, que após retornar a temperatura ambiente, pode ser consumido normalmente com GN. Infelizmente a tecnologia só foi testada em operações de pequena escala e o conhecimento e métodos necessários para uma produção mais econômica ainda estão sendo desenvolvidas (MAGNUSSON; BERGGREN, 2018). Hoje a solução mais comum é o transporte de biometano em tanques pressurizados (de 80 até 250bar) na forma de GN Comprimido (GNC).

A privatização das plantas é um assunto relevante nos países que o biogás já está difundido e a injeção de biometano na rede é uma realidade. A literatura expõe que a coordenação necessária para o crescimento dos sistemas de biogás, se apoia no engajamento público e nas parcerias publico-privadas. Em um segundo momento, quando ocorre uma estabilização do sistema, a privatização torna-se relevante, pois confere mais autonomia e menos burocracia as operações (FENTON; KANDA, 2017).

Em alguns países o biogás purificado recebe o nome de gás verde (89% de metano). Utilizar o biogás para eletricidade é uma maneira pouco eficiente de utilizar biogás (pois o rendimento é apenas 40%), porém, atualizando para gás verde e injetando em uma rede de GN tem-se mais eficiência na conversão total (o rendimento é de aproximadamente 80%). No entanto, a produção de gás verde requer uma produção de pelo menos $5Mm^3$ de gás por ano ($14.000m^3/dia$) para cobrir o custo da transformação (HOPPE; SANDERS, 2014).

Em síntese a literatura expõe que para as concessionárias distribuidoras de GN o biogás pode ser visto como uma ameaça, devido a dificuldades em manter relações entre os outros sistemas produtores de biogás e os operadores de redes de gás. Por exemplo, para os atores da agropecuária o biogás é um subsistema da sua produção principal, e para os operadores das redes de gás há alta insegurança econômica ao investir em redes descentralizada de fornecedores de biometano, além de insegurança operacional devido a critérios de segurança e composição do gás (SMINK *et al.*, 2015). Além disso, a partir do momento em que é regulamentada e obrigatória a inclusão de biometano na rede de GN, a tarifa de distribuição precisa absorver os custos destas operações, o que acaba causando uma diminuição da competitividade do GN diante de suas alternativas (e.g., GLP e Biomassa).

A falha sistêmica repousa na falta de pensamento de longo prazo, onde a fonte sustentável eventualmente supera a viabilidade econômica do recurso finito. Finalmente, o princípio do 'poluidor paga' poderia se beneficiar com um ganho de legitimidade e promover uma efetiva transformação deste setor. Distribuidoras e municipalida-

des podem ser consideradas chave neste processo, pois as misturas de gás podem ser diluídas em tarifas de distribuição e as companhias poderiam se beneficiar com uma consequente redução de impostos pelo uso de gás renovável (FENTON; KANDA, 2017).

3.3 ALINHAMENTOS DO BIOGÁS COM OS SETORES ECONÔMICOS NO BRASIL

Nesta seção busca-se caracterizar o estado atual dos quatro setores da economia identificados na literatura como relevantes para o desenvolvimento da cadeia do biogás. Os setores são descritos de forma holística pois o objetivo não é especificar a importância do biogás para cada um, e sim descrever a situação atual de cada um e alguns mecanismos que os conectam a cadeia do biogás. São eles o setor de transportes e combustíveis, resíduos urbanos e saneamento, energia elétrica e agronegócio. Estes setores podem influenciar contextos de aplicação, práticas e expectativas do usuário, valores, normas características de desempenho às quais a inovação deve responder. Esta seção foi elaborada a partir dos materiais selecionados em âmbito nacional, destacados na seção de procedimentos metodológicos.

3.3.1 Setor de energia elétrica

Segundo o antigo Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o país possuía no total 7.440 empreendimentos de geração de energia em operação em maio de 2019, totalizando 164,79GW de potência instalada, que proveram cerca de 670TWh, totalizando 77GW médios de carga (Previsões para 2050 indicam 1605TWh e 197GW médios de carga (EPE, 2016)). Além disso o país contrata atualmente como importação outros 8,1GW cerca de (4,7%). Sendo as principais fontes: hidráulica (60,8%), fóssil (14,8%), eólica (8,7%) e biomassa (8,5%). Nota-se que em caso de escassez hídrica, as térmicas a gás natural assumem e as emissões de gases de efeito estufa podem aumentar significativamente (cerca de quatro vezes).

Em 2004 o Brasil passou por mudanças estruturais que estabeleceram um sistema de leilões para contratação de energia, dividido em dois mercados: Ambiente de Contratação Livre (ACL) e Ambiente de Contratação Regulado (ACR). No primeiro as relações comerciais são livremente acordadas e há o pagamento de uma Taxa de Utilização do Sistema de Distribuição (TUSD), porém só podem participar deste mercado unidades com perfil de alto consumo. No segundo, são apenas as distribuidoras de energia elétrica (veja a Figura 10) que podem adquirir energia e somente pelo sistema de leilão onde a energia mais barata é contratada. São destas distribuidoras e neste mercado que os consumidores compram energia elétrica, tendo suas tarifas reguladas pelo governo (LEUSIN, 2018).

Figura 10 – Distribuidoras de energia elétrica no Brasil



Fonte: ANEEL (2018)

Além dos mercados citados, fontes alternativas possuem oportunidade através da Geração Distribuída (GD) pela adoção do sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*). A GD foi estabelecida pela Resolução Normativa (REN) nº 482 de 2012 (alterada pela REN nº 687 de 2015 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015)) que estabelece as condições gerais para o acesso de micro-geração e mini-geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012). A GD engloba o conceito de produção de energia elétrica descentralizada. Com a GD, o consumidor, podendo gerar sua própria energia, evolui de uma posição passiva para ativa no setor elétrico. Vale destacar que estas unidades por vezes são chamadas de unidades Prosumidoras (produtoras e consumidoras), além disso, 243.259 unidades consumidoras no país já aderem a este sistema e contam por aproximadamente 3GW de potência instalada. Um fator importante para a GD é que os custos inerentes ao sistema de compensação das unidades, são dissolvidos na tarifa da distribuidora, portanto há um limite para que o incentivo não comece a onerar outros consumidores (DURÃO, 2017).

O sistema de compensação é um arranjo no qual a energia ativa injetada na rede da distribuidora, por uma unidade consumidora e produtora com cogeração qualificada

ou fonte renovável é cedida por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade. A partir de 2015 a norma enquadrou dois tipos de unidades a com micro-geração (até 75kw) e a mini-geração (até 5MW) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Como o principal caminho de comercialização do biogás é na forma de energia elétrica, os produtores que deixam de ser apenas auto-consumidores da energia produzida, precisam se enquadrar em alguma das modalidades de comercialização disponíveis (ACL, ACR, GD em Micro ou Mini). Plantas acima de 5MW podem se estabelecer no ACL e no ACR, enquanto as inferiores em mini ou micro GD. Segundo o novo Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) lançado em março de 2020 para substituir o Banco de Informações de Geração da Agência (BIG), o país possui 40 usinas de biogás outorgadas no ambiente regulado que somam 196MW de potencia instalada e outras 205 unidades consumidoras no sistema de compensação, somando outros 42 MW. No sistema de informações, as potências instaladas de biogás são apresentadas de acordo com subníveis. O biogás faz parte do nível biomassa, posteriormente dos subníveis agroindustrial, resíduos animais e resíduos sólidos urbanos.

A capacidade instalada da fonte biomassa em 2018 é apresentada na Figura 11. Nota-se que os subníveis com maior participação são: bagaço da cana-de-açúcar e licor negro, mas também que a participação do biogás como fonte de energia elétrica é dominada pela fonte RSU. Nestes ambientes de contratação apenas 8 dos 26 estados do Brasil possuem alguma usina a biogás, alguns possuem apenas uma como Pernambuco e Bahia. Também é possível observar que as duas maiores usinas (Termoverde Caieiras e São João Biogás) estão no estado de São Paulo, seguidas por uma no Rio de Janeiro (Nova Iguaçu) e outra na Bahia (Salvador), e juntas as quatro contam por 40% da potência oriunda do biogás.

Outro fator muito relevante para a GD é que atualmente as distribuidoras de energia elétrica podem atender até 10% de sua carga através de projetos de GD, sendo também limitadas por um Valor de Referência Específico (VRES) estipulado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) ⁶ e calculado pela EPE. Em 2014 o preço máximo de compra de energia elétrica proveniente do biogás era de R\$169,00/MWh em 2018 este valor passou para R\$390,00/MWh. Ainda, para Resíduos Sólidos Urbanos, o valor máximo estipulado é de R\$ 561,00/MWh. Vale destacar que o biogás possui VRES menor que a energia solar fotovoltaica com VRES de 454R\$/MWh.

De acordo com os argumentos apresentados nesta seção a Tabela 7 resume algumas das oportunidades e desafios do biogás nos mecanismos de contratação de energia outorgados no Brasil.

⁶ Portaria N 65, de 27 de Fevereiro de 2018

Figura 11 – Biomassa na matriz elétrica

Biomassa na matriz elétrica Brasileira				
Subnível 1	Subnível 2	Número de Usinas	[kW]	Participação na capacidade do país [%]
Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	407	11.352.402	6,5636
	Biogás-AGR	3	7.951	0,0046
	Capim Elefante	2	31.700	0,0183
	Casca de Arroz	13	53.333	0,0308
Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,0002
	Óleos vegetais	2	4.350	0,0025
Florestas	Carvão Vegetal	8	48.197	0,0279
	Gás de Alto Forno - B	12	127.705	0,0738
	Lenha	5	36.715	0,0212
	Licor Negro	18	2.542.616	1,4701
	Resíduos Florestais	58	434.117	0,251
Resíduos animais	Biogás - RA	14	4.481	0,0026
Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RU	22	154.667	0,0894
	Carvão - RU	2	5.250	0,003

Fonte: Adaptado do BIG em 2019

O Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) instaurou convênios para diminuir a tributação de Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) em algumas modalidades específicas. Para o caso do setor de energia elétrica, podem ser destacados dois convênios ⁷.

O convênio ICMS 06/19 de 13 de março de 2019 estabelece que os Estados do Pará e Paraíba são autorizados a conceder isenção do ICMS nas saídas internas de biogás proveniente de aterros sanitários quando utilizado como matéria-prima na geração de energia elétrica. Em complemento, segundo o convênio ICMS 109 de 21 de Outubro de 2014, alterado pelo convênio ICMS 203/19, de 13 de Dezembro de 2019, ficam os Estados do Amapá, Bahia, Ceará, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Pará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Roraima, Santa Catarina e São Paulo autorizados a conceder diferimento do ICMS incidente

⁷ consulta em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2019>

Tabela 7 – Biogás e o mercado de energia elétrica

Tipo de contrato	Oportunidades	Desafios
ACR	Contratos de longo prazo Financiamento Ganhos de escala Ganhos de escala	Requisitos de habilitação Comprovação do combustível Competição com outras fontes Compromissos e penalidades
ACL	Baixo risco de inadimplência Flexibilidade de contratação Autoprodução	Demanda das distribuidoras Financiabilidade Contratos mais curtos
GD	Consumidores especiais Maior flexibilidade as distribuidoras Possibilidade de ter VRES compatível Até 10% do mercado cativo	Competitividade Queda da demanda (sobre contratação) Adesão das distribuidoras
Micro e Mini GD	Arranjos flexíveis Reduzida burocracia Pequena escala (investimentos acessíveis)	Não envolve comercialização Financiabilidade Vantagem depende da tarifa da concessionária local

Fonte: EPE, 2017 apud DURÃO, 2017

nas operações de aquisição (e.g., grupos eletrogêneos de 1MW no caso do biogás) interestaduais destinados à captação, geração e transmissão de energia solar ou eólica, bem como à geração de energia a partir de biogás, incorporadas ao ativo imobilizado de estabelecimentos geradores.

3.3.2 Setor de transportes e combustíveis

As emissões deste setor fazem parte das emissões do setor energético e contam por cerca de 45,8% das emissões de GEE do Brasil, poluindo mais que a produção de energia elétrica. Em Janeiro de 2020 a produção de petróleo e GN do país alcançaram 3.97 milhões de barris por dia e 137.78 milhões de metros cúbicos por dia respectivamente. Soma-se a isso a produção de biocombustíveis como, 5,8 milhões de metros cúbicos de biodiesel, 8,9 milhões de metros cúbicos de etanol anidro e 21,3 milhões de metros cúbicos de etanol hidratado. Vale ressaltar que o país ainda importa derivados de petróleo (e.g., diesel e gasolina).

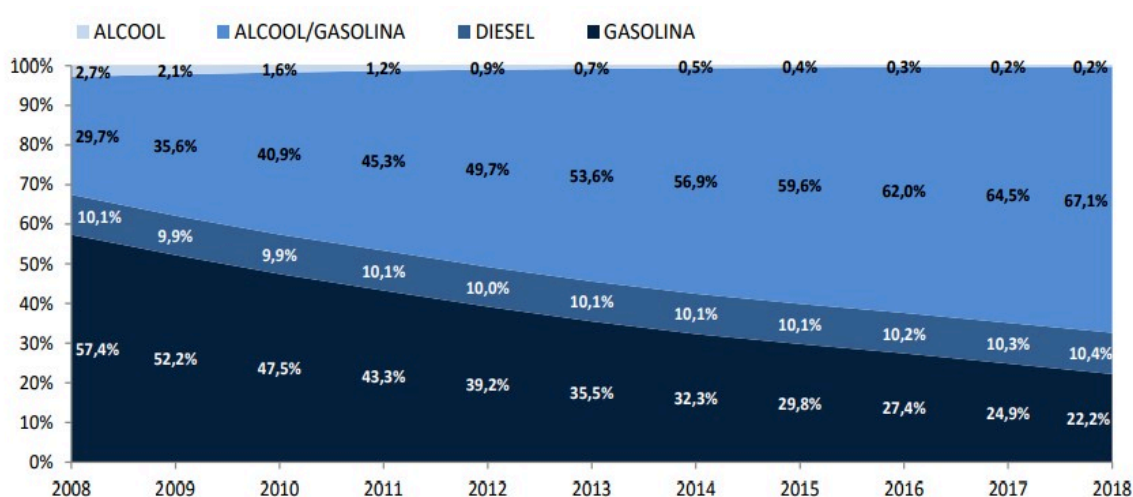
O setor de transportes apresenta um grande problema particular por concentrar as emissões em grandes cidades. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (SINDIPEÇAS) a frota circulante de automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus em 2018 era de aproximadamente 44,8 milhões de unidades. O crescimento sobre o ano anterior foi de 1,9% e a projeção para 2026 indica 52 milhões de veículos (EPE, 2018). Estes número se tornam interessantes quando considera a hipótese de transformar parte da frota para operar com GN, que em outras palavras significa criar um mercado promissor para o comércio de

biometano.

Uma característica importante da frota brasileira é que a média de idade da frota é relativamente alta de 9 anos e 8 meses, que aumentou cerca de um ano de 2014 para 2019. A frota tem pouca representatividade de veículos novos, apenas cerca de 28% da frota de veículos tem até 5 anos de idade, já 17% tem mais de 16 anos. Em síntese a média da idade da frota crescendo, significa que continua-se utilizando veículos ineficientes por um longo período, o que pode ser considerado uma vantagem para a conversão da frota para GN. Seguindo a distribuição da frota por estados, o estado de São Paulo se destaca concentrando 30,39% da frota, seguido por Minas Gerais (11,93%) e Paraná (7,72%).

Sobre os combustíveis utilizados, em 2018, os veículos flex (Álcool/Gasolina) representaram quase 67,1% da frota total, e os veículos a gasolina, 22,2%. Somados, chegam a quase 90% de todos os automotores circulantes. Os veículos movidos a Gás Natural Veicular (GNV), os tetrafuel e os híbridos elétricos, segundo o Sindipeças, não são representativos e, por conta disso, não estão contidos no gráfico. Embora o número de veículos híbridos e elétricos não aparecem no gráfico devido a sua baixa representatividade no total, já somam 11.038 unidades, ou 0,025% da frota total. A Figura 12 ilustra a evolução da frota por combustível (automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus). O fato de possuir muitos carros Flex-fuel impulsiona a indústria da cana, que por sua vez tem grande potencial na produção de biogás.

Figura 12 – Frota por combustível



Fonte: Sindipeças (2018)

Ao longo de 2017, 130 mil motoristas converteram seus carros para utilizar o GN, um crescimento de 45% em relação a 2016. A situação econômica explica essa evolução: entre Junho e Dezembro do ano passado, os preços da gasolina e do etanol subiram mais de 15%. Já o GN, 3,73%. Segundo dados da Associação Brasileira das

Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS) cerca de 2 milhões de carros no Brasil já podem circular com o GN (ABEGÁS, 2019). Não obstante, empresas como a Iveco estão investindo em frotas pesadas movidas a gás natural. Por parte da literatura, é importante salientar que o biometano como combustível veicular apresenta a maior taxa de retorno para o investimento (ANGELIDAKI *et al.*, 2018).

Conforme a Resolução ANP nº 8, de 30 de Janeiro de 2015, será tratado de forma análoga ao GN. Além disso, a Resolução ANP Nº 685, de 29 de Junho de 2017, estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015b,a).

Com a qualidade regulamentada, injetar biometano nas rede de GN tornou-se uma possibilidade. Para que isso aconteça são necessários mecanismos que obriguem as autarquias responsáveis pela distribuição canalizada de gás a lançar chamadas públicas para aquisição de gás natural renovável, por exemplo o biometano. Alguns estados já criaram estes mecanismos, por exemplo: São Paulo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Este mecanismo é muito importante para dar segurança para o mercado privado investir na cadeia do biometano, devido aos altos custos associados a purificação do biogás para biometano (DURÃO, 2017).

O Brasil possui vinte e cinco distribuidoras como ilustra a Figura 13. Vale ressaltar que o país produz cerca de 111Mm³/d de GN, oferta para o mercado cerca de 50%, enquanto importa outros 29Mm³ (maior parte vem da Bolívia através do GasBol, enquanto cerca de 15% vem pelo transporte marítimo na forma de Gás Natural Liquefeito (GNL) ⁸.

Como a distribuição de GN é concentrada no litoral do país, o acesso as fontes de biogás, geralmente situadas no interior dos estados, é em partes limitado pela logística e infraestrutura. Quando a alternativa de negócio com a distribuidora é favorável, tem-se o exemplo da Usina Cocal (processamento de cana) com a Gas Brasileiro (distribuidora de gás de São Paulo) que formaram um gasoduto de biometano dedicado para região de Presidente Prudente ⁹. Contudo, quando não é favorável, os produtores de biometano podem distribuir seu produto sem utilizar das redes de GN, utilizando então de caminhões para transportar o biometano comprimido ou liquefeito até os consumidores ou intermediários, como indústrias ou postos de abastecimento.

Em outros casos como no Rio Grande do Sul a Sulgás já realiza chamadas

⁸ GNL é uma forma de transportar o GN, basicamente resfriando-o a temperaturas criogênicas (-163°C), o que diminui seu volume em cerca de 600 vezes.

⁹ <https://www.saopaulo.sp.gov.br/sala-de-imprensa/release/estado-de-sao-paulo-e-pioneiro-em-sistema-de-distribuicao-de-biogas-2/>

Figura 13 – Distribuidoras de gás canalizado



Fonte: Abegás (2018)

públicas para contratar suprimento de biometano. Outro exemplo está no Ceará onde a Cegás compra o biometano de um grande aterro e distribui pela sua rede, possuindo como produto um gás renovável. Alguns estados ao criarem suas leis do biogás, buscam regulamentar a distribuição de biogás de forma canalizada, o estado do Paraná por exemplo posicionou o biogás como não sendo monopólio das distribuidoras, apenas o biometano faz parte da concessão destas autarquias. Permitir a distribuição de biogás por gasodutos valida projetos de múltiplos produtores de biogás em cooperação para produzir energia, como por exemplo os projetos com produtores de suínos em Itapiranga/SC e Entre Rios do Oeste/PR.

Novamente para este setor, existem convênios estabelecidos pelo CONFAZ. Segundo o convênio ICMS 112 de 13 de março de 2013, alterado pelo convênio 24 de 8 de Abril de 2016, ficam os Estados da Bahia, Mato Grosso, Rio de Janeiro e São Paulo autorizados a conceder redução da base de cálculo do ICMS nas saídas internas com biogás e biometano, de tal forma que a carga tributária do imposto resulte na aplicação do percentual de 12% sobre o valor da operação. Além deste, há mais um segundo, o convênio ICMS 63, de 27 de Julho de 2015, alterado pelo convênio 13 de 13 de março de 2019, os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina são autorizados a conceder crédito presumido de até 12% calculado sobre o valor das aquisições internas de biogás e biometano, sendo esta isenção praticável apenas pelas distribuidoras locais.

Outra oportunidade para o biometano no setor de transporte e biocombustíveis

se refere a nova lei dos biocombustíveis que entrará em vigor em 2020 (RenovaBio). A lei visa precificar os biocombustíveis de acordo com o cálculo da pegada de carbono do ciclo de vida de cada biocombustível. O programa cria um mercado de certificados associado a redução das emissões de CO₂, são denominados Crédito de Descarbo-nização (CBIO), o biometano por exemplo, por apresentar características renováveis e sanitárias, possui o a menor pegada entre os combustíveis considerados pelo programa (e.g, etanol e biodiesel) (MARIANI, 2018). Segundo a autora, a política não iria considerar o biometano quando foi proposta, com a legitimidade imposta pelo setor de biogás, ele foi incluído. Alguns fatores podem ser observados que dificultam os projeto de biometano a participar da produção de CBIOs:

- Considera somente os produtores de biometano e não os pequenos produtores de biogás, que também deveriam ser produtores de CBIOs;
- Considera o ciclo de vida do biometano como positivo em emissões (5-10 gCO₂eq/MJ), quando poderia ser negativo;
- Alto custo da certificação para se tornar um produtor de CBIOs;
- Apenas as distribuidora de combustíveis líquidos precisarão adquirir este créditos, a obrigação deveria ser estendida para as distribuidoras de GN.

O setor de transportes no longo prazo deve reduzir os consumos de diesel e gasolina, optando por fontes de gás natural, seja fóssil ou sustentável. Destacar o biometano para frotas pesadas e transporte público, pode ser uma chance do país diminuir consideravelmente as emissões deste setor, bem como dos setores de resíduos urbanos, saneamento e agronegócio.

3.3.3 Setor de saneamento

No Brasil, o saneamento básico é um direito assegurado pela Constituição e definido por lei (Lei nº. 11.445/2007) como o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais. Pode-se dividir este setor em três setores que o fazem interagir com o biogás são eles: RSU, RA e o setor das ETE (ABIOGÁS, 2018). A seguir estes setor são melhor detalhados, tendo em vista que este setor engloba o suprimento de matéria prima para produção de biogás.

No levantamento do número de plantas de biogás de 2019, haviam 416 plantas no setor RA, 43 plantas entre RSU e ETE, e ainda outra origem definida como RI (Resíduos Industriais) com 62 plantas. Sendo que do total estimado da produção de biogás em 1.34 bilhões de metros cúbicos por ano, 76% teve origem em ETE ou

RSU (CIBIOGÁS, 2020). Devido a relevância em termos de volume, estes setores são abordados por primeiro.

3.3.3.1 Resíduos sólidos urbanos

Devido ao crescimento populacional e o crescimento baseado em expansão territorial no Brasil, os resíduos sólidos urbanos são um dos maiores problemas de sua sociedade. Embora os RSU representem apenas 3% das emissões do país, as emissões estão concentradas próxima a grandes cidades, causando problemas localizados. A Lei nº 12.305/10, que institui a PNRS apresenta instrumentos importantes para evitar o manejo inadequado dos resíduos, por exemplo a coleta seletiva e princípios de logística reversa. No entanto, de forma pragmática, a política ainda não alterou a realidade precária na gestão de resíduos do país (DURÃO, 2017). Vale ressaltar que a hierarquização da gestão de resíduos indica soluções como redução, reuso, reciclagem, recuperação, e aí então os aterros sanitários, idealmente com aproveitamento energético.

Segundo o Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018 publicado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, a massa de resíduos domiciliares indicam um valor médio de coleta per capita brasileiro de 0,96 kg/hab./dia. Com isso estima-se que foram coletadas 62,78 milhões de toneladas por ano ou 172,0 mil toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros. O relatório ainda aponta que a massa coletada de resíduos recicláveis foi de apenas 14,4 kg/hab./ano, equivalente a 1,7 milhão de toneladas coletada seletivamente em 2018. Isto significa dizer que, para cada 10 kg de resíduos disponibilizado para a coleta, apenas 411 gramas são coletadas de forma seletiva. A coleta seletiva embora apresente alguns avanços, ainda se encontra num patamar muito baixo (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2018a).

Quanto à destinação das 62,78 milhões de toneladas de resíduos coletados, houve uma recuperação de 124 mil toneladas, recebidas em 70 unidades de compostagem e 1,05 milhão de toneladas de resíduos recicláveis em 1.030 unidades de triagem. Este último representando 1,7% do total de resíduos domiciliares e públicos coletados no país, ou 5,6% da massa total potencialmente recuperável de recicláveis secos, o que perfaz um índice de apenas 7,37 kg/hab./ano de resíduos recuperados (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2018a).

Desta forma, ao se estimar a massa total de disposição final, obtém-se o resultado de aproximadamente 46,68 milhões de toneladas dispostas em aterros sanitários, o que corresponde a 75,6% do total aproximado (61,73 milhões de toneladas). Além disso, contabilizou-se 15,05 milhões de toneladas dispostas em unidades de disposição final consideradas inadequadas (aterros controlados e lixões), que correspondem juntas a 24,4% do total disposto em solo em 2018

(SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2018a). O diagnóstico ainda aponta um valor de médio de R\$130,47 por habitante, ou seja, um gasto aproximado de R\$ 22 bilhões para o manejo de resíduos sólidos urbanos em todo o país, empregando 333 mil trabalhadores. Ainda assim, a fragilidade da sustentabilidade financeira se mantém no setor, uma vez que apenas 47,0% dos municípios fazem cobrança pelos serviços, e o valor arrecadado cobre somente 54,3% dos custos. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) dos 5.570 municípios, 3.331 sequer destinam seus resíduos para aterros sanitários (ABRELPE, 2017).

Geralmente, a geração de biogás em aterros, inicia-se após a disposição dos resíduos sólidos, encontrando-se, registros de metano ainda nos primeiros três meses após a disposição, podendo continuar por um período de 20, 30 ou até mais anos depois do encerramento do aterro. A maioria das Prefeituras Municipais ainda não dispõe de recursos técnicos e financeiros para solucionar os problemas ligados à gestão de resíduos sólidos. Ignoram-se, muitas vezes, possibilidades de estabelecer parcerias com segmentos que deveriam ser envolvidos na gestão e na busca de alternativas para a implementação de soluções. Raramente utiliza-se das possibilidades e vantagens da cooperação com outros entes federados por meio do estabelecimento de consórcios públicos nos moldes previstos pela Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e Lei de Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005) e de seus respectivos decretos de regulamentação, Decreto nº 7217/2010 e Decreto nº 6.017/2007). Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGAS) As plantas que processam resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto representam 8% do total das plantas de biogás em operação no país, porém, são responsáveis por 76% do biogás produzido no Brasil (CIBIOGÁS, 2020).

3.3.3.2 Estações de tratamento de esgoto

Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto de 2018, é possível observar o quão distante o Brasil se encontra de uma situação ideal na universalização do saneamento. O relatório mostra que 52,4% dos brasileiros possui acesso à rede coletora de esgoto, ou seja, 47,6% do esgoto coletado não é tratado. Desse modo, aproximadamente 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo no país. O Brasil possui 325,6 mil quilômetros de redes de coleta de esgoto, às quais se conectam 32,5 milhões de ligações de esgotos e cabe ressaltar, que o volume de esgotos tratados foi de 4,30 bilhões de metros cúbicos em 2018. (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2018b). Sendo que do volume coletado apenas 45,1% dos esgotos do país são tratados. A Tabela 8 ilustra o crescimento da coleta de esgoto e da produção de RSU até 2050. O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASB) prevê ainda que até 2033 a coleta passe para 92%, o que

fará o consumo de energia do setor também aumentar (ABILOGÁS, 2018).

Tabela 8 – Projeção do volume de resíduos produzidos no Brasil

Ano	Taxa de Atendimento de Esgoto Domiciliar [%]	Volume de Esgoto Coletado [10^6 m^3]	Produção de RSU [10^6 m^3]	Produção diária per capita [kg/hab.dia]	Fração orgânica do RSU [%]
2013	67	8.429	73	0,99	56
2020	75	10.090	82	1,06	52
2030	88	12.607	94	1,16	46
2040	100	14.747	105	1,26	39
2050	100	14.667	113	1,38	30

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Algumas soluções ambientais tecnológicas já são aplicadas neste setor, como por exemplo a implantação de técnicas de tratamento de resíduos orgânicos (compostagem ou biodigestão anaeróbica) pelos municípios, fazendeiros, cooperativas e indústrias (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018). Neste setor o biogás é uma oportunidade para que ETEs reduzam seu consumo de energia, que em 2018 alcançou o montante de 1,4 TWh (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2018b). Vale ressaltar que o aproveitamento energético do biogás em ETEs está intimamente relacionado com a melhoria no processo de tratamento de efluentes. Para que a produção de biogás ocorra em maior escala, é necessário que a ETE possua determinadas características, a exemplo do tratamento primário de esgoto, e o afluente deve ter condições ideais para o metabolismo das bactérias metanogênicas, tais como impermeabilidade ao ar, composição do substrato, teor de água, temperatura e pH (PECORA, 2006).

Ainda segundo as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Mudanças do Clima (Lei 12.187/2009) a quantificação da emissão evitada de metano em processos que geram biogás, ao realizar a recuperação do metano para produção de energia, podem ser utilizada como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Emitindo assim, Reduções Certificadas de Emissões (RCE), comercializáveis em bolsa.

Para efeito prático, em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) convencional, tem-se as seguintes etapas: pré-tratamento para separação dos sólidos, tratamento primário, tratamento secundário (com reatores de forma aeróbica e anaeróbica), tratamento do lodo, tratamento terciário (e.g., microfiltração, osmose reversa e ultrafiltração). Quando não há recuperação de biogás com o lodo residual, este é levado para aterros (ABILOGÁS, 2018).

Ainda pode-se ressaltar que o Brasil possui também autarquias para este setor, segundo a Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento (AESBE), existem 26 companhias de distribuição de água e coleta de esgoto nos Estados Federativos. A figura 14 identifica estas companhias.

Figura 14 – Companhias de Saneamento Básico



Fonte: Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento, 2020

3.3.3.3 Resíduos Agrossilvopastoris

A principal fonte de substrato utilizada para produção de biogás em sistemas de biodigestão no Brasil é a agropecuária, representando 80% das plantas em operação no país, por outro lado, sua contribuição no volume total de biogás do país é de 12% (CIBIOGÁS, 2020). A agroindústria será o principal vetor de crescimento econômico do País até 2027 (EPE, 2018). A agricultura e a pecuária, são as principais forças da economia brasileira e respondem por um em cada três reais gerados no país, sendo responsável por 40% do PIB, 42% das exportações totais e 37% dos empregos brasileiros (ABIOGÁS, 2018).

A divisão dos RA possui duas principais subdivisões: resíduos de culturas e de animais (suínos, bovinos e aves). Uma estimativa foi feita em 2012 a partir das treze culturas com maior área cultivada no país, e indicou um total de 291 milhões de toneladas de resíduos por ano, sendo a cana de açúcar responsável por 69%. Com relação aos resíduos animais, os números são ainda maiores, a criação de animais confinados respondeu por 365 milhões de toneladas por ano, enquanto a criação extensiva 1.335 milhões de toneladas (IPEA, 2012).

O agronegócio é responsável por 69% das emissões de GEE do país. Neste montante estão incluídos os poluentes decorrentes do processo digestivo dos rebanhos, o tratamento e à disposição de resíduos vegetais e animais, o uso de fertilizantes e o desmatamento para abertura de novas áreas para a atividade econômica (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018). Se consideradas apenas as atividades de agricultura e de pecuária, já responderiam por um quarto das emissões de GEE nacionais brutas. Além disso, o setor é um grande consumidor de energia, sendo responsável

por 37% do consumo de energia brasileira, ou aproximadamente 190 TWh (ABIOGÁS, 2018).

Neste contexto o governo brasileiro possui o Plano ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O plano é uma política pública que apresenta o detalhamento das ações de mitigação e adaptação às mudanças do clima para o setor agropecuário, e aponta de que forma o Brasil pretende cumprir os compromissos assumidos de redução de emissão de GEE neste setor. No entanto o plano é vigente apenas até 2020. O plano é composto por sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação, e ainda um último programa com ações de adaptação às mudanças climáticas.

- Programa 1: Recuperação de Pastagens Degradadas;
- Programa 2: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs);
- Programa 3: Sistema Plantio Direto (SPD);
- Programa 4: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN);
- Programa 5: Florestas Plantadas;
- Programa 6: Tratamento de Dejetos Animais;
- Programa 7: Adaptação às Mudanças Climáticas.

Finalmente o plano reconhece que no longo prazo, os prováveis impactos advindos com as mudanças climáticas poderão comprometer de forma expressiva a atividade agrícola do país. Como por exemplo o regime de chuvas, que já causa problemas de abastecimento ao redor do país.

Além destes fatores, alguns números ilustram o crescimento esperado neste setor. Os números para os estoques de animais no Brasil devem crescer abruptamente nos próximos anos, principalmente devido ao crescimento da demanda internacional. Mais especificamente sobre as plantações, o crescimento da produção de cana-de-açúcar, milho e soja também será bastante expressivo. A Tabela 9 apresenta alguns números verificar o crescimento da capacidade deste setor.

Agora que os setores econômicos foram explorados, firmou-se o contexto onde o modelo de simulação para expansão da capacidade de produção de biogás do STIBB será desenvolvido. Em síntese, temos um país em crescimento, que já enfrenta problemas relacionados a sustentabilidade de seus setores. Mas o mais importante é compreender que estes problemas estão se agravando e pouco tem sido feito para minimizá-los. A próxima seção adentra os procedimentos metodológicos adotados para conceber o modelo de dinâmica de sistemas.

Tabela 9 – Volume de produção do agronegócio

Ano	Cana [10 ⁶ t]	Milho [10 ⁶ t]	Soja [10 ⁶ t]	Bovinos [10 ⁶ un.]	Bovinos Leite [10 ⁶ un.]	Suínos [10 ⁶ un.]	Aves [10 ⁶ un.]
2010	601	55	68	209	22	38	1.238
2020	688	89	109	237	25	44	1.514
2030	879	120	158	234	27	53	1.873
2040	980	174	247	254	34	71	2.550
2050	1.030	244	370	268	40	91	3.350

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2018)

3.3.4 O sistema de inovação do biogás do Brasil

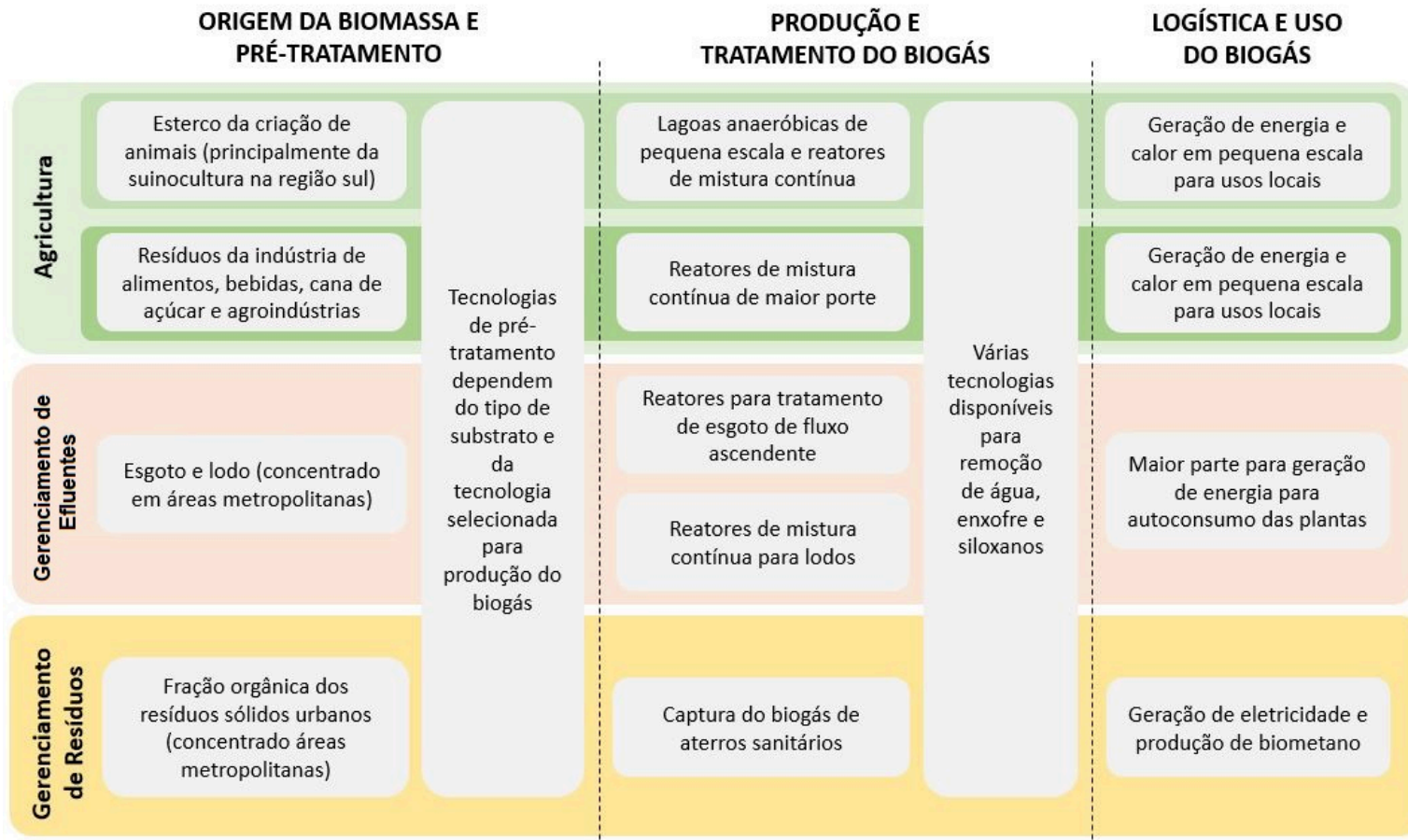
O STIBB não é exatamente novo, na verdade este já passou por diversas fases e estas fases já foram muito bem caracterizadas (veja (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019)). O objetivo desta seção é encontrar indícios da fase atual do SI em termos transformativos (formativa, expansão, maturação, declínio (MARKARD, 2018)) para fundamentar as análises funcional e prospectiva.

Nos anos 70 o biogás começou a fazer parte de uma Revolução verde, paradigma da atual economia mundial de produção de alimentos. Entretanto, ao contrário de outras tecnologias, o biogás não prosperou. Por diversas razões como o atrelamento do biogás aos preços do petróleo, que ao despencar desestimulou o uso do biogás, manejo dos dejetos de animais era conduzido sem nenhum critério, as instalações feitas de aço foram corroídas pelo ácido sulfídrico. O biogás só voltou a aparecer pelas iniciativas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo proposto no protocolo de Quito, porém neste momento o biogás era desperdiçado, os créditos de carbono eram cedido pela queima do biogás e não pela utilização de sua energia.

Os substratos com alto potencial para a produção de biogás no Brasil estão divididos em quatro grupos, chamados de rotas tecnológicas diferentes, devido as especificidades dos métodos e processos empregados (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019). A Figura 15 destaca estas rotas, subdivididas pela origem do substrato, processos de tratamento e modelos de negócio mais comumente empregados. O centro da inovação tecnológica do biogás são as tecnologias de produção e tratamento, que exigem biodigestores específicos, leveduras e tecnologias para remoção de água, enxofre, siloxanos e dióxido de carbono, mas em um SI a análise observa também as atividades relacionadas. São as atividades, em três categorias principais: uso de matéria-prima (fornecimento e logística), produção e tratamento de biogás (tecnologia) e a destinação do biogás (logística). Olhando de cima (*Upstream*) o SI introduz várias categorias de atores, como os relacionados com saneamento básico, utilidades, agricultores e agroindústrias; diferentes tipos de regras, de saneamento, do mercado agrícola e a legislação ambiental; e uma variedade de aspectos materiais, como esgoto, água, fração de RSU, esterco, vinhaça, reatores, aterros e lagoas de tratamento. A parte inferior

da cadeia (*downstream*), inclui empresas de energia, de engenharia, energia e gás natural, regulamentações, e tecnologias como geradores, compressores e sistemas de gás.

Figura 15 – Principais rotas tecnológicas do STIBB



Fonte: Adaptado de De Oliveira e Negro (2019)

A fonte mais rica de informação sobre o setor esta na proposta do Programa Nacional do Biogás e Biometano Abiogás (2018). A primeira proposta foi elaborada em 2015, o princípio fundamental que norteou a elaboração da Proposta foi o de não buscar obter para o biogás nenhuma exclusividade ou benefícios excepcionais, mas estabelecer condições específicas para torná-los fontes energéticas seguras, com qualidade e disponibilidade firme, de forma a fazê-los atrativos tanto para potenciais produtores e usuários, quanto para investidores e para o Governo, em seu papel intransferível de agente gestor e regulador de todas as fontes energéticas que venham integrar oficialmente a matriz nacional.

O programa é direcionado ao Governo Federal, na forma de política pública, a ser planejado, orientado e monitorado por um Comitê Interministerial, formado por representações de Ministérios com ações correlatas ao tema, com participação da sociedade civil representativa no tema, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia.

Seu objetivo principal é promover no Brasil um cenário institucional, econômico, normativo e regulatório, que proporcione condições favoráveis e estáveis necessárias para referenciar, estimular e assegurar a produção e aplicações do biogás e do biometano como fontes energéticas renováveis, integradas a matriz energética nacional, contribuindo para a oferta territorial local e regional de energia elétrica, térmica e combustível, para promover a eficiência energética e a sustentabilidade de setores produtivos e para a inclusão social produtiva, com a geração de renda e empregos.

Segundo a proposta, as principais potencialidades para o biogás como fonte energética no Brasil se refletem:

- Na disponibilidade em larga escala de biomassa e resíduos orgânicos, com capacidade de estocagem;
- Nas externalidades socioambientais positivas, como, por exemplo redução de gases de efeito estufa, redução na emissão de particulados, sustentabilidade das atividades geradoras, energia renovável não intermitente, geração descentralizada regional, interiorização do metano, geração de economia e renda, capacitação e treinamento de trabalhadores, produção de biofertilizantes, rota de produção de hidrogênio, entre outros;
- Na produção de energia de base, com flexibilidade para atendimento em momentos de ponta e como complemento para outras fontes de energia;
- Na escalabilidade, uma vez que pode ser produzido desde a micro até a média e grande escala;
- Na sustentabilidade, já que sua origem se dá em processos de saneamento ambiental das atividades produtoras de resíduos e efluentes orgânicos;

- Na flexibilidade como fonte energética para uso elétrico, térmico e combustível;
- Na armazenabilidade, que proporciona seu uso como acumulador, ou bateria em situações combinadas com outras fontes energéticas intermitentes como solar e eólica;
- Na intercambiabilidade com Gás Natural, já regulamentada, para injeção em gasodutos, assim como para uso dos mesmos kits e processos de conversão de motores a explosão interna.

Segundo o PNBB, tendo em vista a iniciativa do RenovaBio e a compreensão dos mais diversos setores da relevância do biometano, estima-se que até 2030 será possível alcançar uma produção de 32 milhões de metros cúbicos por dia de biometano, trazendo mais sustentabilidade às atividades urbanas e do agronegócio brasileiro.

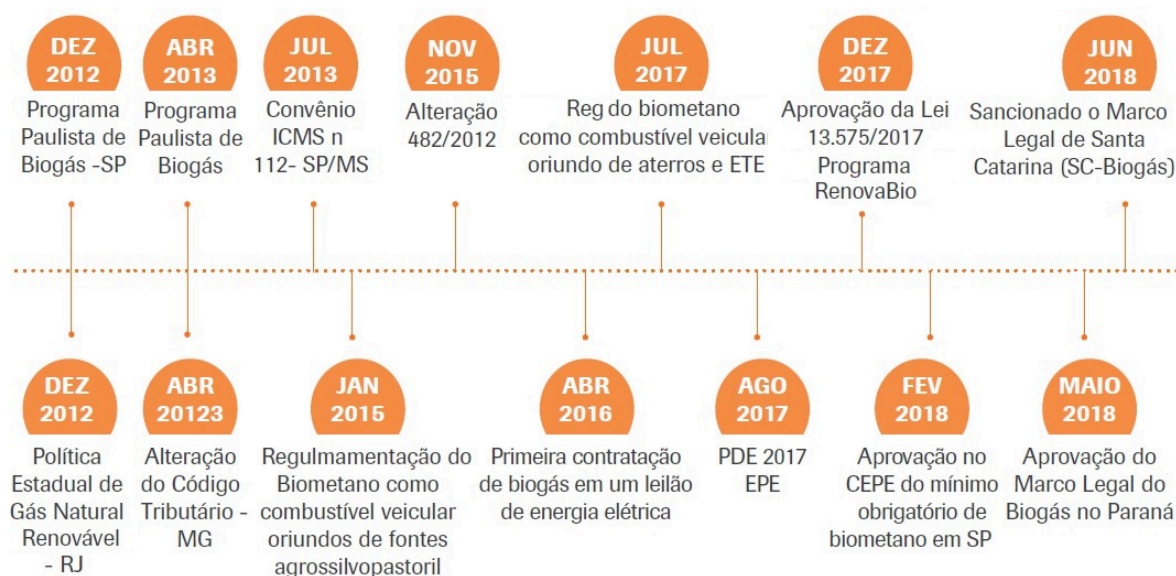
A partir de uma análise de eventos históricos, utilizando também como lente de pesquisa a teoria dos SIs, o Brasil passou por quatro fases de exploração e experimentação do biogás, caracterizadas por altos e baixos. Mas pode-se argumentar que é nos últimos anos que as experimentações se consolidaram realmente em um sistema (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019). São as fases destacadas:

- A primeira fase (1979-1986) ocorre como consequência de crises como o aumento do preço do petróleo e uma pressão por serviços sanitários, cerca de três mil biodigestores de pequena escala foram instalados nesta fase;
- A segunda fase (1987-2002) foi acompanhada de contextos turbulentos, os preços do petróleo retrocedem, uma nova constituição é estabelecida, ocorre a liberalização dos mercados, a lei de concessões, o álcool ganhando presença na matriz do país, contextos que acabaram se sobrepondo ao interesse pelo biogás.
- A terceira fase (2003-2011) incorporou soluções significativas relacionadas a manutenção do meio ambiente a partir de reformas em políticas de ciência e tecnologia, energia, gás natural e resíduos. Além disso esta é a fase onde os índices econômicos do país estavam elevados e o protocolo de Quioto intensifica o mercado de créditos de carbono. Estes contextos criaram maior estabilidade para experimentação com biogás, quando o país começa a explorar diferentes rotas tecnológicas para sua produção, como em aterros e na suinocultura.
- A quarta fase (2012-2016) começa a criar estruturas importantes para o biogás, como a criação do Centro Internacional do Biogás (CIBiogás) e a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) além de regras para geração distribuída, parcerias com outros países, leis estaduais para o biogás, valorização do digestato (efluente do processo de bio-digestão) como fertilizante, reconhecimento do biometano como combustível pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

No entanto esta fase enfrentou diversos problemas que dificultaram a difusão do biogás, como os preços do petróleo caindo novamente, o país entrando em crise econômica e política, a dependência da energia hidráulica é sentida nos preços da energia elétrica. Esta fase mesmo com avanços em regulamentações e instituições, foi freada pelo contexto econômico.

Como complemento sobre a quarta fase, um fator importante foi a primeira Proposta de Programa Nacional de Biogás e Biometano (PNBB) que junto dos atores, os esforços dos Estados e da Federação determinaram uma Nova Era do Biogás no Brasil, que hoje se encontra regulamentado e com projeção nacional. A Figura 16 destaca alguns dos acontecimentos importantes, especificamente desta fase. Há ainda eventos mais recentes que sustentam uma nova era.

Figura 16 – Acontecimentos da Nova Era do Biogás



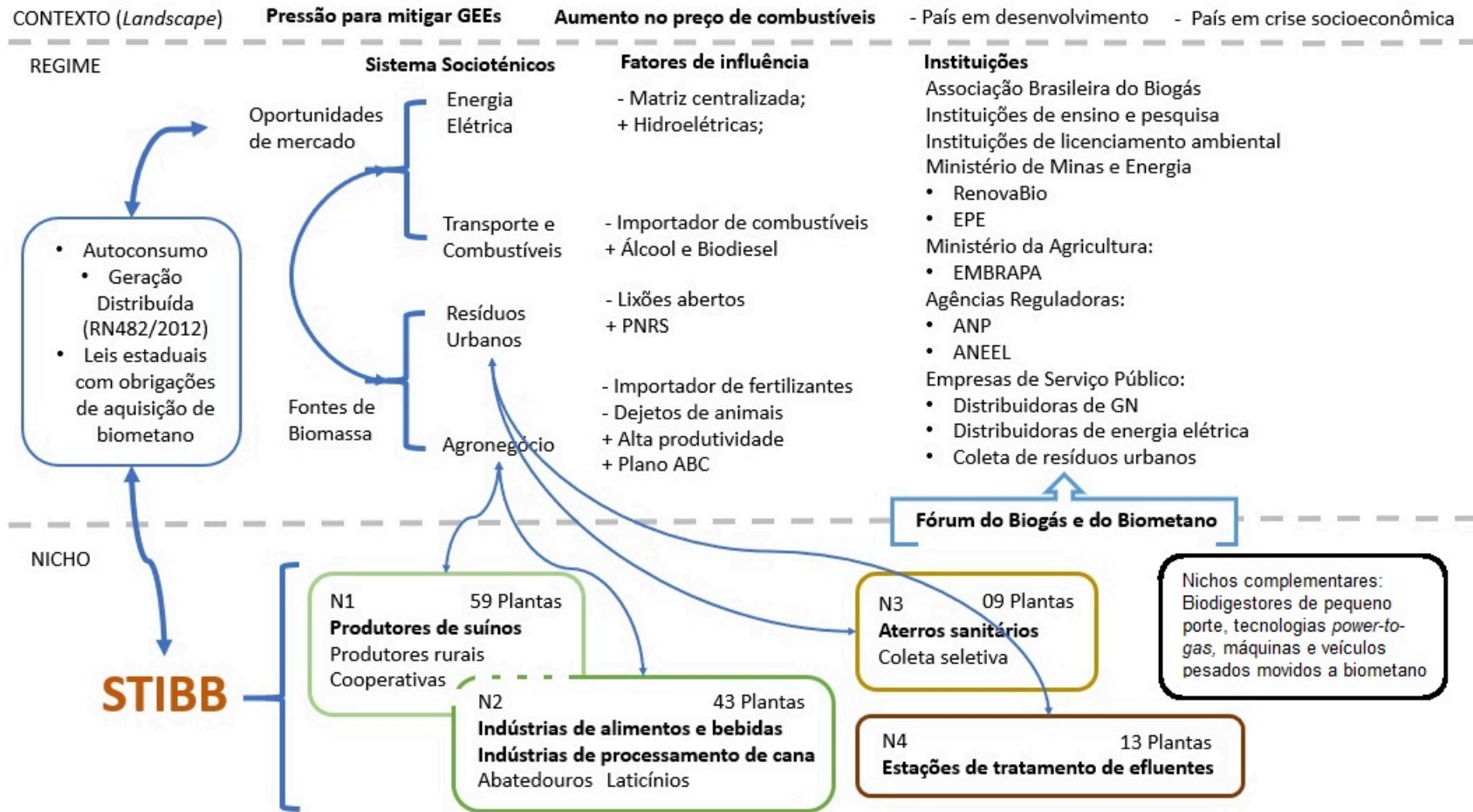
Fonte: Abiogás (2018)

A realidade do país então é complexa e dinâmica, um fato muito importante e relativamente recente agiu como indício de uma quinta fase, trata-se da separação do biogás da biomassa sólida no PDE (EPE, 2018). Outros indícios podem ser destacados, como o biometano sendo produzido em seis projetos de grande porte, com diferentes modelos de negócio, e empresas do setor de caminhões e máquinas anunciando motores movidos a GNV e biometano (e.g., Scania, Iveco). Uma quinta fase deve surgir, caracterizada por uma maior experimentação, aproximação dos produtores com instituições, não somente financeiras mas também de classe como a ABIOGÁS, que devem pressionar o regime por legitimidade nos setores de saneamento e agroindústria, a integração dos setores para promoção da tecnologia pode ser ancorada nos veículos pesados. Mudanças nestes setores necessitam de um longo prazo, então

pode-se concordar com a EPE que esta nova fase deve iniciar próxima ao ano de 2030, porém, sem indício forte que este marco seja para atingir uma fase de maturidade.

A situação do biogás no Brasil em 2017 é apresentada na Figura 17 utilizando a Perspectiva Multi-Nível (GEELS, F. W., 2002; DURÃO, 2017). As pressões no nível de contexto estavam corroborando para o fortalecimento do nicho do biogás, com exceção da crise socio-econômica. Além disso, o contexto atual com a queda dos preços do petróleo, pode modificar um pouco a tendência no aumento dos preços dos combustíveis. Quanto ao nível de Regime, observa-se que ele é constituído de uma conexão do STIBB para as oportunidades de mercado, enquanto seus nichos protegidos são conectados as fontes de biomassa. O regime ainda contém sistemas sociotécnicos ou setores da economia, fatores de influência que definem as tendências nestes setores e organizações que promovem instituições. O nível do nicho por sua vez apresenta o STI com quatro nichos já interagindo com o regime. Estes nichos foram apontados pelas rotas da Figura 15. Vale ressaltar os nichos complementares, podem estar nestes complementos as fontes de economicidade das plantas e uma grande parte do potencial do país em forma de micro produtores.

Figura 17 – Análise do biogás no Brasil pela PMN



Fonte: Adaptado de Durão (2017)

Além destes substratos destacados como principais existem outros derivando das mesmas rotas porém ainda são pouco expressivos no contexto brasileiro. Na produção agropecuária, por exemplo: restos da safra, biomassa dedicada, carcaças de animais; na indústria de alimento: amidos, cervejaria, refrigerantes, laticínios, matadouros; de resíduos sólidos urbanos: biodigestores dedicados para resíduos urbanos; no saneamento: pequenos biodigestores para águas residuais de comunidades (ABIOGÁS, 2018).

Em síntese diversos agentes partes do SI já buscam impulsionar a cadeia do biogás, no entanto o contexto econômico e a falta de um programa nacional para sua promoção ainda são fortes barreiras. Porém a principal barreira para a concepção do STIBB é seu reconhecimento, a primeira prova disso são as publicações. Embora existam temas técnicos pontuais publicados, poucas destacam o setor do biogás como um SI. Sem o destaque para uma caracterização sistêmica, é difícil que os agentes envolvidos conheçam os objetivos e benefícios de um STI bem desenvolvido para o biogás.

4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS

Este trabalho é classificado pela sua natureza como exploratório e os procedimentos metodológicos adotados são calçados no método hipotético-dedutivo ¹, que em síntese consiste de três fases: problema, conjecturas e tentativas de falseamento (LAKATOS; ANDRADE MARCONI, 1991).

- Problema, que surge em geral de conflitos entre expectativas e teorias existentes;
- Solução proposta, deduzida de consequências na forma de proposições passíveis de teste;
- Testes de falseamento, que seriam tentativas de refutação da solução proposta feitas através da observação e experimentação.

O método consiste na construção de conjecturas que devem ser submetidas a testes, os mais diversos possíveis, à crítica intersubjetiva (relação entre o sujeito e o objeto), ao controle mútuo pela discussão crítica, à publicidade (sujeitando o assunto a novas críticas) e ao confronto com os fatos, para verificar quais são as hipóteses que persistem como válidas resistindo as tentativas de falseamento, sem o que seriam refutadas. É um método de tentativas e eliminação de erros, que não leva à certeza, pois o conhecimento absolutamente certo e demonstrável não é alcançado. Desta maneira, a resolução de um problema se renovaria em si mesmo, com tentativas progressivas em direção a soluções melhores para o problema (LAKATOS; ANDRADE MARCONI, 1991).

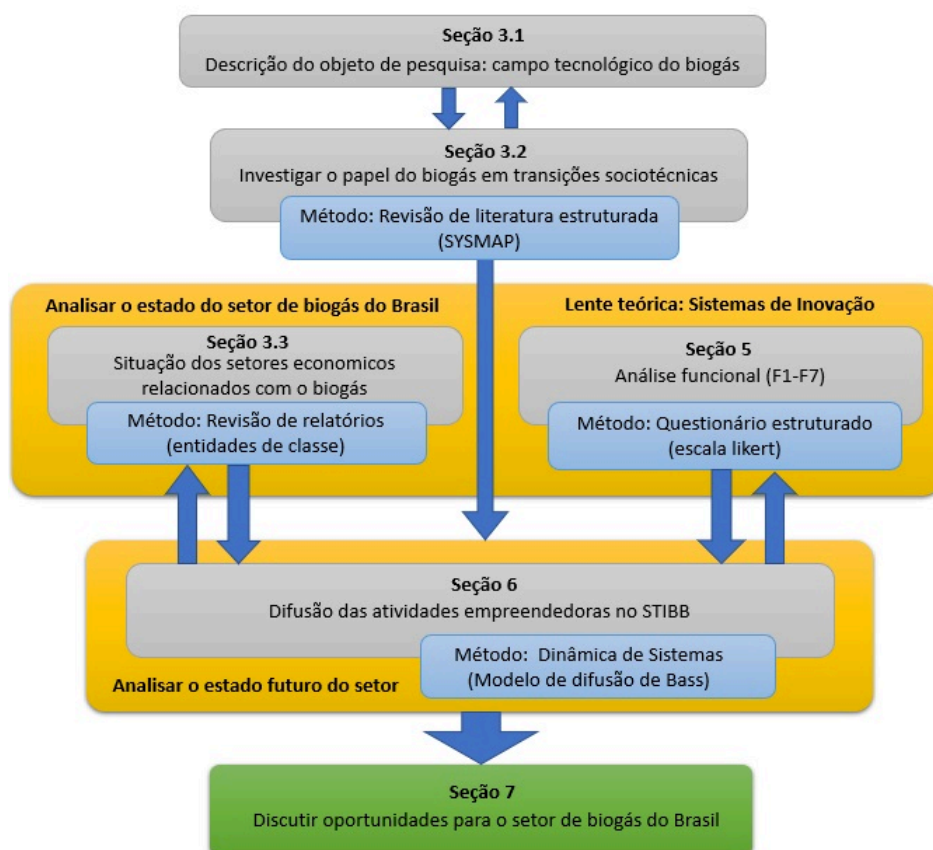
Neste trabalho a Teoria da Inovação é suportada pela análise prospectiva e pela análise da percepção de agentes, elas são utilizadas para construir o modelo teórico da pesquisa sobre o qual são feitas as deduções. neste trabalho. No caso específico desta pesquisa, as hipóteses são as propostas de políticas que possam acelerar o crescimento do STIBB por meio da difusão tecnológica.

De forma complementar os procedimentos foram associados aos objetivos específicos. Primeiramente utiliza-se um modelo de revisão sistemática da literatura para identificar como a teoria das transições trata o tema do biogás. Posteriormente realiza-se a análise da situação atual do STIBB, onde adotam-se duas perspectivas complementares: a análise funcional e a descrição dos sistemas sociotécnicos envolvidos. Os métodos até este ponto serviram para fundamentar o modelo com as premissas encontradas e criar as soluções propostas a serem testadas durante a análise prospectiva pelo método de modelagem e simulação com a teoria de Dinâmica de Sistemas. Finalmente a análise de cenários permitiu o apontamento e a discussão das questões relevantes que acelerem o desenvolvimento do STIBB. A figura 18 sintetiza a

¹ Método desenvolvido na segunda metade do século XX por Karl R. Popper

composição desta dissertação. O detalhamento dos procedimentos de modelagem são mais extensos que os três primeiros, devido a complexidade de representar a dinâmica do sistema.

Figura 18 – Métodos adotados



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 REVISÃO ESTRUTURADA DA LITERATURA

Para o cumprimento do primeiro objetivo específico, investigar a literatura em busca de relatos, conexões e políticas que promoveram o biogás e a sua relevância em transições sociotécnicas, a metodologia de pesquisa adotada é descritiva por meio de análise sistemática da literatura. Para isso utilizou-se o modelo *Scientometric and sYStematic yielding MApping Process* (SYSMAP), geralmente utilizado para validar e identificar lacunas de pesquisa (VAZ; URIONA-MALDONADO, 2017). O método oferece uma forma estruturada de realizar uma revisão bibliográfica, através da combinação de análise cientométrica e análise de conteúdo. O método consiste de um ciclo de quatro fases, porém inclui uma quinta fase que interrompe o ciclo para que o relatório seja elaborado. Este modelo foi selecionado por apresentar técnicas visuais

com mapeamento de nós em comum entre as publicações que facilitam a visualização e interpretação dos resultados, as fases do modelo são as seguintes:

- Fase 1: Construção da base de dados de artigos brutos, que, por sua vez, compreende: selecionar palavras-chave, selecionar bancos de dados, pesquisar artigos e verificar a aderência das palavras chave, formando a Amostra 1.
- Fase 2: Filtragem, que inclui filtragem de duplicados, filtragem de alinhamento por título, resumo e texto completo, que formam a Amostra 2;
- Fase 3: Análise bibliográfica ou cientometria, esta fase inclui análise de citação, co-citação e referências baseada em análise de redes e também do histórico de evolução das publicações;
- Fase 4: Análise de conteúdo, nesta fase pode-se incluir artigos de outras fontes e também podem ser considerados livros, monográficas, teses e dissertação, constituindo a Amostra 3. Para condução desta fase é preciso a formulação de uma pergunta de pesquisa, de acordo com as necessidades do investigador. O modelo sugere a categorizar as informações relevantes como: representatividade, tipo da pesquisa, objetivo e problemática, metodologia, principal contribuição, resultados e sugestões de trabalhos futuros;
- Fase 5: Após a leitura e identificação das categorias de análises, o pesquisador tem condições para propor oportunidades de pesquisas sobre a temática. Estas lacunas são variadas, como validar objetivos, metodologias ou formas de mensuração utilizadas para o tema, diagnóstico da situação atual, a inserção da pesquisa a ser conduzida e entre outros.

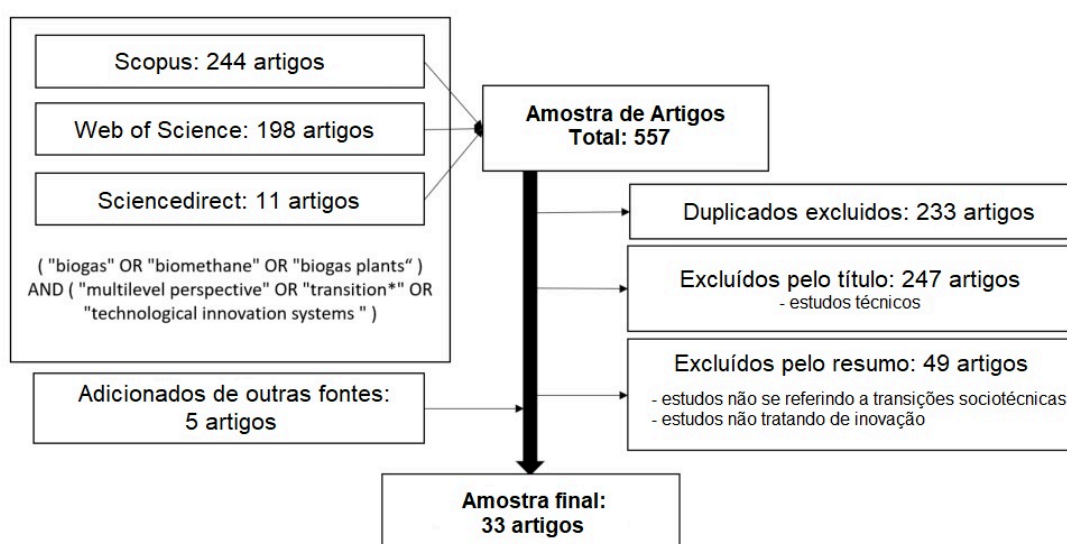
A Fase 1 foi realizada em Março de 2019, foram selecionadas palavras-chave para alcançar uma variedade representativa de artigos relacionados à tendência em transições de sustentabilidade e referências de biogás. A busca incluiu as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: "*biogas*"OR "*biomethane*"OR "*biogas plants*"AND "*Multi-level perspective*"OR "*Transitions*"OR "*Technological innovation systems*". Não foram utilizadas restrições de datas e as palavras pesquisadas em títulos de artigos, resumos e palavras-chave.

Para formar a Amostra I, buscou-se artigos em três mecanismos de busca: Na Scopus, onde a categoria filtro "Engenharia" foi selecionada; Na base Science Direct, onde no tipo de artigo foram selecionados apenas artigos de pesquisa, e na Web of Science, onde nenhum filtro foi adicionado. Os artigos foram carregados através do acesso ao portal de periódicos da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) concedido pela rede da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Na Fase II, foram filtrados os 557 documentos obtidos para localizar artigos pertinentes para o objetivo específico. Para gerenciar esses artigos, os arquivos do banco de dados foram exportados para o EndNote X9 (programa de gerenciamento de referência) no formato RIS. Em seguida, as duplicatas foram removidas, reduzindo o total para 324 documentos. Em seguida, 78 documentos foram selecionados com base no título, removendo aqueles referentes a estudos técnicos (e.g., mecânicos ou químicos). Em seguida, 28 foram selecionados com base no conteúdo de seus resumos, além disso, foram selecionados com base em artigos e citações que incluíam referências relacionadas as transições sociotécnicas. Ao conferir as referências citadas nesses artigos, pode-se determinar se havia alguma literatura relevante para revisão, e assim, 5 artigos foram adicionados.

No total, 33 artigos foram utilizados para executar a Fase III (veja Figura 19). A análise bibliométrica é uma análise estatística de publicações escritas (por exemplo, livros ou artigos). Para isso, utilizou-se o VosViewer (software de mapeamento de palavras-chave e autores) e o Microsoft Excel. Esta amostra foi submetida as pré análises de ano de publicação, autores, periódicos, instituições e de palavras-chave. Essas análises são baseadas na frequência de ocorrências que as palavras são encontradas na amostra, o que também indica os grupos que estão sendo formados. Tais análises oferecem conhecimento sobre as ideias e estruturas representativas que constituem um campo de pesquisa específico.

Figura 19 – Amostragem de artigos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Uma segunda etapa da revisão de literatura, não foi conduzida em artigos científicos e sim em relatórios, notas técnicas, teses e dissertações, isso pela necessidade

de contextualizar a situação dos setores da economia do Brasil. Esta etapa foi incluída como referencial teórico e compreende o capítulo 3 desta dissertação.

Para o cumprimento do segundo objetivo específico, analisar a situação atual dos sistemas sociotécnicos envolvidos com o STIBB, o método é descritivo e utiliza como técnica de coleta de dados a documentação indireta, baseada em pesquisa documental e bibliográfica. As fontes utilizadas para coleta de dados incluíram, principalmente teses de doutorado e materiais não revisados por pares, mas também alguns artigos científicos da base Science Direct que possuísem simultaneamente as palavras "Brazil" AND "Biogas" em seus títulos, resultando em 24 artigos, vale ressaltar que estes não fizeram parte da análise com SYSMAP.

Esta técnica foi selecionada pois os sistemas sociotécnicos são muito amplos e seria impossível destacar todas os seus limites, ao invés disso buscou-se com a documentação indireta trazer a tona fatores que poderiam ser transformados, ou ligeiramente adaptados, como pontos de alavancagem que são importantes para o desenvolvimento do STIBB, Caracterizar o contexto onde a inovação emerge é imprescindível para um estudo de análise prospectiva. Inferências só podem ser sugeridas após uma extensa análise do que já existe de bom e de ruim no sistema. A técnica também permite um levantamento das barreiras que estes sistemas causam a difusão tecnológica.

Os materiais não revisados por pares, representam a maior parte desta pesquisa e incluem relatórios (i.e., notas técnicas) de instituições, associações, agências reguladoras como: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério das Cidades², Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Observatório do Clima, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Associação Brasileira do Biogás (Abiogás), Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGÁS) e também incluem relatórios de instituições internacionais como Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás (CIBiogás), *World Biogás Association* (WBA), *International Energy Agency* (IEA), *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES).

Teses e dissertações disponíveis em domínio público também são consultadas como base para o delineamento desta pesquisa, devido as suas contribuições extremamente relevantes ao tema de pesquisa desta dissertação como destacados na Tabela 10. Não obstante, foram revisados os materiais disponíveis no site da ABiogás publicados durante três eventos nomeados Fórum do Biogás e do Biometano (Foz do Iguaçu/SC em 2018, Chapecó/SC em 2019, São Paulo/SP em 2019).

² Extinto em Janeiro de 2019

Tabela 10 – Teses e Dissertações selecionadas sobre Biogás

Autor	Ano
(DURÃO, 2017)	Este trabalho analisa a transição para difusão do biogás como ativo energético no Brasil. É o primeiro trabalho no país a utilizar a teoria das transições para analisar a difusão do biogás. A autora defende que o energético ainda está na fase de nicho e necessita de avanços institucionais, infraestrutura e liderança política para evoluir.
(MARIANI, 2018)	A tese destaca barreiras (e.g., conhecimento, tecnológicas, políticas e regulatórias e econômicas e financeiras) para o desenvolvimento do setor de biogás no Brasil. Além disso faz uma análise do programa RenovaBio e outros programas no contexto Europeu, buscando pontos que possam influenciar positivamente o sistema no Brasil. OS trabalhos desta autora são referência nos estudos da expansão do número de plantas no país.
(BARICHELLO, 2015)	Esta tese estuda o biogás a partir de dois segmentos específicos, a suinocultura e os condomínios de agroenergia. A união dos conceitos pode ser uma ótima fonte de sustentabilidade. O autor realizou pesquisas de campo em condomínios na Europa e aplicou o conhecimento adquirido para formular um método para aferir a viabilidade de projetos no contexto local do sul do Brasil.
(MENDONÇA, 2014)	Este trabalho utiliza da perspectiva multinível para caracterizar o surgimento de eco inovações com potencial de transformar regimes (e.g., carros elétricos e biogás). Grandes organizações (e.g., Itaipu Binacional) agem como “empreendedores” e potencializam um fator imprescindível para o surgimento de eco inovações, a formação de parcerias nos nichos tecnológicos.
(DESCLAUX, 2019)	A dissertação explica como a falta de coordenação intersetorial entre políticas e programas reduzem o potencial de expansão e de benefícios associados ao biogás. Mecanismos políticos devem ser desenvolvidos com coordenação, assim como foi feito com o etanol. As metas devem contemplar os objetivos de diversos sistemas.
(ALBARRACIN, 2016)	Esta dissertação também analisa barreiras e oportunidades, mais especificamente introduz possibilidades para propostas de novas políticas públicas para promoção do biogás no Brasil (e.g., desoneração fiscal, facilidades creditícias, apoio para conexão à rede elétrica). Além disso o autor ilustra alguns métodos para cálculo do potencial de biogás em resíduos.
(CASARIN, 2016)	Esta tese adentra mais o domínio técnico do biogás. O estudo conduzido em Santa Catarina sintetiza as algumas características relevantes para incentivar a adoção de biodigestores pelos produtores da suinocultura. Ele faz análises térmicas e econômicas para averiguar as possibilidades de cogeração para diversos tamanhos de produtores.

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 ANÁLISE FUNCIONAL

Para o cumprimento do terceiro objetivo específico, realizar análise funcional do STIBB, utilizam-se as sete funções destacadas em um STI (HEKKERT *et al.*, 2007; DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019). Este método é selecionado por apresentar melhores meios de encontrar recomendações políticas, por apresentar uma tipologia de forma-

ção clara e objetiva. Além de ser mais indicado para inovações emergentes. Além disso o trabalho de Oliveira e Negro (2019) já explica o contexto histórico e as funções do STIBB. Neste trabalho adota-se uma técnica de coleta de dados diferente da já utilizada pelos autores. Utiliza-se a técnica de questionário estruturado ³.

O questionário é particularmente útil para esta etapa pois pode captar a opinião de diversos agentes de forma simples e com maior alcance que as entrevistas. Ainda a forma estruturada permitem a análise em gráficos. As questões formuladas utilizam da escala "likert" indicada para pesquisas de opinião onde o respondente precisa discernir entre concordar ou discordar com uma afirmação proposta, ainda com níveis intermediários. As questões e afirmações podem ser encontradas no Anexo A e possuem 5 níveis de concordância.

As 20 questões foram elaboradas a partir dos indicadores para cada uma das funções apresentadas no trabalho de Tigabu, Berkhout e Beukering (2015), também buscou-se incorporar as questões, fatores mais inclinados as funções secundárias, observadas para países em desenvolvimento (EDSAND, 2019). A tabela 11 faz o cruzamento entre as questões do questionário e as funções que serão mensuradas. Ainda o modelo dos SI sugere para a análise 6 passos, como mostram os itens abaixo, a última etapa é conduzida no capítulo 5 onde as propostas políticas são analisadas (BERGEK *et al.*, 2008).

- O primeiro envolve a escolha do STI que será explorado;
- O segundo passo visa identificar os componentes estruturais do STI (atores, redes e instituições) são identificados;
- O terceiro passo descreve o que está acontecendo no STI por meio processos-chave (funções) são usados para descrever o que está acontecendo no STI;
- O quarto passo envolve avaliar o quão bem as funções são cumpridas e definir metas do processo em termos de um padrão desejado;
- O quinto passo visa identificar os mecanismos que induzem ou bloqueiam o desenvolvimento do STI em direção ao padrão desejado;
- O sexto passo busca especificar as questões políticas relacionadas a esses mecanismos de indução e bloqueio.

Ao formular o questionário preliminar houve uma fase de validações, onde foram selecionados especialistas na área do biogás para opinarem e responderem o formulário. Suas ocupações e contribuições são resumidas na tabela 12. O passo seguinte

³ Como alternativa, para ver um modelo de entrevistas semi-estruturadas para caracterização das funções no Sistema de Inovação do Biogás da Índia, veja (SCHMIDT; DABUR, 2014)

Tabela 11 – Funções do STIBB e questões referentes

Cor de Id.	Função	Questões
	F1 - Atividades empreendedoras	1, 2, 20
	F2 - Desenvolvimento e absorção de conhecimento	3, 4, 5
	F3 - Difusão de conhecimento através de redes	6, 7
	F4 - Orientação de pesquisa	8, 9
	F5 - Formação de mercado	10, 11, 12, 19
	F6 - Mobilização de recursos nacionais e internacionais	13, 14
	F7 - Legitimidade formal e informal	15, 16, 17, 18

Fonte: Elaborado pelo Autor

compreendeu verificar a congruência das questões em função das respostas obtidas a partir do coeficiente de Cronbach. O coeficiente mede a correlação entre respostas através da análise das alternativas assinaladas pelos respondentes, apresentando uma correlação média entre as perguntas. O coeficiente é calculado a partir da variância dos itens individuais e da variância da soma dos itens. Para isso foi utilizado o *software SPSS Statistics* da IBM, onde o tratamento dos dados é simples e intuitivo. O resultado do Alfa de Cronbach 0.83 significa que existe consistência nas afirmativas. As tabelas ilustram os resultados do teste.

Tabela 12 – Etapa de validação do formulário

Descrição	Quantidade
Doutores na área de biogás	5
Produtores de biogás	2
Associados em entidades de classe	2
Especialistas em empresas de pesquisa	1

Fonte: Elaborado pelo Autor

- Trocar sistema de inovação para setor do biogás. Incluir consultor, graduando e outros níveis de atuação. Utilizar caixas de seleção na pergunta sobre a região onde atua. Cada respondente deve responder sobre o Brasil ou sobre sua região?. Nos tipos de substrato adicionar uma opção para não produtores e a opção de codigestão. P7 trocar "elaborem" por "abordam ". Melhor definir P9 e P15, pois são similares. Informar na pergunta 20 a produção atual do país segundo Cibiogás.
- Incluir referência a disponibilidade de mão de obra;
- Ser mais pontual e direto na introdução. Trocar "modelo de negócio" por "tipo de substrato". Alterar o contexto das afirmativas, remover o verbo "existir" para "conhecer". Remover adjetivos como "forte", "muito", "diversos" pois podem confundir o respondente.

- Alterar P20 de m³ por dia para % da matriz energética. Reduzir o número de questões (Esta sugestão não foi realizada, pois a P20 deve auxiliar na confirmação do modelo de Dinâmica de Sistemas).
- Alterar o verbo existir para algo que tendencie menos o respondente.
- Todos os consultados afirmaram que o questionário está muito bom. Principalmente por ser a primeira tentativa de se coletar este tipo de informação. Há uma clara dificuldade, ou limitação em encontrar respondentes produtores de biogás, estes representando apenas 10% da amostra. Sugere-se entrar em contato com ABiogás para encontrar mais produtores.

Tabela 13 – Estatísticas de confiabilidade

Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach com base em itens padronizados	Número de itens
0.823	0.850	20

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 – Estatísticas de item-total

Questão	Alfa de Cronbach se o item for excluído	Média
Q1	0,844	3,43
Q2	0,815	3,57
Q3	0,813	3,57
Q4	0,808	3,00
Q5	0,805	3,14
Q6	0,808	2,29
Q7	0,819	3,00
Q8	0,823	2,29
Q9	0,812	2,13
Q10	0,800	1,57
Q11	0,813	2,29
Q12	0,830	2,14
Q13	0,813	2,43
Q14	0,829	2,43
Q15	0,804	2,86
Q16	0,811	2,57
Q17	0,886	2,00
Q18	0,797	2,71
Q19	0,818	2,71
Q20	0,845	2,86

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.1 Análise de dados

Depois da coleta realizada (104 respostas), segue a utilização de dois tipos de análise multivariada de dados a serem conduzidas com a amostra. Os procedimentos são em grande parte embasados em (HAIR *et al.*, 2009). São elas a análise descritiva e a análise fatorial. A análise descritiva em si é mais simples, de forma básica ela envolve o cálculo de medidas simples de composição e distribuição de variáveis. Dependendo do tipo de dados, podem ser proporções, taxas, proporções ou médias. Além disso, quando necessário, como no caso de pesquisas por amostragem, medidas de associação entre variáveis podem ser usadas para decidir se as diferenças observadas entre tipos de respondentes são significativas.

A segunda etapa desta análise compreende uma análise fatorial. A análise fatorial é uma técnica de redução de dados. Neste caso os fatores são interpretados como uma combinação linear (variável esteatítica) das variáveis originais. Os fatores extraídos representam dimensões latentes (construtos) que resumem ou explicam o conjunto original de variáveis observadas (HAIR *et al.*, 2009). Ela busca quais conjuntos de variáveis analisadas (questões) explicam a maior porcentagem da variância⁴. Por exemplo, se duas variáveis possuem correlação de 0,50. Ao quadrado, cada variável compartilha 25% de sua variância com a outra.

Com esta análise espera-se compreender dois princípios:

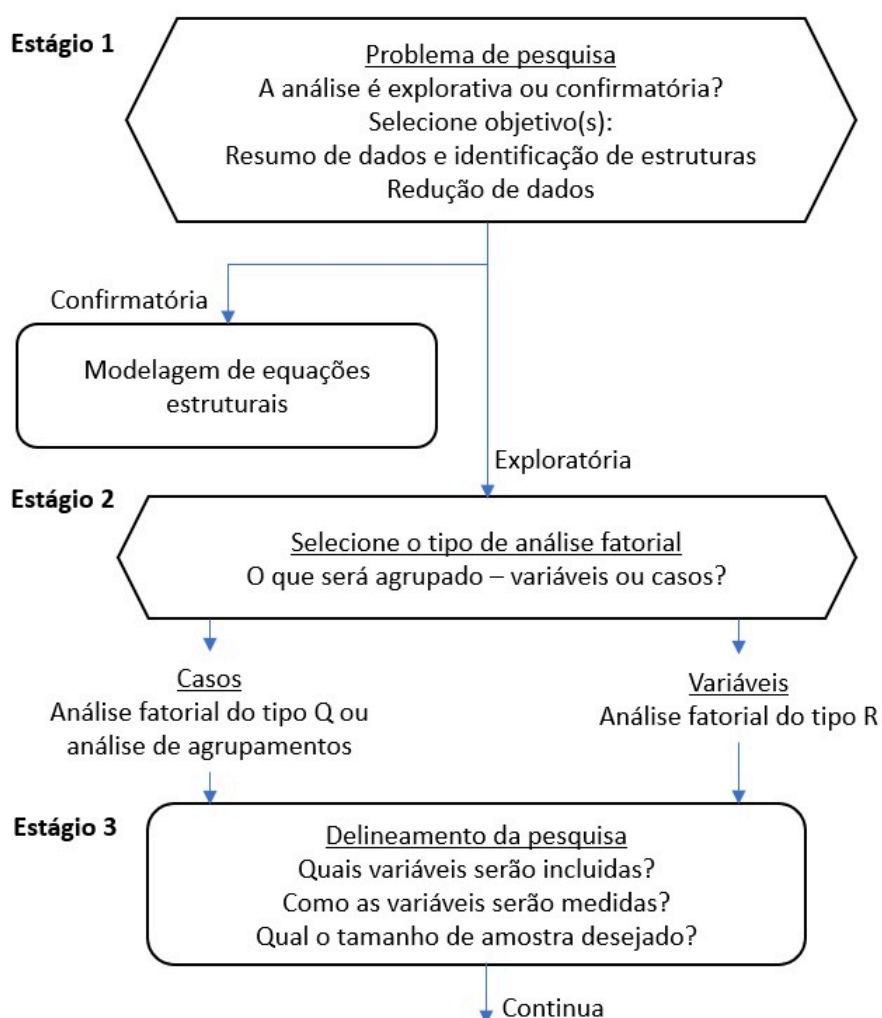
- Se as funções dos Sistemas de Inovação podem ser utilizadas como construtos para mensurar o seu desenvolvimento em função da percepção dos atores sobre as atividades associadas a cada função.
- As variáveis que melhor preveem o sucesso ou fracasso do desenvolvimento de um SI.

Os passos para conduzir uma análise fatorial são bem pragmáticos e são destacados nas Figuras 20, 21 e 22 e compreendem sete estágios.

Para o estágio 1 tem-se que a pesquisa é exploratória com resumo de dados e principalmente a identificação das dimensões latentes, ou estruturas. Para o Estágio 2 o tipo de análise fatorial é do tipo R pois o objetivo é agrupar respostas e não respondentes (os respondentes são agrupados com análise descritiva). Em seguida são necessárias três respostas: (a) As variáveis incluídas são as atividades de um SI, transformadas em questões pelo autor desta dissertação; (b) As variáveis são medidas pela escala Likert de 0 a 4 (mínimo de 5 observações por variável); (c) O tamanho de amostra deve respeitar uma regra indicando que o número mínimo de amostras é 5 vezes o número de variáveis, portanto tem-se o mínimo de 100 amostras. Infelizmente um critério não foi atendido, a regra diz que pelo menos cinco variáveis

⁴ Variância é uma medida de dispersão estatística, indicando o quão longe em geral as observações de uma variável se encontram longe do valor esperado (média individual)

Figura 20 – Estágios 1 a 3 de uma análise fatorial.



Fonte: (HAIR *et al.*, 2009)

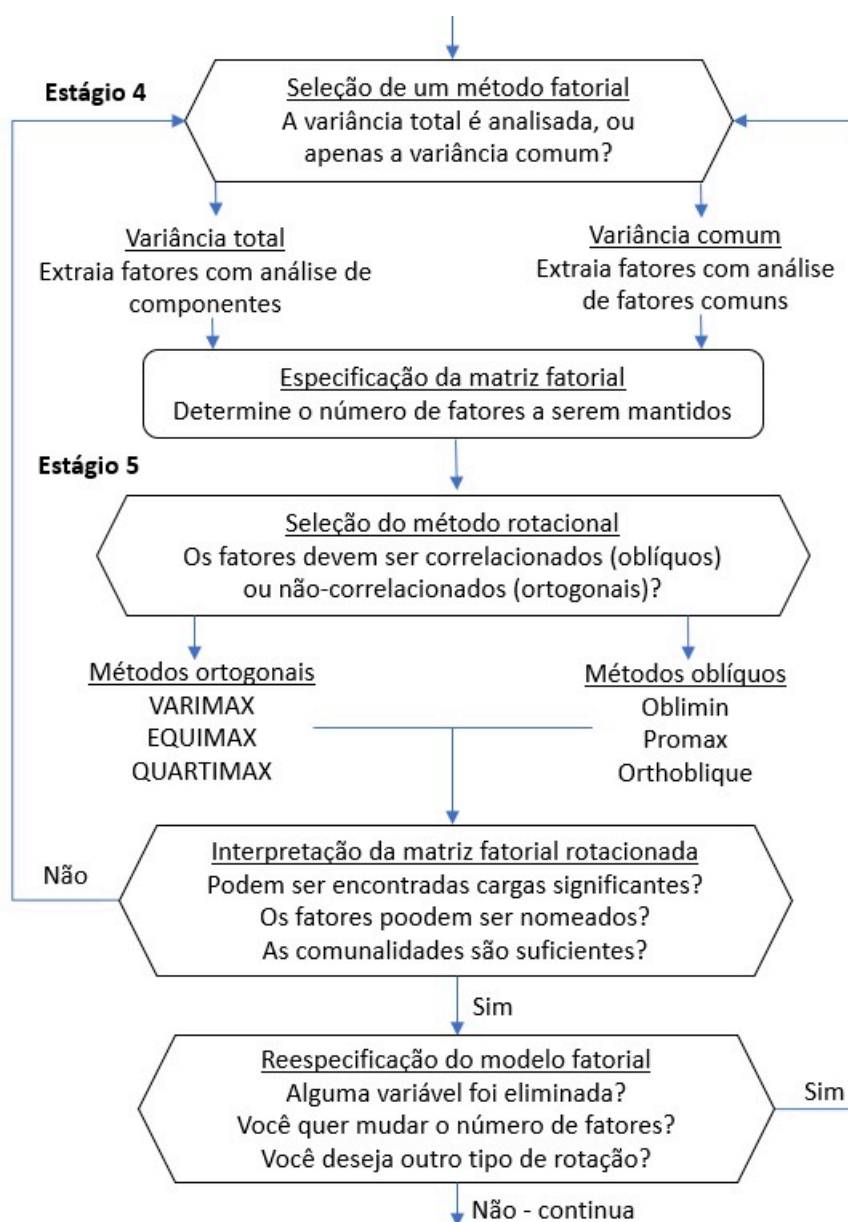
devem ser analisadas por construto. Este critério foi suprimido pois aumentaria de forma significativa o número de questões, além de necessitar mais especificações sobre cada atividade atribuída a cada função do SI.

O Estágio 3 já utiliza dos resultados da análise e verifica se os dados foram processados de forma correta e fazem sentido se utilizados com uma análise fatorial: (a) inicialmente com a Matriz de Correlações (Apêndice C) a análise visual precisa revelar diversas correlações acima de 0,3; (b) Em seguida as correlações na matriz anti-imagem acima precisam em grande maioria serem acima de 0,7; (c) o Coeficiente Alfa de Cronbach ou Estatística de Confiabilidade precisa estar acima de 0,7; (d) o teste de esfericidade de Barlett (sig) precisa estar acima de 0,05; (e) o teste de Kaiser-Meyer-Olkin precisa estar abaixo de 0,5. Tendo cumprido estes critérios, a pesquisa não precisou ser alterada e seguiram os próximos estágios.

O resultado da análise de confiabilidade, mais especificamente, o coeficiente

alfa de Cronbach resultou em 0,845 indicando que os dados são passíveis de análises multivariadas. O teste de esfericidade de Bartlett afirmou que existe correlação suficientemente forte para que a análise fatorial seja aplicada. Como o p-valor (sig) resultou em 0, portanto menor que o nível de significância de 0,05%, assim admite-se que a análise fatorial é adequada. O teste KMO (Kaiser Meyer Olkin) mede a adequação deste tipo de análise para a respectiva amostra e resultou em 0,746. De modo geral, KMO com valores baixos significam que o tamanho da amostra é inadequado para o uso desta ferramenta. O valor obtido neste teste KMO, como sendo maior ou igual a 0,5, ilustra que a ferramenta é considerada possível ao problema.

Figura 21 – Estágios 4 a 5 de uma análise fatorial.



O Estágio 4 busca definir o tipo de variância a ser analisada. Optou-se pela variância comum, por ser indicada quando o objetivo é identificar os construtos latentes e o pesquisador tem pouco conhecimento sobre a quantia de variância específica e de erro para definição de componentes. A parte seguinte requer um critério para especificação da matriz fatorial. Os critérios sugeridos são: explicar 60 % da variância para ciências sociais ou, se fosse o caso de pesquisa em ciências naturais explicar 95 % da variância; Além disso a matriz fatorial deve apresentar autovalores acima de 1 (critério da raiz latente) para que seja considerado um fator relevante.

O Estágio 5 busca simplificar os eixos de referência dos fatores encontrados, onde estes são rotacionados até atingir a posição mais próxima. O objetivo disso é redistribuir a variância dos primeiros fatores para os últimos com o objetivo de atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo. O método de rotação sugerido para este tipo de pesquisa é o método de rotação ortogonal Varimax. A interpretação da matriz rotacionada apresenta os Autovalores significativos e formula os fatores encontrados. Quando uma questão apresenta correlação com um fator acima de 0,3 consideramos que ela faz parte do fator analisado, correlações acima de 0,5 forma consideradas altas e correlações acima de 0,7 são as que embasam a definição do fator portanto são considerados de altíssima correlação.

Aqui faz-se necessário comentar a matriz de correlação (Apêndice 2). Ela indica que nenhuma variável teve correlação maior que 0,7 e apenas quatro tiveram correlação entre 0,5 e 0,7. Portanto as variáveis conseguem medir dimensões relativamente diferentes. Além disso a matriz anti-imagem revela que nenhuma variável é de baixa significância para o estudo, sendo que apenas a questão Q19 (VAR23) possui valor inferior a 0,7, mas como é de apenas dois centésimos, ainda apresenta uma necessidade de inclusão no estudo. As análise de comunalidades que indicam a percentagem de variabilidade explicada de cada variável quando agrupada em um fator, indicou que as questões 11 e 14 poderiam ser eliminadas do estudo (VAR15 e VAR18), como mostra o Anexo 5. Já a matriz de variância total explicada, indica a percentagem total da variância que é explicada pelos fatores obtidos. Neste caso, observamos que se atinge os 60% de variância explicada quando se extrai 6 fatores, mais especificamente 62,54% como mostra a Tabela 15.

Os estágios seguintes, 6 e 7 compreendem a análise da matriz fatorial e a avaliação dos uso adicionais. No estágio 6 caso o pesquisador perceba necessidade de criar subgrupos ou analisar fatores específicos mais a fundo. No Estágio 7 o pesquisador analisa variáveis de substituição para as questões que ficaram pouco alinhada com os fatores encontrados, computa escores ou ainda cria escalas múltiplas. Como esta análise foi a primeira deste tipo realizada com este SI, estas duas etapas, que informam o ciclo para refazer e aprimorar o estudo, serão deixadas para as conclusões e sugestões futuras. Para este momento basta marcar que foram encontrados seis

Tabela 15 – Variância total explicada em autovalores

Componente	Total	% de variância	% cumulativa
1	5,336	26,680	26,680
2	2,079	10,394	37,074
3	1,610	8,048	45,122
4	1,278	6,388	51,511
5	1,151	5,756	57,266
6	1,056	5,281	62,548
7	0,984	4,919	67,467
8	0,833	4,163	71,630
9	0,793	3,965	75,594
10	0,719	3,595	79,190
11	0,662	3,312	82,502
12	0,561	2,803	85,304
13	0,533	2,663	87,967
14	0,479	2,395	90,362
15	0,451	2,253	92,615
16	0,442	2,212	94,827
17	0,336	1,681	96,508
18	0,275	1,376	97,884
19	0,231	1,153	99,037
20	0,193	0,963	100,000

Método de extração: análise de componente principal

Fonte: Elaborado pelo autor

fatores que serão utilizados para discussão.

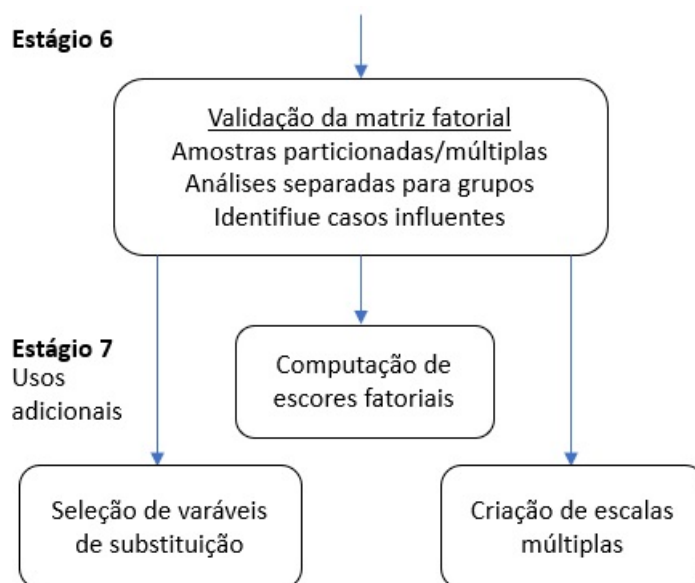
Como primeiro indício da primeira resposta para a terceira etapa da análise funcional o Apêndice G ilustra 20 Diagramas de Caixa sobre os dados coletados. Cada boxplot representa uma questão, e segrega os respondentes para compreender como cada grupo visualiza o desenvolvimento do STIBB. O boxplot ou diagrama de caixa é um gr que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes (outliers) dos dados, fornecendo assim um meio complementar para desenvolver uma perspectiva sobre o caráter dos dados. As medidas de estatísticas descritivas como o mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil ou mediana e o terceiro quartil formam um boxplot.

4.3 ANÁLISE PROSPECTIVA

Para o cumprimento do quarto objetivo específico, a metodologia é a modelagem e simulação computacional a partir da Dinâmica de Sistemas (DS). A simulação computacional é a imitação de um sistema real modelado em computador, no qual serão executados experimentos para avaliação e melhoria de seu desempenho.

De um modo geral, simulação é a importação da realidade para um ambiente controlado onde se pode estudar o comportamento do mesmo sob diversas condições, sem os riscos físicos e/ou custos envolvidos em um estudo tradicional (LAW; KELTON,

Figura 22 – Estágios 6 a 7 de uma análise fatorial.



Fonte: (HAIR *et al.*, 2009)

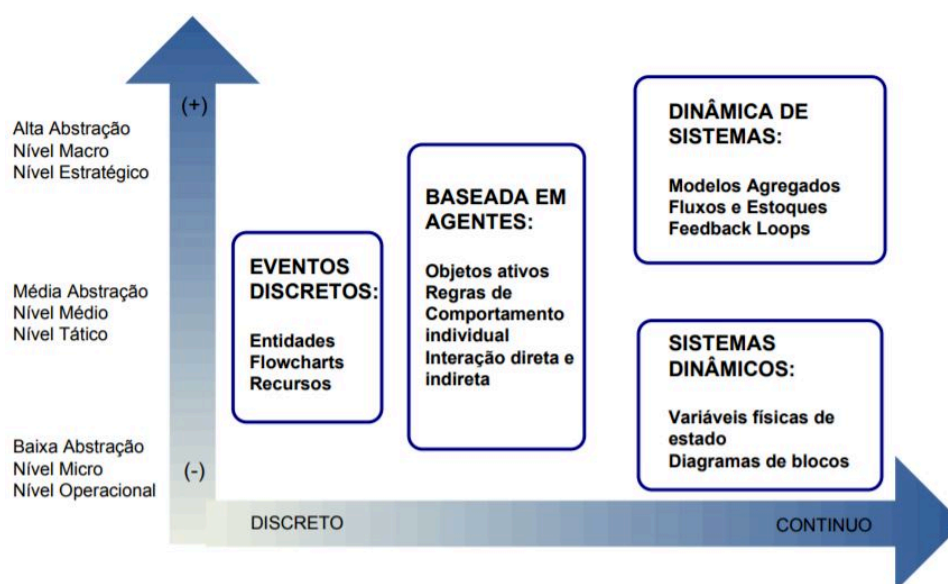
2010; PIDD, 2012). A DS é um método de modelagem formulada na década de 60 que combina aspectos quantitativos e qualitativos para a análise de sistemas com alto grau de complexidade (FORRESTER, 1961).

O método é indicado para modelagem de sistemas com alto nível de abstração, como mostra a Figura 23 (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004). Como a ligação entre o biogás e o Brasil ainda é caracterizada como em estágios iniciais a DS é o método indicado para cumprir a análise prospectiva. A utilização de modelos permite compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades, apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisões.

A abordagem de DS apoia-se no pensamento sistêmico, que busca estudar as estruturas dos sistemas organizacionais e sociais por meio da representação das relações causais entre seus elementos e da evolução destes elementos ao longo do tempo. O principal objetivo desta abordagem é explicar o comportamento de um sistema partindo das interações entre as diversas partes que o compõem, considerando padrões de comportamento existentes (STERMAN, 2000).

Estes sistemas são caracterizados por alguns elementos como: resistência a mudança (*policy resistance*), laços de realimentação (*feedback loops*), não linearidade, tempo de resposta demorado (*delay*), estoques (acumulação tanto de materiais como de informação) e fluxos (velocidade de acumulação e desacumulação) (STERMAN, 2000). A DS utiliza de uma abordagem endógena, o que significa que os aspectos ou variáveis críticas devem estar inter-relacionadas com outras na forma estruturas de realimentação (MORECROFT, 2015). Este método é aplicado em cinco estágios:

Figura 23 – Abordagens de simulação por níveis de abstração



Fonte: Borshchev e Filippov (2004)

- Estágio 1 - Definição do problema a ser modelado: o período de tempo que o modelo será rodado, o nível de análise (e.g. global, regional, etc.), as fronteiras do estudo e os fatores de escopo envolvidos;

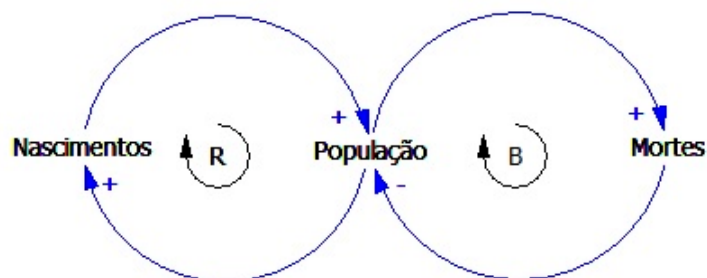
Esta etapa foi iniciada na seção 1.1 e complementada pela seção 3.3. Porém é na seção 5.3 que o problema a ser modelado é validado como relevante para o setor de biogás do Brasil.

- Estágio 2 - Definição da hipótese dinâmica: explicar as dinâmicas do sistema de forma endógena, um esboço das principais interações e laços de retroalimentação causais que podem explicar a performance do sistema;

A análise das funções do STIBB no capítulo 5, permitiu a criação do diagrama de laços de realimentação no início do capítulo 6. A hipótese dinâmica defende que a trajetória atual do sistema é de crescimento e que o biogás deve se tornar uma fonte importante parte da matriz energética do Brasil. Um diagrama de laços de retroalimentação apresenta as relações entre as principais variáveis de um sistema. A Figura 24 apresenta um destes diagramas. O diagrama mostra que a medida que a população cresce tem-se mais nascimentos, formando um ciclo de reforço, porém a medida que a população cresce também há um aumento no número de mortes, criando um ciclo de balanço.

- Estágio 3 - Formulação do modelo: concepção matemática na forma de equações diferenciais é projetada em uma representação de estoques e fluxos como mostra

Figura 24 – Diagrama de estoque e fluxo



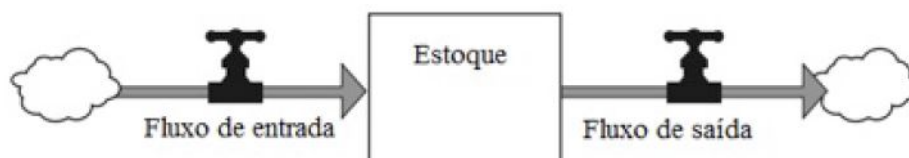
Fonte: Elaborado pelo autor

a Equação 1 e a Figura 25.

Os modelos são ciência empírica, pois são construídos à partir do senso de experiência ao invés de apenas teoria ou lógica e são passíveis de checar contra informações experimentais (OLAYA, 2015).

$$Estoque(t) = Estoque(t_0) + \int_{t_0}^t (Fluxo_{entrada}(s) - Fluxo_{saida}(s)) ds \quad (1)$$

Figura 25 – Diagrama de estoque e fluxo

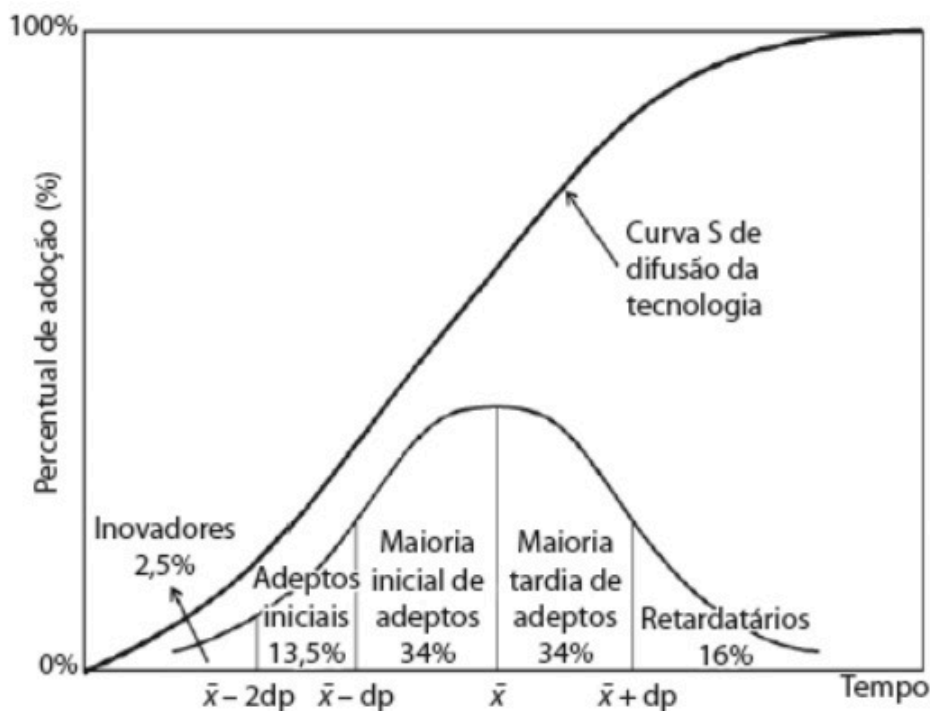


Fonte: Adaptado de Meadows (2008)

A dinâmica da inovação utilizada como base para a formulação do modelo é composta por três fases: a invenção (uma ideia potencialmente aberta para a exploração comercial); a inovação (exploração comercial) e a difusão (propagação de novos produtos e processos pelo mercado) (SCHUMPETER, 1985). Então, a difusão é parte inerente ao processo de inovação e elemento essencial para que a inovação tenha, de fato, impactos econômicos e sociais.

A difusão é o processo pelo qual uma inovação é comunicada ao longo do tempo entre os participantes de um sistema sociotécnico, como são os setores da economia. Portanto o processo consiste de quatro elementos chave: grau de inovação, canais de comunicação, tempo e o sistema social (ROGERS, 2003). Segundo o autor a adoção de inovações assume o formato de uma curva S, visto que a difusão ocorre entre grupos de adotantes, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Curva de adoção de uma tecnologia



Fonte: Adaptado de EPE (2016)

A difusão se manifesta de diferentes maneiras e é altamente sujeita ao tipo de adotantes e ao processo de tomada de decisão da inovação. O critério para a categorização do adotante é a inovatividade (algo como a qualidade de ser inovador), definida como o grau em que um indivíduo adota uma nova ideia. Um dos modelos mais comuns para difusão de inovações é o modelo de Bass desenvolvido em 1969. Frank Bass formulou a equação matemática teórica da difusão de tecnologia resumida em uma equação principal capaz de gerar uma curva sigmoide. Bass resolveu o problema de inicialização assumindo que os adotantes potenciais se tornariam conscientes da inovação através de fontes de informação externa cuja magnitude e poder de persuasão são aproximadamente constante ao longo do tempo (STERMAN, 2000).

A difusão ocorre em dois momentos de decisão: escolha das empresas por ofertar a nova tecnologia; e escolha dos consumidores finais em adotá-la, sendo esta a etapa que finda o processo. Em seu modelo, Bass (1969) assume que os consumidores potenciais de uma inovação são influenciados por uma tendência autônoma em adotar ou não um novo produto, ou seja, adotam sem a influência do meio (os inovadores) e pela comunicação de massa e/ou relações interpessoais (os imitadores), sendo que é o efeito da ação dos imitadores que massifica a difusão da inovação (velocidade da difusão). Logo, a velocidade de adoção dos consumidores está associada ao seu padrão de comportamento, ou seja, à proporção entre inovadores e imitadores. A Equação

2 ilustra o modelo de difusão (BASS, 1969). A Figura 27 ilustra a curva de adotantes subdividida pelos parâmetros de inovação (propaganda) e imitação (contato).

$$Z'(t) = p (m - z(t)) - q \frac{z(t)}{m} (m - z(t)) \quad (2)$$

Onde:

$Z'(t)$ - taxa de adoção;

$z(t)$ - número acumulado de adotantes no tempo t ;

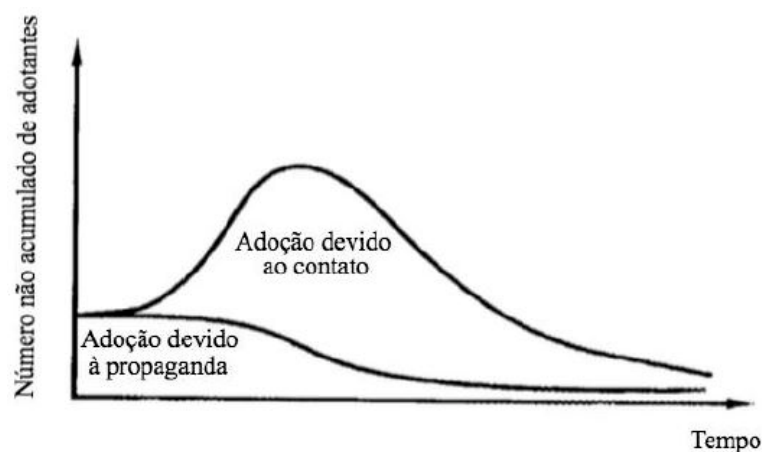
m - mercado potencial;

p - efetividade da propaganda ou coeficiente de inovação;

q - taxa de contato ou coeficiente de imitação;

t - tempo.

Figura 27 – Influência dos parâmetros na difusão



Fonte: Adaptado de EPE (2016)

O modelo de Bass ainda pode ser modificado incluindo outras variáveis de decisão. Por exemplo, o 'Efeito do aprendizado sobre o preço' (E^{op}) pode ser incluído, este mecanismo influencia a taxa de adoção, de forma que quanto mais adotantes mais é reduzido o preço da tecnologia (investimento e operações). Assim, se a adoção de $E^{op}(t) = 1$, o fluxo de adotantes está no auge (ou seja, 100%). Então, a probabilidade de adoção de um produto em um determinado momento pode ser expressa pela Equação 3.

$$\frac{f(t)}{m - F(t)} = \left(p + \frac{q}{m} F(t) \right) E^{op}(t) \quad (3)$$

Onde:

$F(t)$ - função acumulativa;

$f(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial t}$ - densidade da adoção no tempo 't';

E^{op} - Efeito do aprendizado sobre o preço

O efeito do aprendizado sobre os custos de produção foi analisado pela primeira vez na indústria aeronáutica e mostrou que o trabalho unitário nos custos de estrutura aérea diminuiu com a produção cumulativa (WRIGHT, 1936). Os benefícios da inovação (ou seja, preço de novas tecnologias, exposição social) geralmente aumentam com o tempo, à medida que pesquisas e desenvolvimento de produtos levam a melhorias nos recursos, funcionalidade, qualidade e outros atributos de atratividade do produto (STERMAN, 2000).

Alguns argumentos para esta teoria dizem que a taxa de aprendizado de uma organização aumenta à medida que sua experiência aumenta. A taxa pode variar de várias formas, tanto positivas quanto negativas, alguns motivos incluem o "esquecimento" da organização (ou seja, declínio da acumulação de conhecimento), rotatividade de funcionários, transferência de conhecimento de outros produtos e organizações e também as economias de escala (ARGOTE; EPPLÉ, 1990). Da mesma forma, espera-se que uma organização que aprende, prospere porque explora melhores resultados advindos do domínio pessoal, modelos mentais, construção de visão compartilhada, aprendizado em equipe e pensamento sistêmico (SENGE, 2018).

A curva de aprendizado (consulte Equação 4) aumenta à medida que trabalhadores e empresas aprendem com a experiência, trabalhando mais rápido e reduzindo erros. Então, o custo unitário diminui, possibilitando preços mais baixos dos produtos, aumentando a participação de mercado e a demanda industrial, aumentando ainda mais as vendas. Com maiores vendas, as empresas investem em pesquisa e desenvolvimento, levando a inovações de processo (como automação e treinamento). Esse processo aumenta a produtividade e, ao mesmo tempo, reduz os custos, criando um ciclo de realimentação de equilíbrio (ROSENBERG, 1984). O preço $P(t)$ é utilizado para verificar qual valor de 0 até 1 a variável E^{op} irá assumir no tempo referente.

$$P(t) = P(0) \left(\frac{C(t)}{C(0)} \right)^{li} \quad (4)$$

Onde:

$P(t)$ - função do preço;

$P(0)$ - preço inicial;

$C(t)$ - experiência cumulativa no tempo 't';

$C(0)$ - experiência inicial;

li - índice de aprendizado (força da curva de aprendizado).

- Estágio 4 - Verificação do modelo: para garantir a acurácia do modelo simulado com os dados reais no modo de referência são utilizados métodos estatísticos indicados para verificação do erro como o Coeficiente de Determinação R^2 , Erro Médio Absoluto (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*), Erro Médio Absoluto Per-

centual (MAPE, do inglês *Mean Absolute Percent Error*) e Raiz do erro quadrado médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*).

Embora existam estes métodos, eles não foram utilizados. Esta parte de validação foi conduzida por observação de dados complementares obtidos em relatórios. Não existe no Brasil um documento oficial com dados históricos a respeito da capacidade e da produção de biogás do país. Na seção 6.2 de validação do modelo esta etapa é conduzida e comenta as limitações pertinentes. Além disso na seção 6.2.1 são conduzidos testes de sensibilidade que ilustrarão os valores de máximo e mínimo para o modelo proposto, são designados incrementos pontuais em variáveis selecionadas para observar o comportamento do modelo. Este deve permanecer dentro dos limites especificados pelo documento da EPE sobre o potencial energético do país para 2050 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

- Estágio 5 - Formulação e avaliação de políticas: neste momento a análise prospectiva é conduzida, através da geração e prospecção de cenários.

Neste estágio os cenários simulados foram elaborados em função de uma variável criada chamada de "atratividade percebida" e a data em que ela entra em funcionamento. A atratividade no modelo proposto é composta de quatro fatores, estes fatores serão alterados em sua forma de funcionamento. Ou seja, a atratividade percebida será composta de variáveis com crescimento inicialmente linear, depois com crescimentos em forma de curva exponencial. Esta etapa é realizada na seção 6.3.

Além destas etapas comentadas, tem-se que o processo de modelagem é iterativo e esses passos são repetidos inúmeras vezes até chegar a um modelo que represente os objetivos do sistema estudado (STERMAN, 2000). A metodologia de DS traz um importante arcabouço ferramental e conceitual para a compreensão de transições de sistemas sócio-técnicos e possui grande potencial de aplicação para pesquisas de transições, oferecendo oportunidade de modelagem matemática para esta área que é predominantemente qualitativa e baseada em estudos de caso. A modelagem, portanto, vem crescendo na área de transições sócio-técnicas como uma metodologia de aplicação para entender estes sistemas complexos o qual a Dinâmica de Sistemas é harmônica (PAPACHRISTOS, 2018).

5 RESULTADOS DA ANÁLISE FUNCIONAL

Nesta seção é apresentado o resultado da pesquisa de campo quando foram coletadas 104 respostas no questionário apresentado no Apêndice A. O plano de fundo para formulação do questionário compreendeu as sete funções dos STI e suas atividades relacionadas (BERGEK *et al.*, 2008; TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015). Os dados foram coletados durante Janeiro e Fevereiro de 2020. A análise dos resultados obtidos é apresentada em duas etapas. A primeira é descritiva e apresenta o conjunto das respostas sobre as questões e suas médias. A segunda parte apresenta o resultado da análise fatorial com o programa SPSS Statistics, mais especificamente esta segunda seção discute os 6 construtos (fatores) que emergiram da análise.

Uma terceira parte é dedicada ao resultado da análise funcional, que agrupa os dados das análises descritiva e fatorial a fim de derivar barreiras e relações causais entre os fatores. Estes fatores devem servir de entrada para os testes de cenários no modelo de dinâmica de sistemas. Lembrando os passos de uma análise funcional: o STI é escolhido, as principais estruturas são definidas, as funções são descritas (neste caso, atribuídas uma nota), depois são avaliadas, utilizadas para derivar mecanismos de indução e bloqueio e por fim, são derivadas questões políticas.

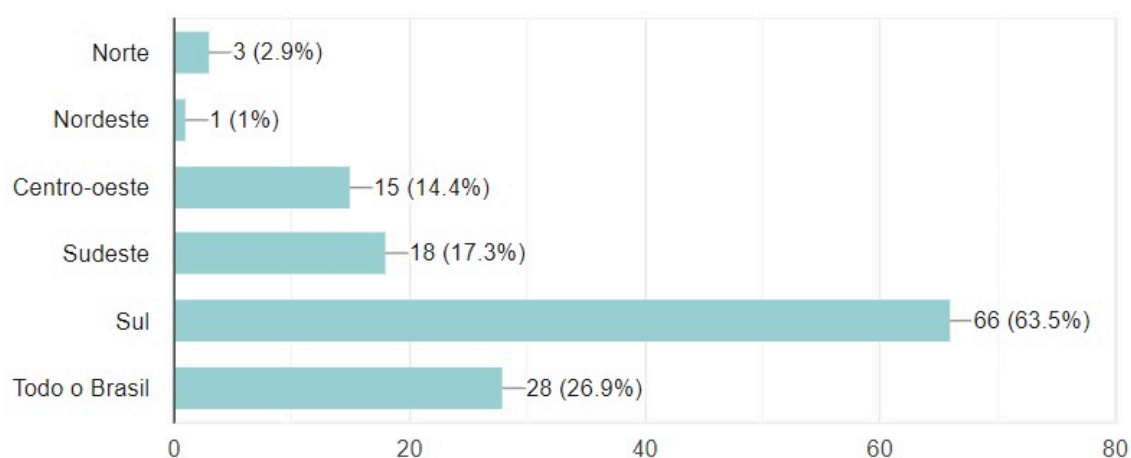
5.1 ANÁLISE DESCRITIVA

A amostra de 104 respostas, após tratamento, pôde ser sumarizada na Figura 28. Nesta figura, particularmente, os respondentes poderiam assinalar mais de uma caixa, portanto o total efetivo é de 131 respostas. Mesmo que o estudo tenha buscado abranger todo o País e que pelo menos 26,9% da amostra afirma ser representantes de mais de uma região do país, um fator de regionalidade pôde ser observado, visto que a maior parte da amostra (63,8%) atua na região sul do Brasil. A regionalidade não foi destacada como uma fraqueza da análise, de fato as regiões sul e sudeste concentraram a maior parte dos eventos relacionado ao Sistema de Inovação do Biogás do Brasil (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019).

A amostra também foi classificada de acordo o papel dos respondentes no sistema, como mostra a Figura 29. Nota-se que a maior parte da amostra compreende fornecedores de equipamentos e serviços (33%) e consultores especializados (23%). Apenas 10% se identificaram como produtores de biogás e, diferente da etapa de validação do questionário, poucos se identificaram como acadêmicos (5%). Então, outro resultado que pode-se averiguar é que o sistema de inovação ainda falha em conectar produtores, sendo mais conciso no agrupamento de fornecedores e consultores (Mesmo com o pedido realizado a Abiogás, no Apêndice F) . Este fato pode ser ligado a fases formativas do desenvolvimento de um SI (MARKARD, 2018).

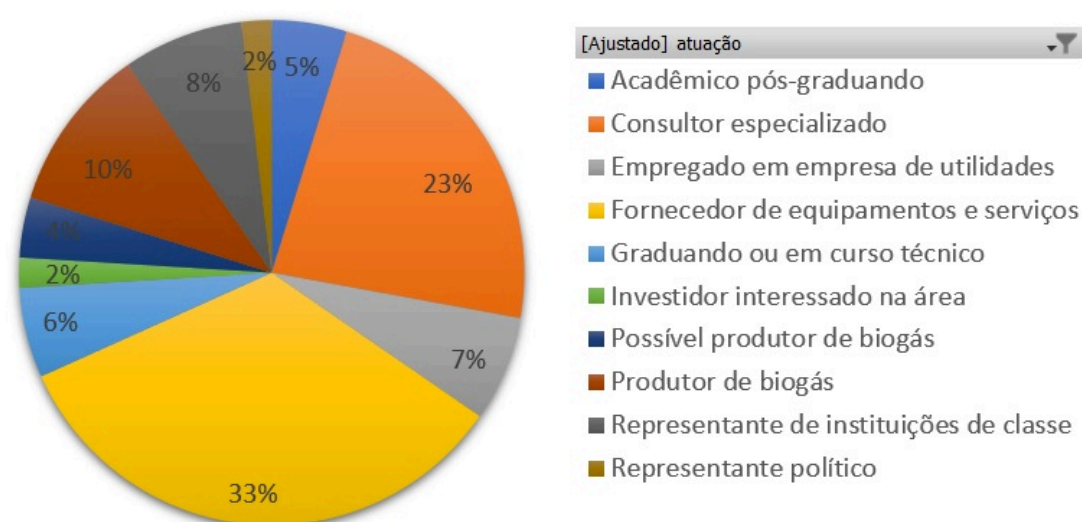
As questões então foram agrupadas de acordo com seu desempenho, como

Figura 28 – Região de atuação dos respondentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Nível de atuação dos respondentes

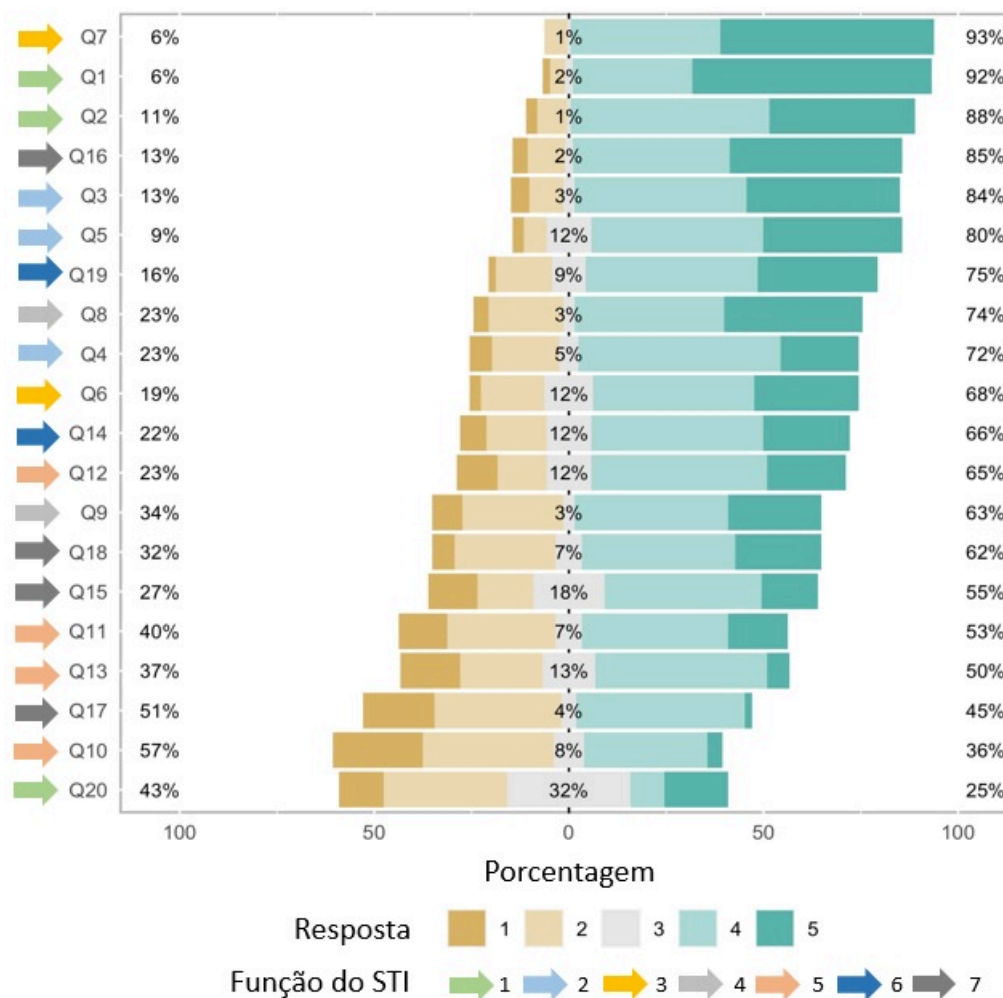


Fonte: Elaborado pelo autor

ilustra a Figura 30. Nota-se que as de melhor desempenho foram Q7, Q1 e Q2. A questão Q7 se referia ao acumulo de conhecimento, ou seja o conhecimento dos atores em relação existência de conferências, seminário e campanhas sobre o biogás. Já as questões Q1 e Q2, destacam a importância das atividades empreendedoras, os atores do sistema classificaram esta função como a principal em questão de desempenho. Já as piores foram as questões Q10 e Q20, sobre a existência de incentivos para os produtores remunerarem seus investimentos e as expectativas dos agentes a respeito da capacidade futura do setor de biogás, respectivamente. A questão 20 era optativa

com valores absolutos e indicou que a expectativa é difusa, não há um acordo ou consenso sobre o crescimento da capacidade de produção de biogás.

Figura 30 – Desempenho por questão



Fonte: Elaborado pelo autor

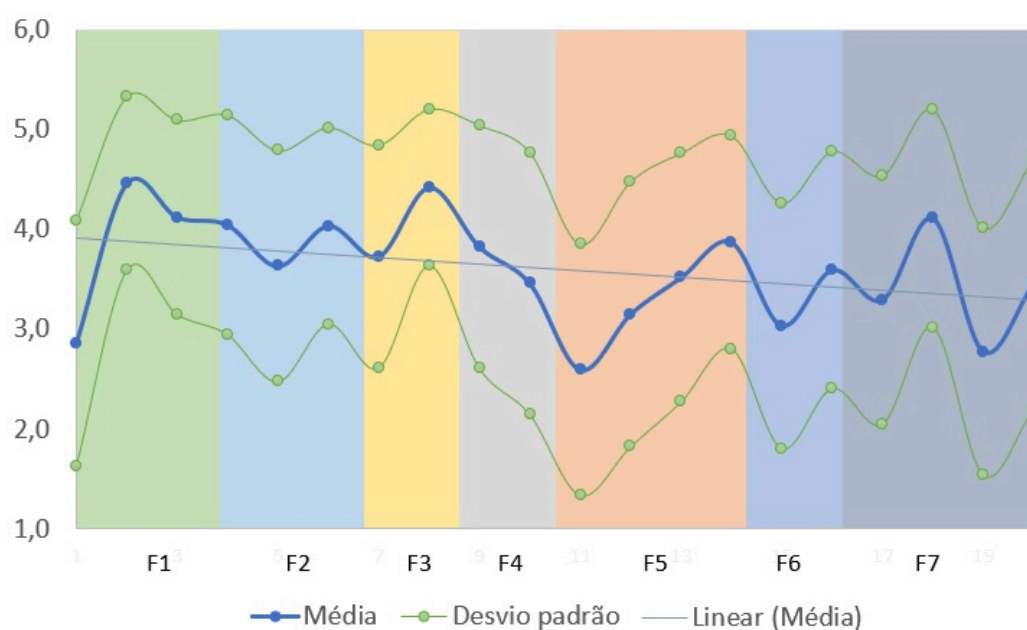
5.1.1 Análise das médias individuais

O próximo passo realizado é a análise das médias na amostra de respondentes Figura 31, considerou-se este resultado como uma digital ou foto do estado de desenvolvimento do STIBB. A principal observação nesta figura é a sua tendência quando analisadas as funções em sequência de F1 a F7, ou seja, as primeiras funções do SI estão mais desenvolvidas que as últimas, concordando que quando um SI está em expansão as tecnologias tendem a preceder o desenvolvimento das instituições, por exemplo com legitimidade e mobilização de recursos.

As primeiras funções indicam que o país tem empreendedores no setor buscando mudanças substanciais no marco regulatório, por exemplo a favor de uma

política nacional específica para o biogás. Pode-se inferir sobre esta figura que as atividades do SI parecem mais relacionadas as estruturas de formação dos nichos protegidos e menos a objetividade do sistema de promover a difusão da tecnologia. No entanto, a imagem ilustra que a difusão de conhecimento e as atividades empreendedoras são as principais forças atuais do sistema e indicam uma fase de expansão do STI (MARKARD, 2018).

Figura 31 – Médias e desvios da amostra de respondentes

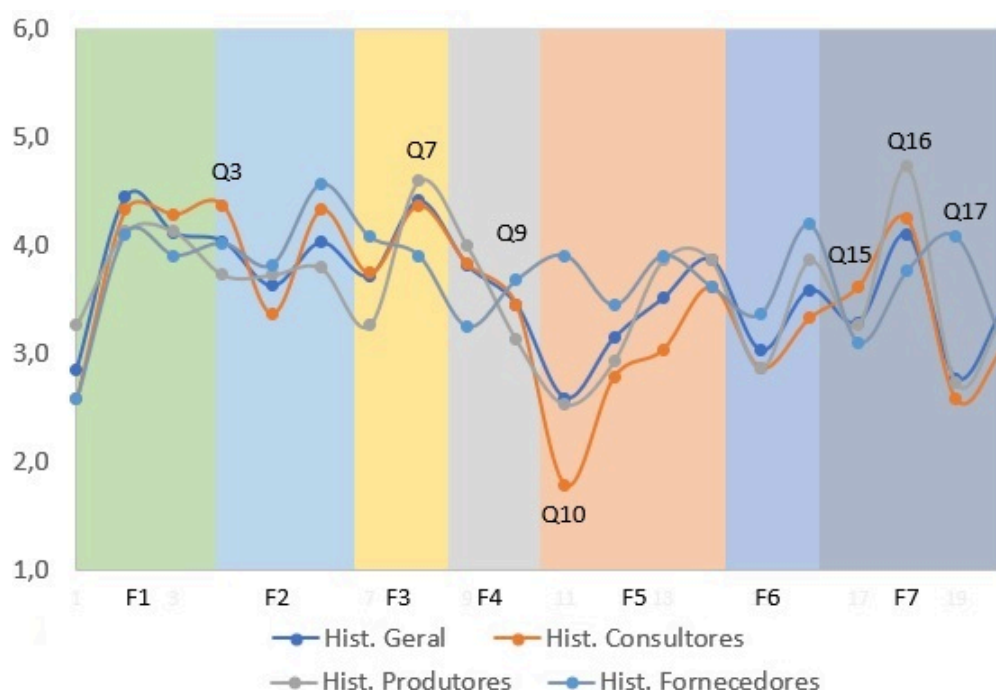


Fonte: Elaborado pelo autor

Através da segregação de três grupos de respondentes, nomeadamente, Fornecedores, Consultores, Produtores outras observações podem ser feitas, veja a Figura 32. As médias para os fornecedores, aponta a mesma tendência de que as primeiras funções estão mais desenvolvidas. Importante salientar a Q5 apresentando valor médio alto e erro médio (desvio padrão) relativamente baixo, indicando que para a com os produtores de tecnologia, os estudos técnicos sobre o potencial de resíduos orgânicos estão presentes no desenvolvimento do sistema. As médias para os Consultores, deixa ainda mais evidente que as primeiras funções estão mais desenvolvidas. Importante salientar Q10 apresentando valor médio baixo, indicando que realmente o país não dispõe de subsídios para auxiliar os produtores. Algo ruim para um sistema ainda em expansão.

As médias para os Produtores apresenta novamente o padrão funcional já mencionado, além disso apresentou três questões com concordância forte para discussão Q7, Q14 e Q16. Primeiramente a Q16 com média elevada indica que os produtores percebem grupos organizados buscando fortalecer o setor, por exemplo associações

Figura 32 – Médias e desvios sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor

buscando legitimidade para o SI. A Q7 com resultado elevado também ilustra que os produtores buscam conhecimento através de seminário e conferências. Para os produtores o sistema aparenta estar em desenvolvimento e eles fazem sua parte neste processo. A Q14 indica que os produtores percebem um auxílio de países mais desenvolvidos, algo que de fato foi marcado pela por exemplo pela cooperação Alemã no desenvolvimento do SI (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019).

Observando as intersecções, outras conclusões podem ser feitas. Logo após Q3 os consultores reduzem muito a média para Q4, indicando que eles percebem o interesse das instituições no desenvolvimento do setor, porém não acreditam muito na capacidade destas instituições em absorver e adaptar conhecimentos de outros países. Este fato é comum, visto que importar tecnologias é algo mais simples que importar instituições (i.e., regras, leis, marcos legais). Outro fato remete aos produtores, inferem que pouco é ensinado em universidades e escolas sobre o biogás, mesmo percebendo seminários, conferências e campanhas de sensibilização. Este fato pode estar relacionado ao SI ter produtores que interagem pouco com universidades e cursos especializantes sobre o tema. Este fato pode ser um pouco controverso, mas indica que o SI possui um desalinhamento neste aspecto. Cursos de capacitação e produtores precisam se desenvolver em conjunto.

Novamente observa-se que Q10 relacionada a subsídios é mais percebida por

Consultores, no entanto agora percebe-se que os fornecedores de tecnologia não percebem este aspecto com a mesma clareza. Outro destaque é dado a Q17 que é percebida com média alta somente pelos produtores, sendo esta uma questão focada na legitimidade do setor, os produtores acreditam que logo o país terá uma lei federal para o biogás, enquanto o restante dos respondentes percebe que não, o país não deve ter uma lei específica para isso no curto prazo.

5.1.2 Análise dos diagramas de caixa

Os diagramas de caixas ou *Boxplots* permitem mais comparações e extrações de resultados, sendo uma forma alternativa aos histogramas de mostrar resultados de análise de dados. A Figura 33 mostra ilustra as medianas, máximos, mínimos e os quatro quartis dos dados coletados. A priori pode-se perceber que existe pouca concordância nas respostas, ou seja, pouco consenso no nível atual do sistema.

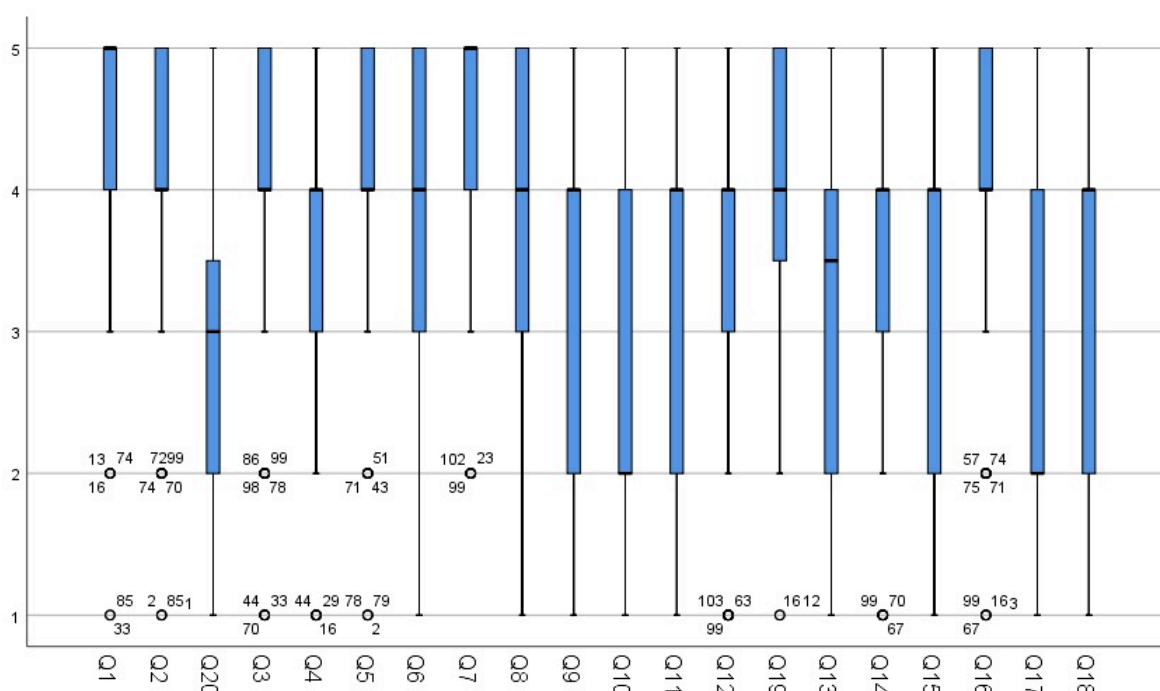
Observa-se que Q1 e Q7 obtiveram os maiores resultados, ou seja, a percepção dos atores é que há um aumento no número de plantas de biogás no país e que existem eventos de promoção do setor. As duas questões são cruciais para o desenvolvimento do STI, reforçando seu estágio de expansão. As questões Q2, Q3, Q4, Q5, Q16 e Q19, alcançaram medianas altas, metade dos respondentes destas perguntas acreditam que a afirmação estava entre 4 e 5, ou seja, há um fluxo perceptível de novos fornecedores, novos conhecimentos, estudos técnicos atrelados a um STI do biogás no país. Com relação a Q16 e Q19 os atores acreditam que o novo mercado de gás do Brasil deve incentivar o uso do biogás, de forma que novos grupos organizados poderão influenciar decisões políticas ou conduzir mais lóbi a favor do biogás.

Algumas questões apresentaram a mediana alta, porém o primeiro e o segundo quartil foram bastante dispersos por vezes no valor mínimo da escala. As questões Q6, Q8, Q9, Q11, Q12, Q13, Q14, Q15 e Q18 tiveram este comportamento. Pode-se considerar que os atores do sistema relutaram em concordar com estas afirmações. Portanto, não existem muitas universidades interessadas no biogás, nem políticas específicas para tratamento de resíduos, pouco interesse na criação de parcerias público-privada. Quanto ao Renovabio (Q12), dois quartis dos atores o percebem como uma fonte de competitividade para o biogás de forma uniforme para os setores envolvidos, porém os dois primeiros quartis não o percebem assim, além disso os atores não percebem como as leis estaduais podem ajudar no desenvolvimento do setor. Os resultados mais preocupantes, mostram que os objetivos e metas do STI ainda não estão bem claros, que o PNBB não tem pouca probabilidade de ser lançado, assim como a não existência de um mercado para biofertilizantes, fatores essenciais para que o sistema passe de um estágio de expansão para maturação.

Os piores resultados foram atribuídos as questões Q10, Q17 e Q20. Portanto os atores percebem a não existência de subsídios para auxiliar novos produtores

a remunerarem seus investimentos, fator imprescindível para o desenvolvimento do setor, como ocorre em diversos STIs de biogás que já se desenvolveram. Além disso os atores não percebem a população acreditando no biogás e nos ODS, portanto uma falha na legitimidade informal do biogás. A última questão, Q20 indica que o volume de biogás com certeza irá crescer, porém não existe consenso algum sobre o quanto, talvez a principal falha do sistema seja justamente esta, não existe um planejamento para o sistema alcançar ou se desenvolver, em termos de energia disponível.

Figura 33 – Diagrama de caixas de cada questão



Fonte: Elaborado pelo autor

O diagrama de blocos na Figura 34 separa os respondentes pelo tipo, assim permitindo algumas observações mais pontuais sobre cada grupo. Diversas conclusões podem ser feitas, cabe aqui o destaque das questões chave e dos grupos chave.

Observa-se que Q1 referente as percepção de novas plantas de biogás foi puxada para cima pelas respostas dos consultores e dos representantes de instituições. A questão Q2 teve melhores resultados com o grupo de fornecedores e grande discordância na área acadêmica, possivelmente pelo pouco contato desta área com empresas prestadoras de serviços. A questão Q20 obteve resultados baixos pelos aos consultores e aos empregados de empresas de utilidades, indicando que realmente as expectativas de crescimento na capacidade de produção estão baixas.

A questão Q3 referente a criação de conhecimento obteve bons resultados com fornecedores e consultores, os quais conhecem as notas técnicas e publicações

do setor. As questões Q4 e Q5 , Q6 não apresentaram notas altas, mas foram bem constantes entre os respondentes.

A questão Q7 referente aos eventos sobre biogás obteve margem ruim apenas com empregados de empresas de utilidades, indicando que estes não estão percebendo este tipo de realização. A questão Q8 foi alta apenas para os produtores e possíveis produtores. Então este grupo percebe metas e objetivos, que não são percebidos por todos, estas metas percebidas podem ser mais locais, ou do próprio empreendimento.

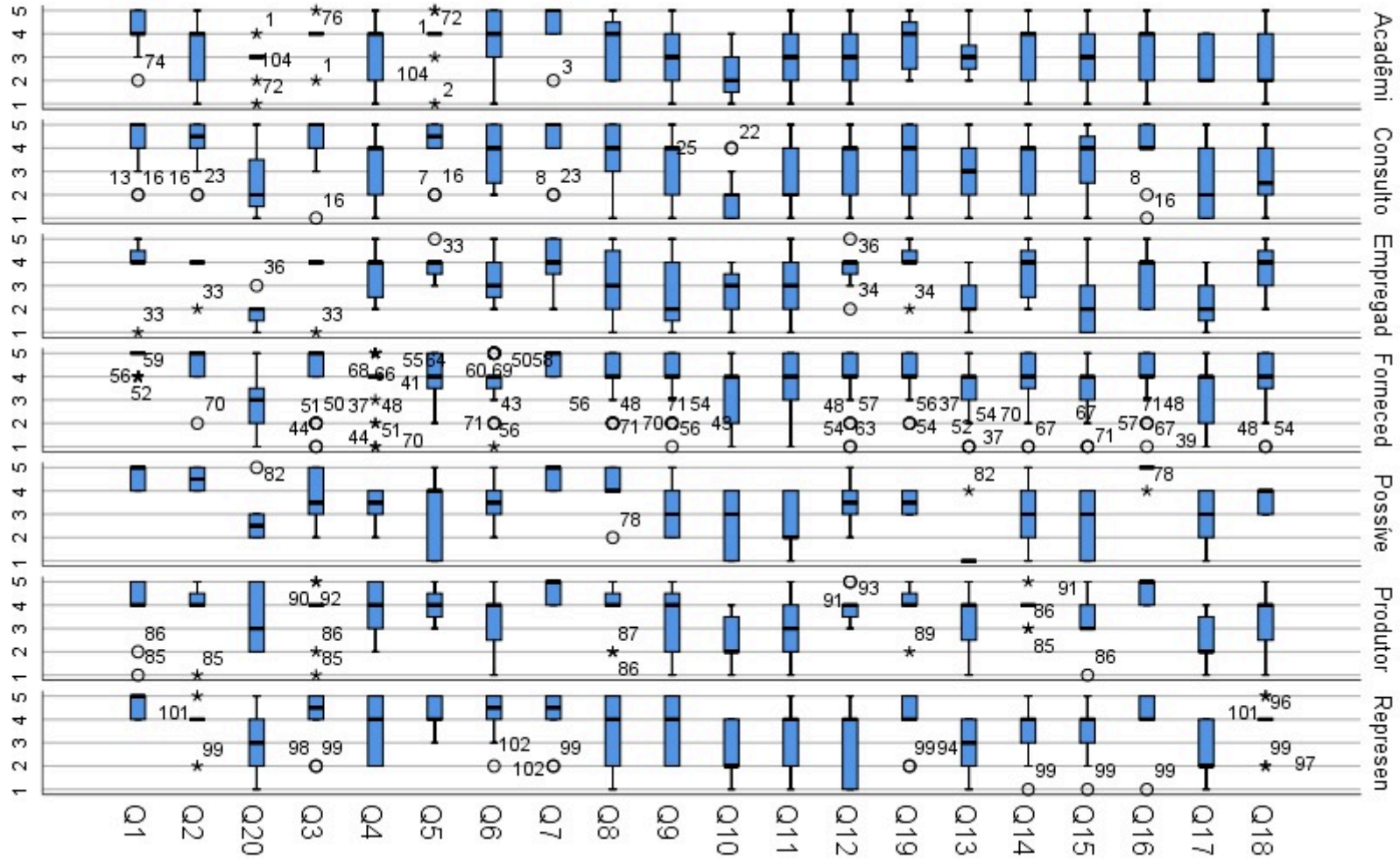
As questões Q9, Q11, Q14, Q15 e Q17 foram bem divergentes, ou com muita amplitude nos quartis. Portanto não rendem conclusões nesta análise. Já a questão Q10 aparece com um fato interessante, se refere aos incentivos financeiros e teve margens baixas para os produtores e consultores, no entanto, relativamente alto para os fornecedores de equipamentos e serviços. Aparentemente os dois primeiros grupos devem estar mais alinhados para responder a questão pois são afetados diretamente, os fornecedores percebem mais incentivos, possivelmente isso acontece devido ao recente consolidação do STI.

A questão Q12 sobre o RenovaBio foi relativamente constante, mas com acadêmicos, consultores e representantes de instituições com opiniões bem divergentes, o que indica que os atores não percebem ao certo se este programa incentivará o biogás. A questão Q19 sobre o novo mercado de gás apresenta opiniões diferentes entre acadêmicos e consultores, mas teve bastante concordância entre produtores e possíveis produtores, fornecedores e empregados de empresas de utilidades. Portanto o STI não sabe como estes programas irão incentivar o biogás, mas acreditam que irá, mesmo que de forma indireta.

A questão Q13 foi muito negativo para possíveis produtores e discordante com outros tipos de atores. Uma interpretação simples disso é que os atores não conhecem linhas de financiamento, enquanto os produtores menos ainda, uma falha grave do sistema. A questão Q16 teve bastante divergência principalmente entre consultores e empregados de empresas de utilidades, novamente, pouca certeza sobre as atividades de lóbi e a legitimidade.

A questão Q18 sobre o PNBB obteve medianas altas com empregados de empresas de utilidades e fornecedores, que acreditam que o programa será instaurado nos próximos anos, porém no grupo de acadêmicos e consultores as medianas foram baixas, então o grupo mais envolvido com a ideia do programa possui poucas expectativas na instauração de um PNBB no curto prazo.

Figura 34 – Diagrama de caixas de cada questão por tipo de respondente



Fonte: Elaborado pelo autor

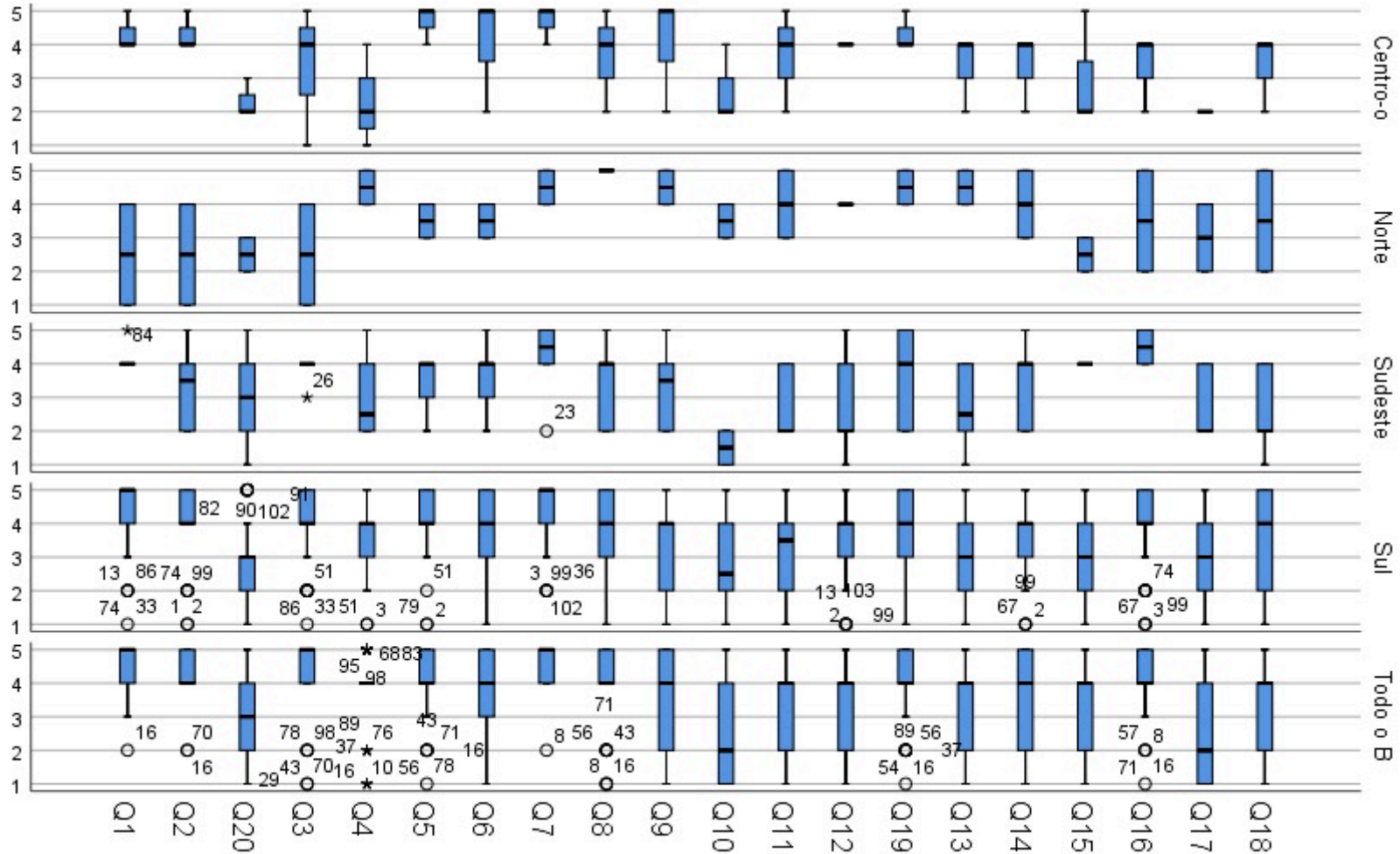
O diagrama de blocos na Figura 35 separa os respondentes pela região onde atuam, este gráfico tem pouco valor analítico, pois como já foi comentado, a amostragem obteve 50% de respondentes da região Sul, as outras regiões não permitem grandes inferências. Pode-se neste caso comparar a situação do Sul com o resto do país.

Nota-se que as questões referentes a função F1 (Q1, Q2 e Q20) são relativamente semelhantes entre os atores da região sul e os que agem em todo o Brasil. A Q3 que aborda a capacidade de absorver conhecimento teve mediana mais alta entre os atores que agem em todo o Brasil, e os locais da região sul foram um pouco mais conservadores, percebem mais a falta de adaptar o conhecimento dos países desenvolvidos para a realidade do Brasil.

A questão Q13 sobre as linhas de financiamento apresentou mediana maior ao observar o país como um todo, e menor para região Sul, o que indica que a região Sul possui poucas linhas em comparação as outras regiões. A questão Q15 sobre leis estaduais também teve o mesmo comportamento, ambas as questões apresentaram grande amplitude, então há bastante divergência entre a percepção dos atores em suas regiões. Já a questão Q17 sobre a percepção da população sobre o desenvolvimento sustentável apresentou mediana superior para região Sul, possivelmente esta região compreende melhor a importância do biogás no cumprimento da sustentabilidade.

Cabe ressaltar que uma grande parte das questões (Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, Q14, Q16 e Q18 e Q19) tiveram medianas muito semelhantes ao comparar todo o país com a região sul. Esta fato indica que a região Sul compreende bem o que se passa no STIBB, possivelmente sendo um dos balizadores da situação do país. A análise deste diagrama de caixas, deixa claro que o STIBB é na verdade composto de outros STIs regionais, que cada um possui seu ritmo e características e que principalmente eles não possuem identidade clara. Os atores divergem em opinião quando consideram a delimitação nacional e regional.

Figura 35 – Diagrama de caixas de cada questão por região do respondente



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 ANÁLISE FATORIAL

A análise fatorial tem por objetivo identificar dimensões latentes em um grupo de dados, ela busca sintetizar e agrupar as questões em um número menor de fatores. Além de possibilitar uma confirmação dos fatores utilizados previamente para formular o questionário (veja (TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015)). Para uma ilustração mais completa da construção e do resultado da análise fatorial veja o Apêndice 3, aqui no texto, optou-se por apresentar apenas o resultado da matriz de rotação dos fatores (método Varimax) na Tabela 16. Esta tabela ilustra efetivamente quais variáveis pertencem a cada fator. Cada linha representa uma variável e cada uma das colunas é um dos fatores. Os valores dispostos na matriz representam as cargas fatoriais, isto é, a correlação de cada variável com cada fator. Identificamos as variáveis que pertencem a cada fator observando os valores das cargas.

Tabela 16 – Matriz de componentes rotativa

Questão	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
F4 - Q8	0,814	0,045	0,112	-0,138	0,184	-0,016
F3 - Q7	0,736	0,192	0,047	0,092	-0,016	-0,254
F3 - Q6	0,723	0,041	-0,159	0,140	0,212	0,210
F4 - Q9	0,690	0,139	0,068	-0,082	0,156	0,152
F7 - Q15	0,631	0,154	0,099	0,376	-0,132	0,184
F2 - Q5	0,516	-0,261	0,195	0,141	0,114	0,430
F7 - Q16	0,511	0,410	0,375	0,110	-0,281	-0,227
F5 - Q12	0,027	0,758	0,105	-0,160	0,216	-0,008
F7 - Q18	0,144	0,656	0,145	-0,037	0,172	0,193
F7 - Q17	0,096	0,640	0,057	0,363	0,038	-0,123
F5 - Q19	0,201	0,580	-0,058	0,393	0,118	0,267
F1 - Q2	0,097	0,221	0,842	-0,027	0,140	0,073
F2 - Q3	0,061	0,062	0,682	0,393	-0,045	0,237
F1 - Q1	0,129	-0,006	0,599	0,188	0,452	0,148
F2 - Q4	0,040	0,042	0,253	0,748	0,104	-0,148
F5 - Q10	0,242	0,171	0,120	-0,088	0,724	-0,100
F1 - Q20	0,027	0,134	0,184	-0,139	-0,047	0,774
F6 - Q14	0,287	0,378	0,257	0,142	-0,060	0,367
F6 - Q13	0,112	0,361	-0,011	0,364	0,488	0,290
F5 - Q11	-0,004	0,343	0,139	0,262	0,465	-0,066

Método de Extração: análise de Componente Principal.

Método de Rotação: Varimax com Normalização de Kaiser.

a. Rotação convergida em 9 iterações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após realizado os agrupamento, separa-se as questões mais relevantes para cada fator em ordem decrescente e então nomeia-se os fatores. Assim, seis fatores ou construtos latentes emergiram para discussão:

- Fator 1 - Reconhecimento de existência de um SI por parte dos atores. Associado as questões: Q8, Q7, Q6, Q9, Q15, Q5 e Q16;

- Fator 2 - Legitimidade formal e informal complementar do biogás e subprodutos. Associados as questões: Q12, Q18, Q17, Q19, Q16, Q14, Q13, Q11;
- Fator 3 - Expectativas entre as atividades empreendedoras (produtores e fornecedores). Associados as questões: Q2, Q3, Q1, Q16;
- Fator 4 - Características transformadoras estruturais (Evolução) do SI de longo prazo; Associados as questões: Q4, Q3, Q15, Q17, Q19, Q13;
- Fator 5 - Construção de incentivos e políticas para formação de mercado em curto e médio prazo; Associados as questões: Q10, Q1, Q11, Q13;
- Fator 6 - Perspectivas futuras positivas do marco institucional. Associados as questões: Q20, Q14, Q5;

5.2.1 Fator 1 - Reconhecimento de existência de um SI por parte dos atores

O fator mais marcante da análise é o fator 1 nomeado como o fator que gera uma identidade ao STIBB, os atores percebem a existência de um sistema com objetivo de promover a tecnologia do biogás por diversos meios, e é isto que o fator 1 destaca. As questões Q8, Q7, Q6 e Q9 apresentaram o maior peso dentro deste fator, demonstrando que nos últimos anos a identidade do sistema vem sendo criada com o foco correto, em seus objetivos (Q8) e os modos são os seminários, conferências, universidades, cursos de capacitação e as políticas para resíduos. Além disso são questões que conforme os diagramas de caixa, apresentaram medianas altas, com ênfase a a questão Q7, salientando a importância dos encontros entre agentes e os trabalhos de divulgação.

Pode-se destacar neste aspecto, por exemplo os Fóruns do Biogás quem em 2019, aconteceram em três macro-regiões do País, no Sul (Chapecó/SP), Centro-Oeste (São Paulo/SC) e Norte-Nordeste (Natal/RN), além de notas técnicas e materiais publicados pela ABiogás, EPE e CIBiogás. As universidades por sua vez admitem pesquisadores que buscam resolver problemas pontuais do STI. Em conjunto, estes itens fortalecem uma duas principais funções de um SI em fase de expansão, a difusão do conhecimento através de redes (F3) e a orientação de pesquisa (F4).

Outra função presente neste fator é a legitimidade (F7), o reconhecimento do STI perpassa o reconhecimento do biogás nos estados federativos, que por sua vez presenciam as atividades de lóbi em nível local. A nível federal estas atividades podem ser também observadas, como os grupos organizados puderam por exemplo incluir o biogás como fonte de créditos no RenovaBio. No entanto o argumento aqui é que o nível local é que inicia o processo de criação de identidade do STI.

A questão Q5 referente aos estudos de potencial, obteve mais relação com estas funções (F3, F4 e F7) do que com sua função de origem (F2), indicando que estes

tipos de estudo fazem parte do reconhecimento do sistema e inclusive da legitimidade. O potencial de biogás do país é um dos principais quesitos no que hoje é o principal motor de desenvolvimento do STI. Estes estudos podem dar direção para as atividades que o STI deve incluir em seus próximos passos.

5.2.2 Fator 2 - Legitimidade formal e informal complementar do biogás e subprodutos

O segundo fator apresentou apenas uma questão como central (Q12), e três outras com peso significativo (Q18, Q17 e Q19), notoriamente associadas a função de legitimidade (F7) e formação de mercado (F5). As questões Q12 e Q19 possibilitam a observação mais importante neste fator, ao visualizar o diagrama de blocos, a mediana para a criação de mercado uniforme para os produtores de biogás a partir do Renovabio e as perspectivas de desenvolvimento do setor de biogás com o novo mercado de gás são altas, fazendo destes as principais fontes de criação de mercado no cenário atual do STI. Além disso, estes programas são também fontes de legitimidade, se as observações dos atores estiverem corretas.

De forma sucinta, o programa que deve priorizar produtores de etanol e biodiesel, o programa deve ser fortalecido durante a crise atual devido a situação pandemia e quarentena, pois a demanda do setor deve retroceder. Os preços do petróleo no último semestre caiu de cerca de 60 dólares por barril para apenas 30 em Março de 2020. A soma destes fatos faz do Renovabio e dos possíveis subsídios necessários, como políticas de formação de mercado, um balizador para assegurar que indústrias reduzam suas perdas e possam talvez continuar investindo na produção de biogás.

As outras duas questões foram previamente associadas a legitimidade, sendo referentes ao PNBB e a percepção da população sobre a relação do biogás com os ODS. Como o diagrama de blocos indicou que o PNBB tem dois quartis que acreditam em sua implantação, e que a percepção da população sobre o biogás é baixa, com dois quartis. Pode-se afirmar que o PNBB é essencial para que a legitimidade informal seja percebida. Como já comentado, o biogás precisa parecer parte das atividades da sociedade para que seja incentivado, por exemplo no transporte público.

Este fator ainda teve relações leves com as questões Q16, Q14, Q13 e Q11. Portanto o fator é levemente associado a mobilização de recursos, e aos subprodutos do biogás como o biofertilizante. Vale ressaltar que o biometano, é um subproduto do biogás e pode ser incluído neste fatos quando abordado o novo mercado de gás. Portanto a função F6 permaneceu como segundo plano para a legitimidade do STIBB, incluindo os recursos internacionais e as parcerias público privadas. Outro destaque deste fator observado pela assistência internacional, concordando com iniciativas mais antigas como o projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS). Este tipo de cooperação continua a fortalecer a

identidade do setor.

As oportunidades neste fator se referem a possibilidade do Renovabio e o Novo mercado de Gás serem integrados e compreendam as demandas do PNBB. Existe uma lacuna entre as duas políticas e uma possibilidade de cruzá-las a partir do biogás. Estas políticas precisam ser mais integradas, estudadas e propostas de maneira a complementar o desenvolvimento sustentável, por exemplo impondo uma demanda de CBIOs para as distribuidoras de gás natural, a ser atendida apenas pelo biogás. Vale ressaltar que esta é uma expectativa emergente chave nesta análise.

5.2.3 Fator 3 - Expectativas entre as atividades empreendedoras

O terceiro fator emergiu bem alinhado com as atividades empreendedoras (F1) do sistema. Este fator ainda pode ser segregado em dois tipos de empreendedores, os quais possuem dinâmicas diferentes como foi mostrado na análise descritiva, são eles os produtores de biogás (Q1 com maior peso) e os fornecedores de tecnologias e provedores de serviços (Q2). Ainda pode-se incluir a questão (Q3) que chama atenção ao desenvolvimento de novos conhecimentos.

Como destacado nos diagramas de blocos são três questões que tiveram medianas altas, inclusive com pouca amplitude dos quartis inferiores. Portanto as expectativas e a credibilidade dada as novas plantas e novos fornecedores são fatores chave no desenvolvimento do STIBB. Este fator pode ser destacado como o principal no que tange a prospecção setor, uma melhor estimativa do crescimento deste fator, em combinação com os fatores 1 e 2 pode balizar as atividades seguintes do STI.

O desenvolvimento de conhecimento pode reduzir o custo da transformação do biogás em energia, como uma curva de aprendizado, enquanto as novas plantas podem formar uma expectativa mais concisa da disponibilidade futura de biogás. Nota-se que a questão Q20, que apareceu apenas no fator 6, deveria estar incluída neste fator, porém devido a discordância entre os atores, não pode-se afirmar que o STI tem uma boa avaliação de suas perspectivas futuras.

5.2.4 Fator 4 - Características transformadoras estruturais

O quarto fator apresentou apenas uma questão com alto peso, a Q3 destaca o interesse de instituições e produtores em desenvolver conhecimento, uma questão que a priori foi relacionada a função F2. A função F2 foi identificada no primeiro fator então alguma interação passou despercebida. O que distingue a função F2 neste Fator 4 é a diferença entre pesquisa e desenvolvimento nacionais e internacionais. A separação desta questão indica que os atores do sistema percebem a distância entre os investimentos em pesquisa locais e os internacionais.

Em sequência este fator também pode ser analisado pelas suas correlações fracas com as questões Q19, Q13, Q17, Q15 e Q3 que fazem parte de quatro funções

diferentes do SI. As questões se referem a tema como leis estaduais e federais, que por sua vez promovem a percepção da população sobre o biogás. Há neste conjunto evidências de diversos processos transformativos que estão ocorrendo no SI com características de curto e médio prazo, como o novo mercado de gás, desenvolvimento de novos conhecimentos e novas linhas de financiamento. Estas correlações fracas não permitiram o destaque de nenhuma função do SI em específico, no entanto pode-se fazer uma referência ao padrão de transição em sistemas sociotécnico, em especial o padrão de reconfiguração.

Nestas mudanças os regimes dominantes oferecem pouca resistência ao surgimento do STI e há uma gradual transformação destes enquanto se adaptam a nova tecnologia (DURÃO, 2017; GEELS; SCHOT, 2007). Este tipo de mudança pode ser associada a competição e tensão entre os fornecedores e provedores de serviços, que demoram para se adaptar as novas instituições ou regras, então as correlações fracas podem estar representando estes conflitos.

5.2.5 Fator 5 - Construção de incentivos e políticas para formação de mercado

O quinto fator destacou apenas a questão Q10 sobre os subsídios, e teve relações baixas com as questões Q1, Q13 e Q11. Os principais incentivos para os produtores de biogás hoje, estão relacionados aos sistema de compensação de energia elétrica (i.e., *net metering* onde o produtor troca a energia injetada por descontos em faturas futuras com a distribuidora local, e a isenção do ICMS sobre a energia consumida na unidade, definidos por cada estado.

Fica evidente a relação com a questão Q1 sobre o surgimento de novas plantas de biogás. No entanto vale ressaltar que enquanto as medianas da Q1 foram altas, Q10 não obteve o mesmo sucesso, nem Q11 sobre os fertilizantes. Possivelmente este fator deve ser beneficiado por novas linhas de financiamento (Q13) e algo muito importante e pouco discutido, inclusive no PNBB, há uma necessidade de subsídios não somente para a energia produzida pelo biogás. mas também para a formação de um mercado de biofertilizantes. A literatura defende isto, o foco da cadeia de um STI deve ser a manutenção dos ciclos de nutrientes.

5.2.6 Fator 6 - Perspectivas futuras positivas do marco institucional

O sexto fator apresentou forte correlação com a questão Q20 e baixas correlações com as questões Q5 e Q14. Uma previsão do potencial de produção é extremamente dependente do marco institucional, por isso a relação com a questão Q5 sobre as leis estaduais de biogás, o argumento aqui é que as instituições precisam formular regras que permitam uma melhor análise prospectiva do potencial de biogás do país. Assim, o marco regulatório faria do biogás um ativo estratégico mais tangível, a partir de sua inserção na matriz energética com previsões mais corretas.

Como destacado no diagrama de blocos os atores não compreendem o montante de biogás que pode ser acessado no país, nem como este pode contribuir a matriz energética. Então, o argumento que melhor exprime as correlações deste fator é que tecnologias podem ser importadas com certa facilidade, enquanto adaptações a instituições, regras e normativas são extremamente difíceis, principalmente em economias altamente burocráticas e protecionistas como o caso do Brasil. Assim este fator também não pode ser dedicado a uma função específica, embora tenha boa relação com a legitimidade.

5.3 AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES

Como mencionado anteriormente as primeiras funções estão mais desenvolvidas que as últimas. A avaliação destas funções faz bastante referência ao diagrama de caixas dos respondentes e busca sintetizar as análises feitas até aqui. O objetivo é sintetizar as características que estão fortalecendo ou impedindo tais funções de se desenvolverem. A seguir elas são comentadas, em ordem crescente.

As atividades empreendedoras (F1) obtiveram ótimo desempenho, elas são de fato percebidas pelos atores e foram bem avaliadas, principalmente sobre novas plantas de biogás, no entanto os atores demonstraram pouca percepção do quanto. Em síntese existe a percepção qualitativa, sem a quantitativa. Por exemplo, os agentes do setor percebem um bom fluxo de novas plantas, mas não sabem exatamente quantas plantas estão surgindo. Isto pode ser uma limitação da regionalidade ou da falta de estudos quantitativos do surgimento de plantas no País. Sendo que o melhor levantamento foi realizado apenas em 2019 e publicado em 2020 (veja, (CIBIOGÁS, 2020)). O empreendedorismo no fornecimento de serviços também está em crescimento, este fator é apoiado pelo número de respondentes fornecedores de equipamentos. Embora fornecimento de equipamentos e surgimento de serviços sejam paralelos, pode-se dizer que em estágios iniciais, primeiro há a adoção dos equipamentos.

O desenvolvimento de conhecimento (F2) obteve medianas relativamente altas (todas 4) e bom desempenho, os atores percebem a existência de estudos técnicos sobre os potenciais de biogás e organizações desenvolvendo novos conhecimentos. Já a capacidade de adaptar tecnologias é ligeiramente menos conhecida pelos atores. O que ocorre na prática é que muitos produtores optaram por iniciar a exploração da tecnologia por conta própria, sem necessariamente solicitar consultoria ou empresas de engenharia, com a ideia de reduzir os custos de investimento. Em alguns casos a tecnologia poderia ser mais adaptada as realidades dos produtores, por exemplo biodigestores aquecidos em regiões mais frias. Outro fator relevante para a adaptação de tecnologias é o papel de instituições de pesquisa, como a EMBRAPA, pelo menos no caso de Santa Catarina, já existe grande conhecimento no processamento de resíduos da suinocultura.

A difusão do conhecimento através de redes (F3) apresentou excelente desempenho no que tange as conferências, seminários e campanhas de sensibilização, no entanto falha no âmbito técnico e acadêmico. Embora uma parte dos atores percebam a presença destes temas em organizações, grande parte não percebe. Como os atores são parte do sistema, é uma grande falha. Desde 2018 o papel, por exemplo dos Fóruns do Biogás e Biometano tem sido expandir a rede de atores que reconhecem o papel do biogás no desenvolvimento socioeconômico do país. Uma das principais funções destas iniciativas é exatamente relacionar técnicos, acadêmicos, políticos e profissionais para que compreendam o extenso potencial inexplorado de biogás no país e retornem para suas organizações com ímpeto de mudança em instituições. Estas conexões são as fundações das novas instituições (i.e. novas regulamentações, normas técnicas, estudos científicos), são como um motor para o cumprimento das outras funções do sistema de inovação.

A orientação de pesquisa (F4) obteve desempenho médio, uma parte dos atores percebe os objetivos do sistema (e.g., difusão de conhecimento e tecnologia), no entanto novamente uma grande falha ocorre, pois muitos atores não percebem como realizar estes objetivos por meio de objetivos regulatórios (e.g., redes locais de distribuição de biogás) e tecnológicos (e.g., biodigestores de alto rendimento). Os objetivos de difusão de longo prazo são pouco claros, há pouca perspectiva de instauração de políticas públicas que separem os diferentes setores de biogás para receberem incentivos (e.g., embora existam propostas, os atores não conseguem visualizar os resultados de suas implementações). Os objetivos de curto prazo, pontuais, precisam estar claros, por exemplo, quais os próximos passos para atingir paridade em preço do biogás com o diesel. O mesmo acontece com as políticas locais que devem iniciar o processo de legitimidade. Pode-se inferir então, que as políticas locais não possuem objetivos claros, passíveis de interpretação simples pelos diversos atores do sistema.

A formação de mercado (F5) teve desempenho médio, indicando que embora uma parte dos atores percebam o programa Novo Mercado de Gás e o Renovabio como oportunidades de mercado para o biogás, não concordam que existam incentivos para remunerar seus investimentos. O que acontece é que preço é fundamental quando fala-se de bens substitutos, como é caso de GN e Biometano ou mesmo gasolina e etanol. No caso do etanol, em alguns estados ele consegue ser mais competitivo, mas ainda há questões ligadas à estrutura da sua comercialização e à externalidades envolvidas nessa relação que precisam ser equacionadas para que o etanol seja ainda mais competitivo. No que se refere à comercialização, o combustível fóssil é dominante na cadeia de distribuição. No que se refere às externalidades, o serviço que o biogás presta à sociedade em termos de redução de emissões não é precificado, algo que em partes o Renovabio busca incluir. Essa transferência de renda de um setor para o outro vai tornar o setor de biocombustíveis mais competitivo, em conjunto o biogás ao

considerá-lo com a menor pegada de carbono entre os biocombustíveis. Efetivamente para o setor de biogás, a política servirá para produtores de biogás de grande porte, possivelmente apenas aquele de aterros sanitários e os da indústria sucroenergética. Portanto, não é a política de biogás/resíduos que o país ainda precisa.

Com relação ao programa novo mercado de gás, este é um programa para o setor de GN, busca por exemplo abrir as unidades de processamento de gás para o mercado privado. O programa não possui nenhum direcionamento para o biogás, o que pode ocorrer é um apoio indireto, ao expandir o mercado de GN pode-se criar no longo prazo oportunidades para o biogás/biometano. Em síntese, os atores acreditam nos programas citados, mas não apresentam certeza que a função F5 terá bom desempenho em promover o biogás a partir dos programas mencionados.

A mobilização de recursos (F6) teve desempenho médio, há uma clara falta de conhecimento na forma de acessar as linhas de financiamento com taxas atrativas, há bastante discordância a respeito das linhas existentes. O que acontece é que as instituições financeiras não compreendem, nem mesmo os responsáveis pelos projetos como mensurar um fluxo de caixa de um projeto de biogás, pois há diversas incertezas que só podem ser solucionadas ao longo do projeto, por exemplo, mensurar o volume de produção de biogás, de energia, de renda e entre outros. Porém, o auxílio de países mais desenvolvidos puxa a função para cima, este apoio se fez por exemplo pelo mecanismo de desenvolvimento limpo, onde alguns produtores de biogás puderam vender créditos de carbono, aumentando a rentabilidade de seus projetos de biogás em estágios de incertezas, hoje este apoio poderia ser traduzido em um fortalecimento na transferência de conhecimento e tecnologia. O problema então não a limitação de crédito e sim a dificuldade de acesso, como um resultado de F2 e F3.

A criação de legitimidade (F7) teve bastante discordância e por isso um desempenho ruim. Primeiro o fato das leis estaduais não possuírem mecanismos claros e efetivos de promoção e objetivos do setor, mesmo existindo convênios com o CONFAZ, apenas alguns estados possuem diretrizes que realmente apoiem o setor, reduzindo por exemplo ICMS de equipamentos e serviços relacionados ao biogás. A mesma incerteza ocorre com o PNBB, sem uma perspectiva positiva conjunta dos atores sobre uma implantação no curto prazo. A legitimidade informal foi péssima, a percepção da sociedade sobre o biogás é praticamente inexistente. A função é salva de ser classificada como péssima, pois as atividades de lóbi foram avaliadas como fortes, e podem afetar positivamente o STIBB alterando os desempenhos anteriores, o melhor exemplo das atividades de lóbi foi a inclusão do biogás no Renovabio.

Este conjunto de fatores na F7 formam uma incerteza jurídica aos produtores, que pode refletir em uma redução do desempenho da Função 1 ao longo dos próximos anos. No entanto, há uma lacuna de incerteza que pode ser aproveitada com atividades de lóbi, possivelmente conectando a abertura do mercado de gás, com as

demandas das leis de biocombustíveis, requerendo também atualizações em políticas locais, com incentivos diretos para o setor, que envolvam todo o setor de resíduos, energia e transportes. Por fim, as funções como um todo apresentaram um estado de instabilidade, podendo sofrer mudanças promissoras ou não no curto prazo.

5.4 MECANISMOS DE INDUÇÃO E BLOQUEIO

Esta discussão perpassa dois temas, primeiro as recomendações políticas derivadas da análise com a identificação dos mecanismos de indução e bloqueio. No segundo momento é feita uma avaliação do uso da técnica de pesquisa focada na percepção dos atores como fundamentação para uma análise funcional de um SI.

Os materiais analisados até aqui permitiram o um levantamento das barreiras para evolução do STIBB. Estas barreiras são em sua grande maioria, comuns para países em desenvolvimento e mais que isso, são essenciais para que recomendações políticas possam ser feitas. Os mecanismos de bloqueio podem ser divididos em seis grupos (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019). Alguns deles foram diretamente abordados no questionário, como por exemplo o acesso a linhas de financiamento, treinamentos e entre outros. A Figura 36 ilustra estas barreiras em forma de quadro.

A partir das barreiras destacadas e do resultado da análise descritiva e fatorial, o último passo da análise funcional pode ser realizado, a identificação de questões políticas (do inglês, *policy issues*). Observa-se que muitas medidas tem semelhança com as propostas pelo PNBB de 2018. A concordância é reconhecida como um ponto forte, destacando a importância deste programa em âmbito federal, com mecanismos para acompanhamento em níveis estaduais e municipais. São nove as recomendações, a seguir elas são apresentadas e brevemente comentadas.

- Incentivos a associação de produtores. A análise descritiva apontou que os produtores precisam ser mais integrados ao SI, como as associações tem papel central nesta integração, recomenda-se apoio governamental para ampliar os canais de comunicação e os recursos para encontrar e incluir este produtores.
- Regime tributário. A redução da tributação (e.g., energia, equipamentos e entre outros) é diretamente relacionada ao retorno de investimento, e como foi descrito os atores do SI não percebem este tipo de incentivo. Cobrado também no PNBB, é um fator decisivo para uma rápida expansão.
- Comercialização local de biogás biometano. O mercado de biometano é destacado como um complemento ao programa Novo Mercado de Gás, possibilitando a interiorização da oferta de gás metano. Contudo, o programa deveria incluir metas e objetivos para comercialização e penetração do biometano nestas regiões, que futuramente serviriam como oferta firma as distribuidoras, quando no

Figura 36 – Mecanismos de bloqueio

Mecanismos de Bloqueio	
Técnicos	<p>Infraestrutura mínima para produção, refino, fornecimento e distribuição</p> <p>Falta de treinamento técnico sobre a fonte</p> <p>Falta de sistematização de bancos de dados sobre o potencial e profissionais</p> <p>Indisponibilidade de tecnologias locais de biogás</p> <p>Má coleta e segregação de resíduos</p>
Econômicos	<p>Altos custos de transação</p> <p>Economia volátil e baixo investimento</p> <p>Dificuldade em acessar crédito e financiamento</p> <p>Alto custo para implementar projetos</p> <p>Falta de competitividade em preço comparada a outras renováveis</p>
Mercado	<p>Baixa incorporação de externalidades positivas da fonte em seu preço</p> <p>Falta de oportunidades de mercado</p> <p>Exclusão quando comparado a combustíveis renováveis</p> <p>Falta de um mercado estável de biofertilizantes</p> <p>Poucos projetos bem-sucedidos para inspirar novos projetos e inovação</p>
Institucionais	<p>Falta de incentivos fiscais</p> <p>Pouco financiamento em pesquisa e desenvolvimento</p> <p>Burocracia complexa</p> <p>Instabilidade e baixo envolvimento do governo</p> <p>Incertezas sobre a expansão do mercado de energia</p> <p>Uso de combustíveis fósseis incentivado</p> <p>Pouca legitimação do biometano como substituto renovável do gás natural</p> <p>Falta de integração entre diferentes sistemas sociotécnicos</p>
Sócio-cultural	<p>Pouco conhecimento disseminado sobre a fonte</p> <p>Falta de participação do público e interesse do consumidor</p> <p>Pouco incentivo cultural para pagar preços mais altos por energia sustentável</p> <p>Má conduta perante a coleta e segregação de resíduos</p>
Environmental	<p>Chance de acidente devido a baixos requisitos de segurança</p> <p>Externalidades negativas (e.g., vazamento de gás)</p> <p>Falta de acesso à água adequada para executar as operações</p>

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (DURÃO, 2017; NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019; ABIO-GÁS, 2018; DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019; MARIANI, 2018)

longo prazo as redes de GN fóssil alcançassem o interior. As concessões de GN deveriam ser flexibilizadas de forma compulsória a adquirir biometano, ou ainda, permitindo novas concessões para biometano canalizado. O biometano ainda não consegue competir em preço com o GN canalizado, mas pode mitigar parte das emissões oriundas do setor.

- Comercialização de digestato ou biofertilizantes. Os fertilizante aparecem como questão crítica para legitimidade, então uma revisão apurada do ciclo dos nutrientes deve ser incluída como base para novas instituições regras e objetivos. O digestato é um grande gargalo para o desenvolvimento do setor, pois pode se tornar um passivo ambiental com o ganho de escala se não houver meios de escoamento .
- Políticas de incentivo (e.g., tarifas premio, aquisições compulsórias de biometano por distribuidoras). O custo da energia produzida pelo biogás é mais oneroso que as outras energias, porém é a única que presta um serviço de redução de poluentes, ao mesmo tempo que fornece segurança energética, permite flexibilidade de despacho. Recomenda-se que a remuneração desta energia considere estes fatos e, reforçando, que tenham considerações aos biofertilizantes. Vale ressaltar que estes incentivos podem ser perversos, se por exemplo a monocultura energética absorver grande parte dos incentivos.
- Leilões de energia dedicados. Esta recomendação é similar a situação dos incentivos, mas é mais focada aos grandes produtores. O objetivo deste tipo de leilão é assegurar que grandes produtores de resíduos invistam na redução de emissões (e.g., aterros sanitários, industria de processamento de cana de açúcar)
- Melhorar o acesso a linhas de financiamento. O retorno de investimento novamente é o ponto central, faz pouco tempo que os bancos começaram a providenciar linhas para investimentos em biogás, ainda assim as taxas não são baixas a ponto de acelerar a difusão tecnológica. Toda a linha de financiamento para renováveis inclui o biogás, há uma questão de falta de conhecimento e não de existência. A questão é a garantia solicitada que é abusiva para projetos de biogás devido ao desconhecimento das instituições financeiras.
- Pagamento por serviços ambientais. Uma regulamentação visando aplicar incentivos por quantidade de resíduo processado, com bonificações para resíduos de municipalidades ou locais próximos, bem como pela utilização mais nobre do biometano, reduzindo emissões em cidades por exemplo reduzindo o consumo de diesel no transporte público, deveriam ser remunerados pelos serviços ambientais prestados.
- Segurança jurídica. Este item é essencial e toca o aspecto de sucesso da tecnologia. Para o desenvolvimento do SI é imprescindível que os adotantes não se arrependam de adotar a tecnologia. Regulamentações não podem ser alteradas, produtores não podem ser abandonados pelas instituições. A formação de um arcabouço institucional deve conter aprimoramentos positivos no longo prazo.

As recomendações são holísticas, muitas das questões são comuns para qualquer SI em fases de expansão e maturação. O STIBB, classificado neste estudo como em fase de expansão, precisa considerar um PNBB, do contrário esta fase não será vencida e a maturação não irá ocorrer. As recomendações foram parte derivadas dos resultados das análises dos dados e parte da revisão teórica. Os dados proporcionaram além da percepção quantitativa dos fatos, uma busca para validação de métricas complexas, transformando dados qualitativos em quantitativos, que integrados enriquecem as recomendações criadas. Vale salientar que estas recomendações não são únicas, que não são exaustivas, ou seja, não são todas as possíveis e sim aquelas que vieram a ser mais explícitas a partir da revisão de literatura e do trabalho de campo.

Os resultados desta seção indicam um SI em estágio de expansão, que recentemente passou o estágio de incubação. Para extrair informações e melhor definir os construtos analisados a próxima seção apresenta os resultados da análise prospectiva. As análises são complementares e permitem um aprofundamento na caracterização do STIBB.

6 RESULTADOS DA ANÁLISE PROSPECTIVA

Este resultado busca adaptar um modelo de difusão de tecnologia para plantas de biogás, ainda, tenta incluir os três principais fatores encontrados na análise fatorial. Nomeadamente, o Fator 1 - Reconhecimento de existência de um SI por parte dos atores; Fator 2 - Legitimidade formal e informal complementar do biogás e subproduto; e Fator 3 - Expectativas entre as atividades empreendedoras. Este modelo tem caráter exploratório, seus resultados não são práticos e sim teóricos.

A principal razão de assumir caráter exploratório é que o modelo elaborado não apresenta limites para o crescimento além do potencial do país, portanto o modelagem é focada apenas no suprimento e demanda tem uma influência grande em um transição, principalmente energética. O que acontece na prática é que nem sempre um possível produtor, terá acesso a recursos necessários (e.g., água) e adequados (e.g., biodigestores com baixo consumo de água) para produzir biogás, ou mesmo terá acesso a um mercado (e.g., distribuir gás ou energia elétrica). O acesso ao mercado é um tema complexo para o do setor, pois possivelmente um produtor de biogás estará longe do ponto de consumo e terá de concorrer com combustíveis mais baratos.

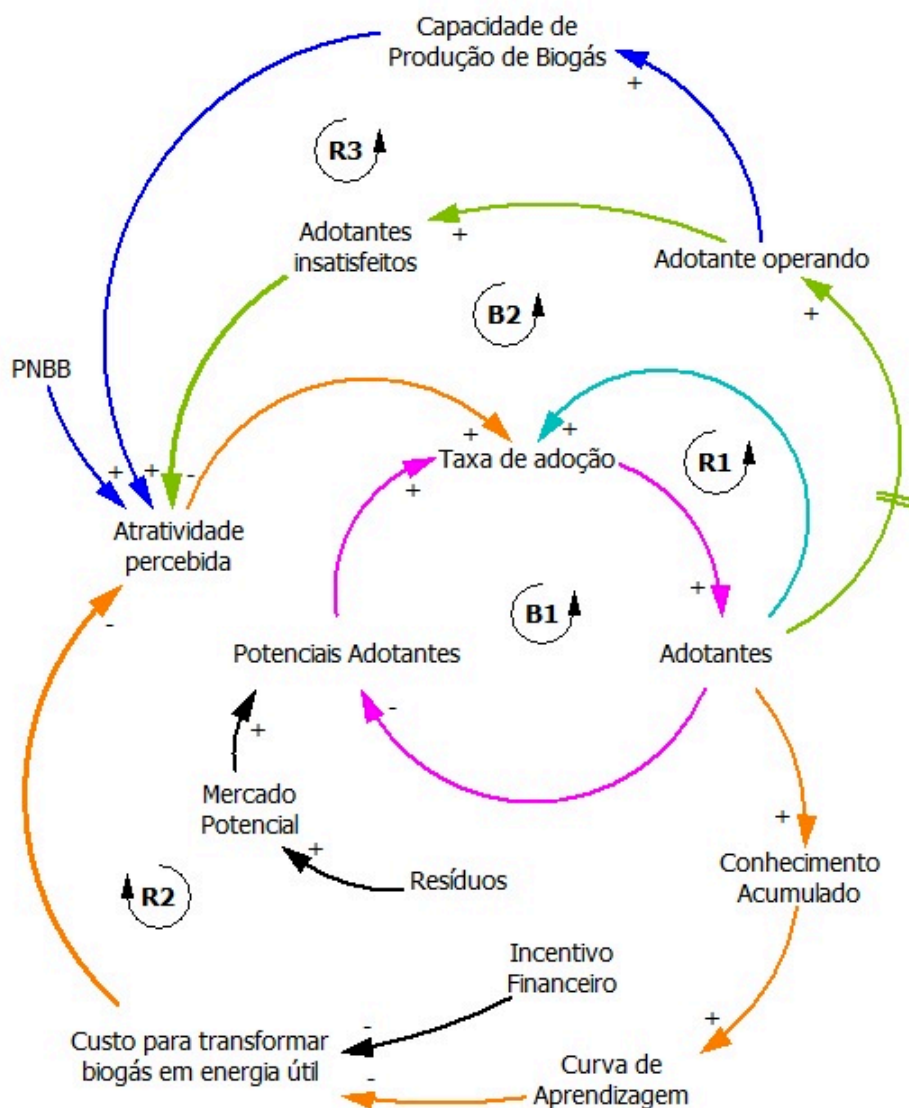
O modelo pretende explorar o dinâmico, ou seja, a mudança na produção de matérias orgânicas residuais passíveis de uso econômico o longo do tempo, complementando a literatura, em um ponto específico (veja (SANTOS *et al.*, 2018)). A seguir o modelo de DS é apresentado, a primeira seção descreve a construção do modelo, a segunda como ele foi validado e calibrado, a terceira apresenta os cenários desenvolvidos e a quarta faz uma discussão acerca dos resultados obtidos.

6.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo proposto segue a interpretação do modelo de enlances causais ilustrado na Figura 37. O modelo proposto, inicialmente compreenderá as estruturas centrais do modelo de enlances, no momento da análise de cenários serão testadas as intervenções, como incrementos de legitimidade obtidos pelo PNBB e detrimientos decorrentes de adotantes insatisfeitos.

O modelo proposto apresenta cinco laços de realimentação. Os laços B1 e R1 representam o fator 3 as atividades empreendedoras. Quanto ao laço B1 de balanço, ele ilustra que a medida que o número de adotantes potenciais aumenta, aumenta a taxa de adoção que aumenta o número de adotantes e reduz o número de adotantes potenciais. O laço R1 de reforço demonstra que a medida que mais cresce o número de adotantes, também cresce a taxa de adoção, devido ao boca-boca entre adotantes e potenciais adotantes. Estes laços pertencem a representação comum do modelo de Bass. Nota-se também que a quantidade de potenciais adotantes cresce a medida que o mercado potencial cresce, decorrente de mais resíduos disponíveis.

Figura 37 – Modelo de enlaces causais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os laços B2 e R3 representam o fator 2 de legitimidade. O laço B2 demonstra que a atratividade percebida da tecnologia diminui a medida que mais adotantes ficam insatisfeitos com o resultado da tecnologia. O laço R3 age de forma contrária, ou seja, a medida que mais produtores são bem sucedidos, mais atratividade é percebida na tecnologia. Ainda, o PNBB age como um fator externo que pode incrementar a legitimidade de forma gradual e significativa, caso seja implantado.

O laço R2 de reforço representa o fator 1 de reconhecimento. Ele ilustra que quanto mais adotantes existam, mais conhecimento é acumulado sobre a tecnologia, que causa um efeito positivo na curva de aprendizado reduzindo assim os custos para transformar biogás em energia útil. Se o custo aumenta a atratividade diminui, mas

como a curva de aprendizagem junto com os incentivos financeiros, reduzem este custo, tem-se mais atratividade percebida. A atratividade por sua vez, aumenta a taxa de adoção.

O modelo desenvolvido é dividido em quatro camadas. Cada uma destas camadas representa uma rota tecnológica ou um tipo de substrato, as quatro rotas relevantes do STIBB foram identificadas e a partir de agora serão também abreviadas da seguinte maneira: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Resíduos da Criação de Animais Resíduos da criação de animais (ANI), Vinhaça e torta de filtro (VIN) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETE). Além disso eles serão referidos também por um Grupo i apresentado na Equação 5, que representa as camadas do modelo. O modelo desenvolvido utiliza como base o modelo de Bass, que utiliza de poucos parâmetros para retratar a curva de adoção de produtos pelo mercado (BASS, 1969).

O potencial de produção de metano do biogás é obtido a partir de cálculos extraídos da literatura (SANTOS *et al.*, 2018). Para que o modelo seja dinâmico, além dos cálculos apresentados pelo autor para o ano de 2015, foram incluídos dados projetados do relatório da EPE 'Potencial de Recursos Energéticos no Horizonte 2050' (EPE, 2018). Em suma, o modelo executa simultaneamente quatro modelos de Bass, onde o número máximo de plantas (i.e., mercado potencial) é obtido dividindo o potencial de cada rota pelo 'Média de produção de metano por planta de cada rota tecnológica'. Como este mercado potencial está em constante crescimento, o primeiro passo é encontrar esse potencial. O segundo passo é o próprio modelo de Bass, o terceiro, a curva de aprendizado e o quarto a curva de atratividade. Descrevemos cada etapa nas subseções a seguir.

$$i = \{ANI, RSU, VIN, ETE\} \quad (5)$$

O modelo está especificado para funcionar entre 2010 e 2050. Espera-se que neste período a curva de difusão em forma de S represente o crescimento de usinas de biogás, com base no mercado potencial determinado para cada rota tecnológica. A saída do modelo é apresentada em biometano (em oposição ao biogás total). Para isso, multiplica-se o rendimento total de biogás por um fator de pureza de 60 % para determinar o rendimento de biometano, ao final uma conversão para energia é realizada sendo que um metro cúbico de biogás representa 1,43KWh.

Neste ponto vale reconhecer que o dióxido de carbono e o fertilizante biológico são dois componentes críticos que levam em consideração o retorno do investimento e, posteriormente, as decisões de adoção por empreendedores, mas eles não foram incluídos no modelo desenvolvido. Em vez disso, o modelo é parametrizado para determinar tendências futuras com base nas atividades usuais e nos valores alternativos dos parâmetros. Vale ressaltar que o Apêndice E apresenta todas as equações e

parâmetros do modelo, aqui eles são resumidos para melhor explicação.

6.1.1 Modelo de mercado potencial

Nesta seção o potencial de metano do grupo *i* é estimado. Iniciando pelo potencial ANI, considera-se uma 'Número de animais' (*N*) (i.e., gado N_c , suíno N_s e aves N_p , multiplicando-os pela respectiva 'Produção média diária de dejetos' (*I*) e pela 'Produção de biogás por tonelada de dejetos' (*T*), conforme apresentado na Equação 6, os parâmetros de entrada são mostrados na Tabela 17 e a seção do modelo na Figura 38. Para melhor estimar o potencial da produção pecuária, um multiplicador aumentando de 10% a 50% é adicionado no final do período, o motivo é representar pecuaristas mudando seus rebanhos para confinamentos. O número de unidades de cada estoque aumenta devido às taxas históricas projetadas ao longo do tempo (EPE, 2018).

$$\text{Potencial ANI} = 0.6 \cdot N \cdot I \cdot T \quad (6)$$

Tabela 17 – Parâmetros do setor ANI

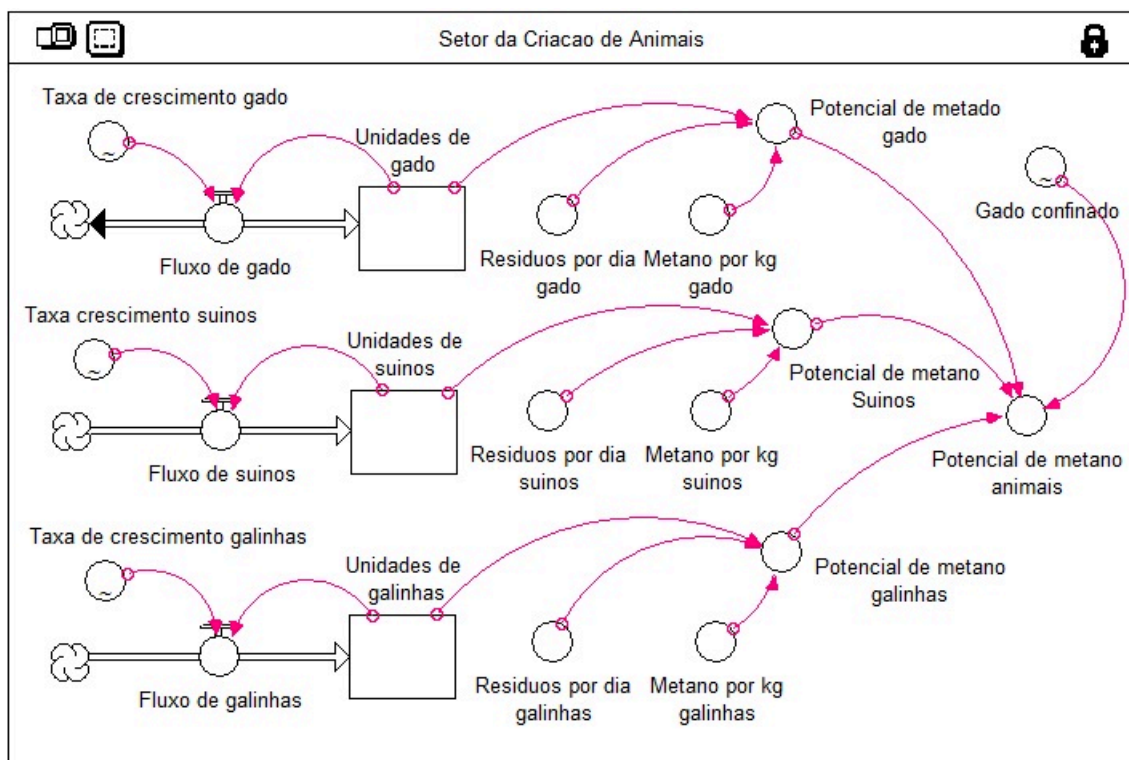
Animais	Parâmetros (t_0)	Valores
Bovinos	N_c	205×10^6 un
	I_c	10 kg/d.un
	T_c	12-18 m^3 CH_4 /t
Suínos	N_s	38×10^6 un
	I_s	2.25 kg/d.un
	T_s	12-24 m^3 CH_4 /t
Aves	N_p	208×10^6 un
	I_p	0.18 kg/d.un
	T_p	27-32 m^3 CH_4 /t

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018)

O segundo potencial estimado é dos RSU, este cresce em termos do 'Rendimento de metano por tonelada' (Fr), da 'População brasileira' (P) e de sua 'Produção específica por habitante' (n). Três fatores deste setor merecem atenção: primeiro, o crescimento populacional diminui para uma taxa negativa em 2047, quando atinge o máximo de 233 milhões de habitantes; segundo, a 'Fração orgânica do lixo municipal' (Mfv) é uma função gráfica, onde o início do período simulado é de 56 %¹ e no final de 30 % e; terceiro, a variável n cresce de aproximadamente 1.068kg/d para 1.350kg/d (EPE, 2018). A Equação 7 e a Tabela 18 sintetizam os valores populacionais, de geração de resíduos, fração da coleta e os valores potenciais de produção de metano dos RSU. A variável ' Fr ' varia de 5 a 300 metros cúbicos de CH_4 /t de resíduos, portanto

¹ Estudos gravimétricos podem expressar valores muito inferiores, entre 40% e 45%, então pode-se afirmar que o início da simulação em 56% constitui uma fração otimista para o volume de resíduos orgânicos

Figura 38 – Setor da criação de animais ANI



Fonte: Elaborado pelo autor.

foi ajustada para 170 metros cúbicos de CH_4/t e a 'Eficiência geral da coleta' (E_m) é mantida constante. A Figura 39 ilustra esta seção do modelo.

$$Potencial\ RSU = n \cdot P \cdot E_m \cdot Fr \cdot Mfv \tag{7}$$

Tabela 18 – Parâmetros do setor RSU

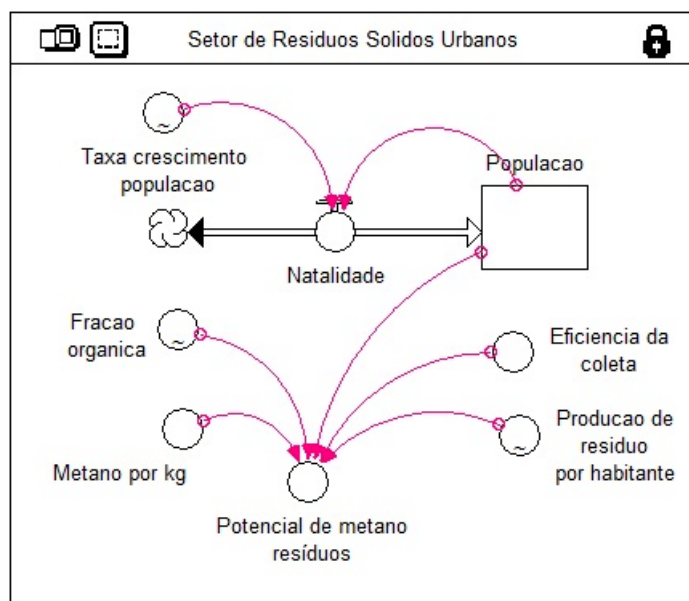
Parâmetros (t_0)	Valores
População	194 x 10 ⁶ hab
n	1.065 kg / hab.dia
E_m	88.87%
Fr	170 m ³ / t
Mfv	56%

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018)

O potencial do setor VIN (veja a Equação 8, Tabela 19 e Figura 40) é calculado a partir da 'Massa de cana produzida no país' (T_s), 609 milhões de toneladas em 2010 (EPE, 2018). Este potencial também utiliza da 'Produção de vinhaça por tonelada de cana de açúcar' (P_v); 'Valor típico da Demanda Química de Oxigênio'² da vinhaça

² Demanda química de oxigênio ou DQO é um parâmetro que mede a quantidade de matéria orgânica, através do oxigênio dissolvido, suscetível de ser oxidada por meios químicos em uma amostra líquida

Figura 39 – Setor de resíduos sólidos urbanos RSU



Fonte: Elaborado pelo autor.

(COD_v); ‘Eficiência de remoção da carga orgânica da vinhaça em um reator anaeróbico’ (E_{fv}); o ‘Fator específico da produção de biogás por massa de DQO removida na biodigestão anaeróbica’ (f_v) e a ‘Eficiência da coleta de gás, (E_{cv}); No final desta equação adiciona-se ainda 20% do total obtido, para representar o potencial da torta de filtro, que também é um subproduto do processamento da cana com alto potencial para produção de gás.

$$Potencial\ VIN = f_v \cdot E_{cv} \cdot P_v \cdot T_s \cdot COD_v \cdot E_{fv} \cdot 1.2 \quad (8)$$

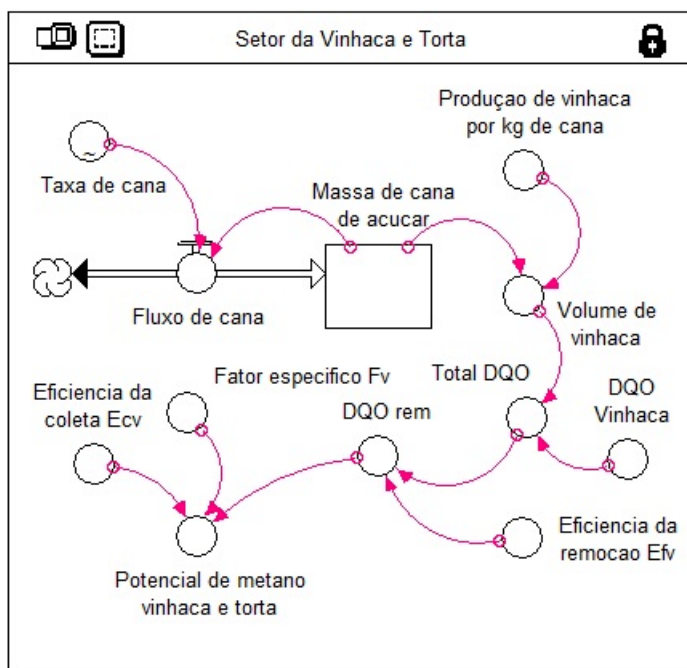
Tabela 19 – Parâmetros do setor VIN

Parâmetros (t_0)	Valores
f_v	$0.312\ m^3/kg$
E_{cv}	90%
P_v	$0.156\ m^3$
T_s	$658 \times 10^6\ t/ano$
COD_v	$35.5\ kg/m^3$
E_{fv}	67%

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018)

O potencial do setor ETE (consulte a Equação 9, Tabela 20 e Figura 41) depende do ‘Volume total de efluente produzido por dia’ (Q), que por sua vez depende da ‘população’ (P) como estoque, mas também de outros parâmetros como ‘Produção média de volume de efluente por dia por pessoa’ (G) a ‘Concentração da demanda de oxigênio químico do afluente pelo reator’ (S_o), a ‘Concentração do efluente COD’ (S),

Figura 40 – Setor da vinhaça e torta de filtro



Fonte: Elaborado pelo autor.

o ‘Rendimento total da produção sólida’ Y , do ‘Fator de correção volumétrico devido a temperatura’ $(F(T))$ e do ‘Índice de perda de gás no reator devido a fugas ou dissolução do gás no efluente líquido’ (I_p) . Neste setor também foi adicionada uma função gráfica iniciando em 10% e crescendo linearmente até 50% em 2050, como suposição para o real tratamento de esgoto viável.

$$Potencial ETE = Q \cdot \frac{[S_0(1 - Y) - S]}{f(T)} \cdot (1 - I_p) \tag{9}$$

Tabela 20 – Parâmetros do setor ETE

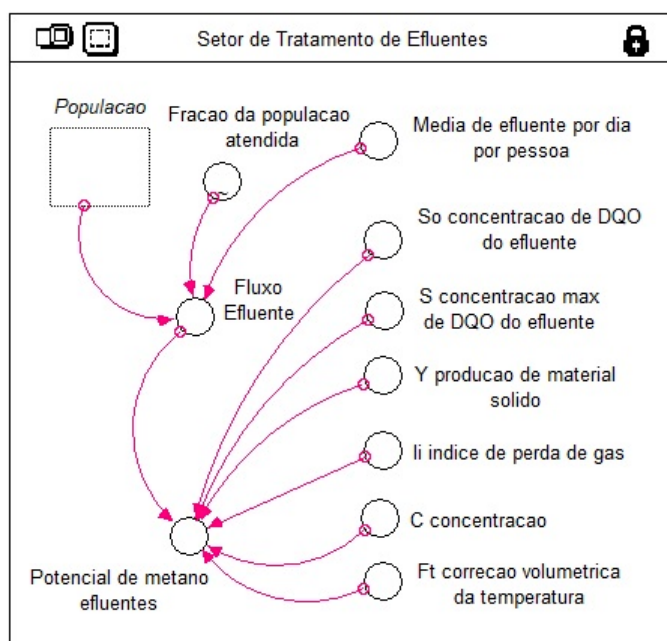
Parâmetros (t_0)	Valores
S_0	0.715 kg/m ³
S	0.251 kg/m ³
Y	0.17 kg _i /kg _e
$F(T)$	2.615
I_p	60%
G	0.15 m ³ /hab.d

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2018)

6.1.2 Modelo de difusão das plantas de biogás

Existem dois ciclos de realimentação ocorrendo no modelo de difusão, destacado na Figura 42. O primeiro é um ciclo de reforço (a) à medida que o número de

Figura 41 – Setor do tratamento de efluentes



Fonte: Elaborado pelo autor.

adotantes aumenta, o mercado potencial diminui e, conseqüentemente, o mecanismo de ‘adoção pela inovação’, dependente do ‘coeficiente de inovação’ (p), perde força (uma vez que é diretamente proporcional a mercado potencial). O segundo ciclo (b) depende do número de adotantes anteriores e, portanto, sua contribuição aumenta com o aumento de adotantes, formando um ciclo de realimentação positivo, o mecanismo ‘adoção por imitação’, dependente do coeficiente (q).

(a) Plantas operando → (+) adoção por imitação → (+) taxa de adoção → (+) plantas operando

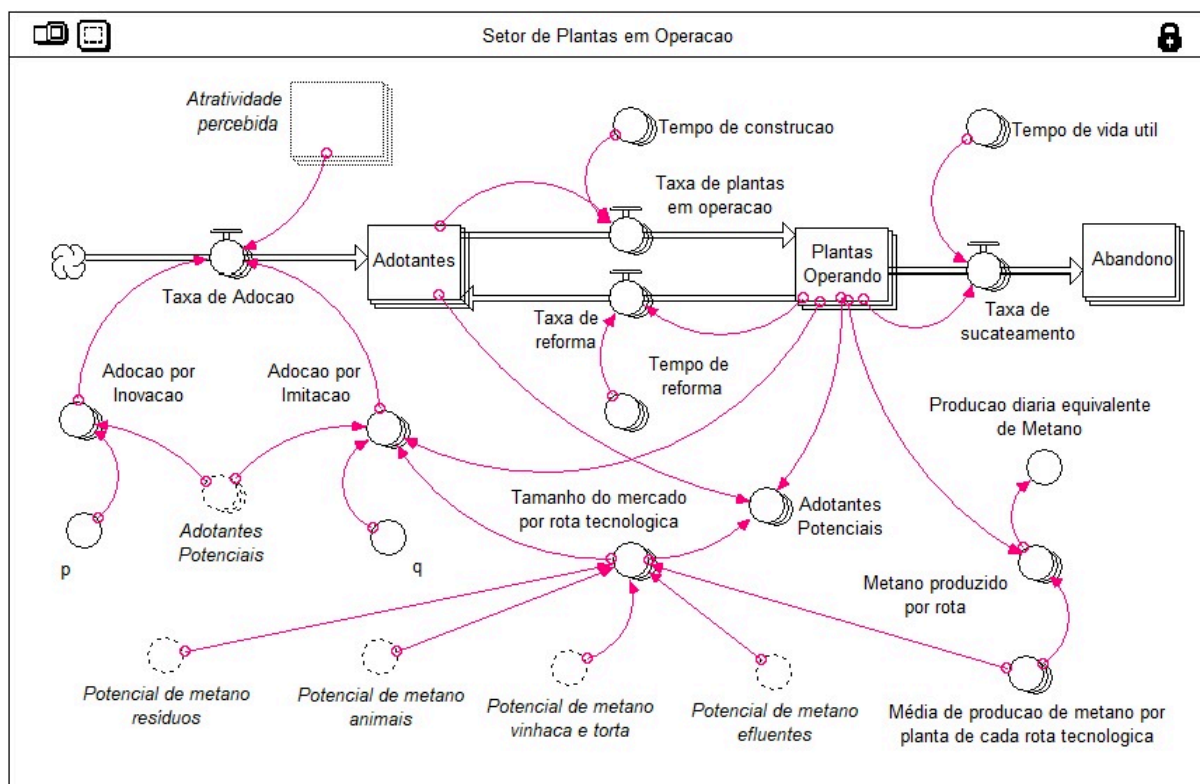
(b) Adotantes potenciais → (+) adotantes por imitação → (+) adoption taxa → (-) adotantes potenciais

A estrutura principal do modelo compreende os quatro fluxos ‘Taxa de adoção’ (C_i^{taxa}). Esta taxa é uma soma de (A_i) ‘Usuários adotantes pela inovação’ (A_i^{in}) e ‘Usuários adotadores pela imitação’ (A_i^{im}) (consulte a Equação 10). Ao serem acumuladas, formam o estoque de Adotantes (C_i). O modelo então assume que este fluxo seja regulado por uma ‘Atratividade Percebida’ (A_p).

$$C_i^{taxa} = (A_i^{im} + A_i^{in}) (A_i^p) \tag{10}$$

A segunda parte desta estrutura divide os adotantes empreendedores que decidiram investir na produção de biogás, porém ainda não iniciaram efetivamente sua produção. Esta estrutura permite testar os efeitos dos atrasos na construção das plan-

Figura 42 – Modelo de difusão para plantas de biogás



Fonte: Elaborado pelo autor.

tas e da tecnologia utilizada no Brasil com vida útil curta, se comparada a STI de biogás mais desenvolvidos. Estes efeitos são assumidos como dependentes da lei de Little³. A equação para o estoque de 'adotantes' tem uma segunda entrada 'Reforma' (R) (consulte a Equação 11) que vem das 'Plantas em operação' (OP_i) (veja Equação 12), esse estoque tem o único fluxo de saída e é o último fluxo neste setor, representando a decisão de interromper a produção de biogás em uma planta por qualquer meio (por exemplo, econômico, segurança e etc.).

$$C_i^{estoque}(t) = C_i^{estoque}(t - dt) + \int_{t-1}^t (C_i^{taxa} + R_i^{taxa} - OP_i^{taxa}) dt \quad (11)$$

$$OP_i^{estoque} = OP_i^{estoque}(t - dt) + \int_{t-1}^t (OP_i^{taxa} - R_i^{taxa} - S_i^{taxa}) dt \quad (12)$$

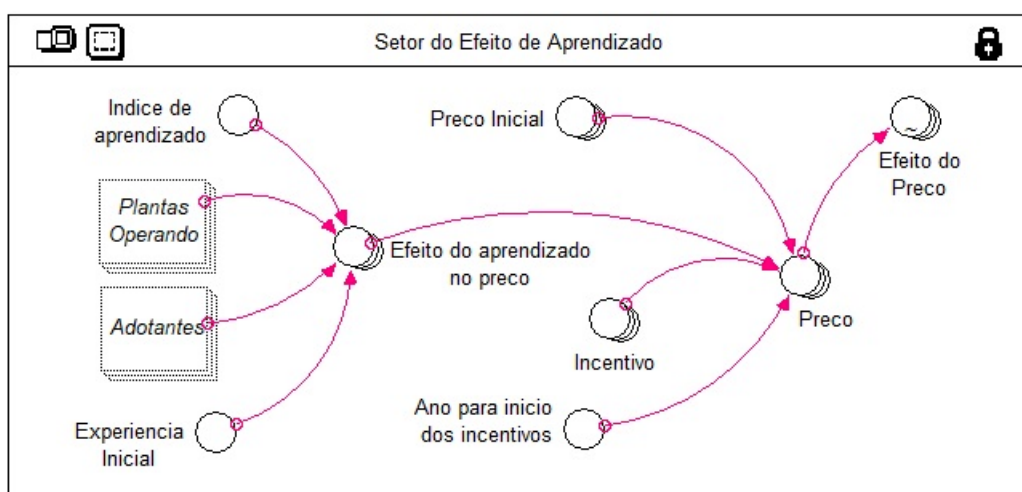
A atratividade percebida que regula o fluxo de adoção é calculada pela soma de quatro entradas. A primeira vem da estrutura do 'Efeito de aprendizado sobre o preço' (consulte a Equação 13 e Figura 43) que determinará o 'efeito do preço' (E_{op}) (E^{op}) que controla a estrutura principal (C_i^{taxa}). Em outras palavras, o acúmulo de experiência

³ O número médio de clientes em um sistema estável é igual à taxa efetiva média de chegada, multiplicada pelo tempo médio que um cliente passa no sistema

da ‘experiência inicial’ (U) afeta o preço da tecnologia, o preço é uma variável para determinar a restrição de fluxo em novos adotantes. Quanto maior o preço, menor a adoção. O ‘índice de aprendizagem’ (li) é um expoente tipicamente negativo que determina o quão forte é a curva de aprendizado.

$$E_i^{op} = \left(\frac{OP_i^{estoque}}{U} \right)^{li} \tag{13}$$

Figura 43 – Setor do efeito do aprendizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A última seção se refere ao estoque de ‘Atratividade percebida’, composto de quatro variáveis que irão formar o fluxo de ‘incremento de atratividade’, são elas o ‘Efeito do preço’, a ‘Fração de insatisfeitos’, a ‘Atratividade devido a capacidade’ e a ‘Atratividade devido ao PNBB’. O primeiro componente efeito do preço já foi explicado e faz parte do setor de Efeito do Aprendizado.

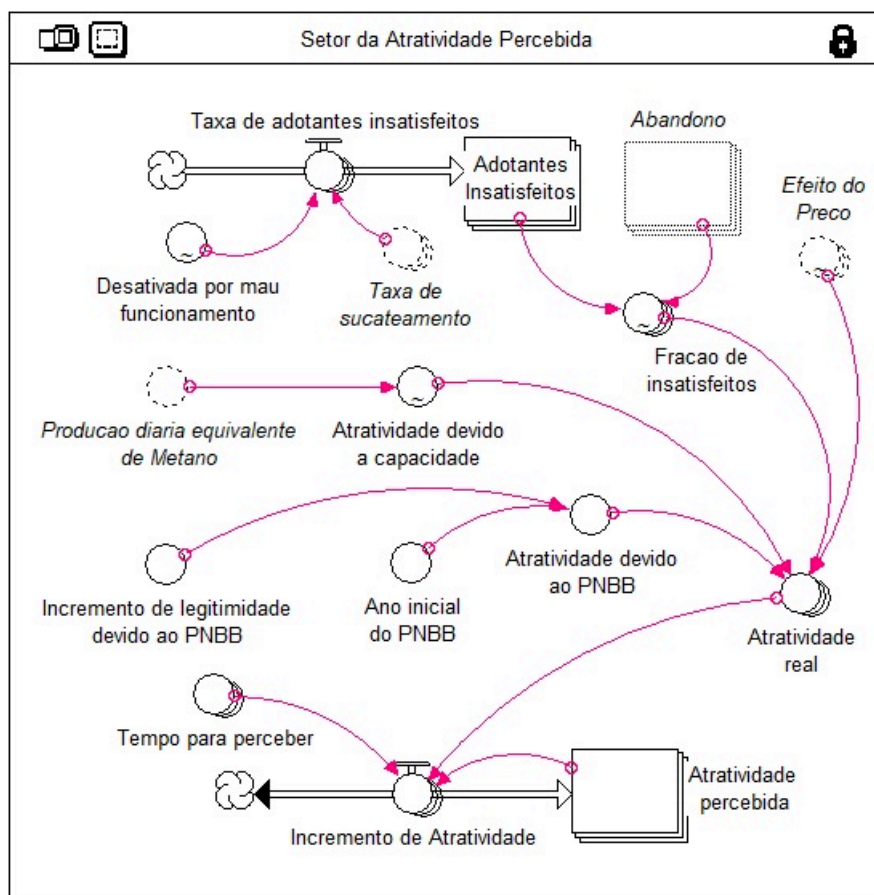
A segunda componente fração de insatisfeitos, considera que apenas uma fração dos adotantes foi efetivamente ‘Desativada por mau funcionamento’, uma variável gráfica que decresce linearmente ao longo do tempo, ou seja, cada vez menos adotantes são considerados insatisfeitos. Este insatisfeitos são divididos pelo total do estoque ‘Abandono’ e formam uma relação gráfica ‘fração de insatisfeitos’. Nesta relação, se a divisão resulta em 1, todos no estoque de abandono estão insatisfeitos e a variável gráfica emite um valor alto, de 1, para reduzir a atratividade.

A terceira componente atratividade devido a capacidade decorre da quantidade de biogás produzida, basicamente há um incremento linear, iniciando em 0 e subindo até 1 quando a quantidade de metano equivalente produzida por dia em um ano, alcança 20 milhões de metros cúbicos.

A quarta componente considera o PNBB. A atratividade do PNBB é uma função ramp, este tipo de função incrementa gradualmente a atratividade a partir do valor designado para 'incremento da legitimidade devido ao PNBB' que cresce a partir do ano selecionado como início para o programa.

O somatório destas componentes ainda acrescenta um valor 1 como parâmetro inicial e é então elas são divididas por 4 e direcionadas para o fluxo 'incremento de atratividade'. Este incremento é resultado da subtração entre o valor do estoque de 'Atratividade percebida' e 'Atratividade real'. Ainda este resultado é dividido pelo 'tempo para perceber' que representa o atraso até que novos empreendedores percebam a nova atratividade.

Figura 44 – Setor da atratividade



Fonte: Elaborado pelo autor.

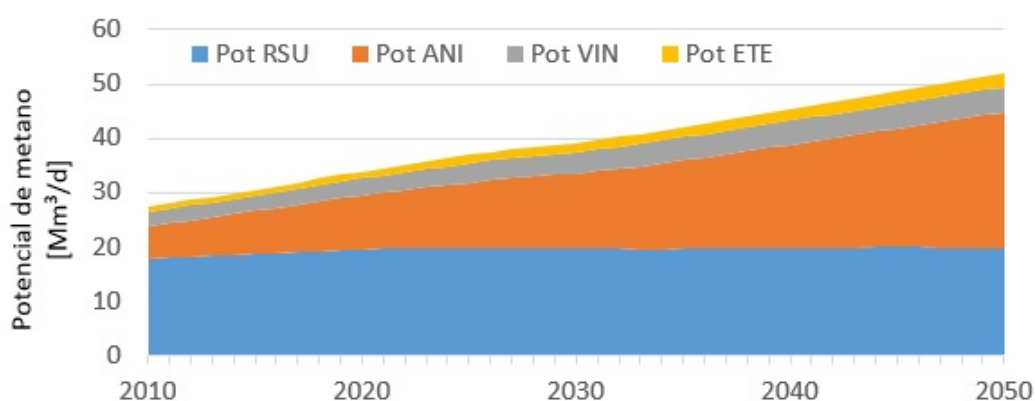
6.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Esta seção descreve os parâmetros do modelo e valida o cenário padrão, que será chamado de *Business as Usual* (BAU) (Inglês para: negócio como o usual), este cenário consiste no potencial geral de metano na Figura 46 e o crescimento da pro-

dução de metano na Figura 47. Os dados coletados, sobre os potenciais e produção anual de biogás e biometano no Brasil, em artigos e relatórios foram utilizados para validar o modelo sob as limitações que ele apresenta. Portanto, o teste de validação não se envolve em métodos tradicionais (por exemplo, erro quadrático médio da raiz ou o coeficiente de determinação).

Primeiro vale analisar o gráfico do potencial na Figura 45. Ele demonstra que o potencial está alinhado com as expectativas da EPE, mais que isso ele mostra que este potencial de fato é dobrado durante todo o período de análise. O potencial oriundo dos animais é o que mais cresce ao longo do tempo. O potencial de RSU é praticamente o mesmo, isso ocorre porque mesmo aumentando a quantidade de resíduo produzido por pessoa, menos deste resíduo é orgânico.

Figura 45 – Potencial de metano por rota

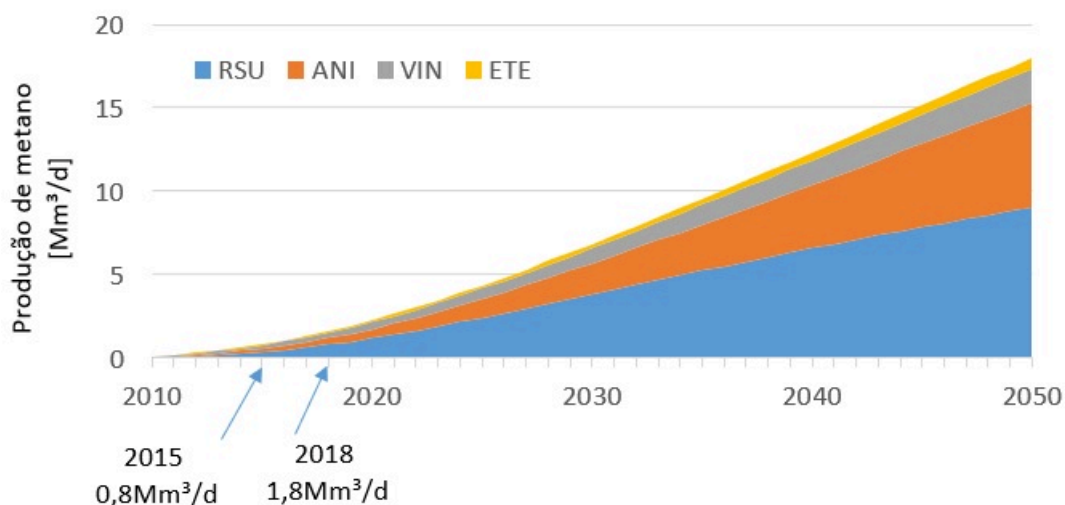


Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação a produção a principal fonte de dados para comparação e validação é a pesquisa do CIBiogás incorporada no Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro (Webmap EPE) para o ano de 2015 ($0,8M m^3/d$) e um relatório técnico da mesma instituição informando que em 2018 a produção foi de $1,8Mm^3$ mais outros $1,0Mm^3$ nos próximos anos. Além disso, a previsão energética do país para 2050 estima que em 2030 a produção diária de metano atingirá algo entre 2,3 e $7,5Mm^3/d$, e em 2050 a estimativa indica algo entre 15 e $28Mm^3/d$. Assim, o cenário da BAU obtido pelo modelo resultando em $6,8Mm^3/d$ de $18Mm^3/d$ é concordante com as expectativas dos relatórios.

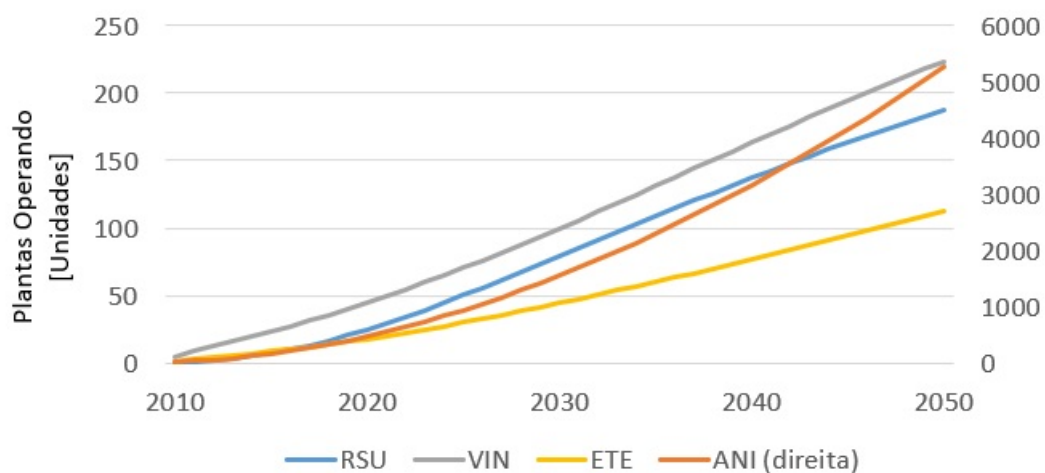
Os parâmetros utilizados para estabelecer o cenário da BAU são mostrados na Tabela 21 e comentados a seguir. O tamanho do mercado é resultado dos cálculos anteriores e o número de adotantes iniciais inclui as plantas em fase de instalação. Tanto os coeficientes de inovação quanto de imitação são suposições que melhor se ajustaram à emergência das plantas na série histórica de três entradas. O atraso na

Figura 46 – Produção de metano no cenário BAU



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 47 – Plantas em operação no cenário BAU



Fonte: Elaborado pelo autor.

construção das plantas, na verdade, não tem grande efeito na produção final, no entanto, as 'usinas envelhecidas' e o 'tempo de sucateamento' controlam as saídas de 'Usinas em operação', o que têm um grande efeito na produção total de metano. A maioria dessas variáveis de tempo são premissas feitas considerando uma vida útil das plantas relativamente alta, por exemplo para aterros, 100 anos. O sucateamento é considerado como relativamente alto, pois a realidade do país implica em equipamentos menos duráveis (ou seja, materiais de baixa qualidade diminuem a vida útil das plantas), o que leva a reinvestimento e menores retornos sobre o investimento.

O 'efeito da aprendizagem no preço' cresce de acordo com uma estrutura não

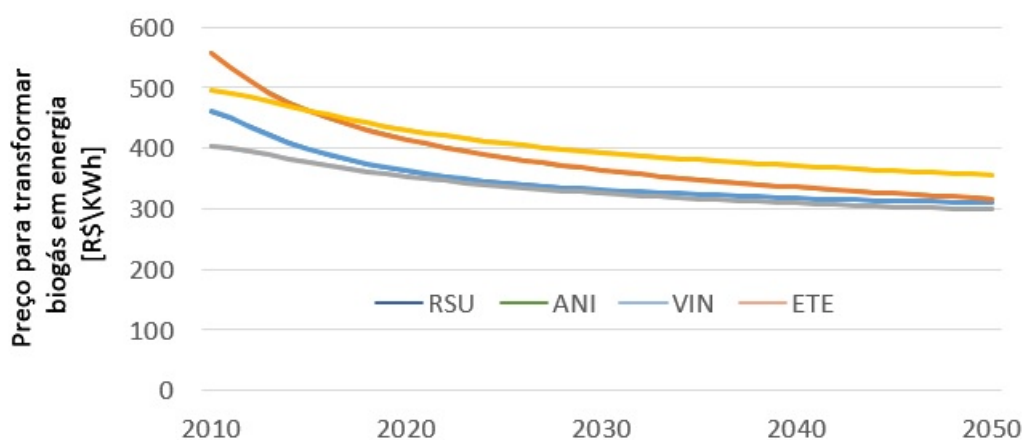
Tabela 21 – Parâmetros de entrada do modelo

Parâmetros (t_0)	Valores estimados
Tamanho do mercado $t=2010$	$i = \{370, 5340, 305, 162\}$
Adotantes $t=2010$	$i = \{20, 50, 20, 10\}$
Coef. de inovação (p)	0,04
Coef. de imitação (q)	0,10
Tempo de construção	$i = \{10, 2, 4, 5\}$
Tempo de reforma	$i = \{100, 20, 20, 20\}$
Tempo de vida útil	$i = \{100, 30, 80, 50\}$
Plantas operando $t=2010$	$i = \{0, 10, 5, 1\}$
Méd. de Prod. de metano por rota	$i = \{48000, 1200, 9000, 6000\}$
Experiência inicial	10
Preço inicial	$i = \{460, 690, 450, 500\}$
Índice de aprendizado	-0,12
Tempo para perceber	$i = \{4, 6, 4, 5\}$
Atratividade percebida inicial	$i = \{0.1, 0.1, 0.1, 0.1\}$

Fonte: Elaborado pelo autor

linear (veja Figura 49 que representa um custo médio gasto pelo produtor para produzir energia, apresentado na Figura 48). Essa suposição é feita sobre o valor que uma usina de biogás ⁴ conseguiu ganhar um leilão de energia da ANEEL pelo preço de 251R\$/MWh, portanto, quando cada rota do grupo i atinge o preço de 200R\$/MWh, assumimos que todo potencial adotante disposto a investir na tecnologia, aceitaria fazer o investimento. Mesmo que o preço inicial real não corresponda às entradas, o teste de validação conseguiu reduzir custos e mostrou que essa redução é direcionada a um preço estável, como esperado. Nota-se que o setor ANI teve a maior redução de custo, refletindo seu grande ‘tamanho do mercado’.

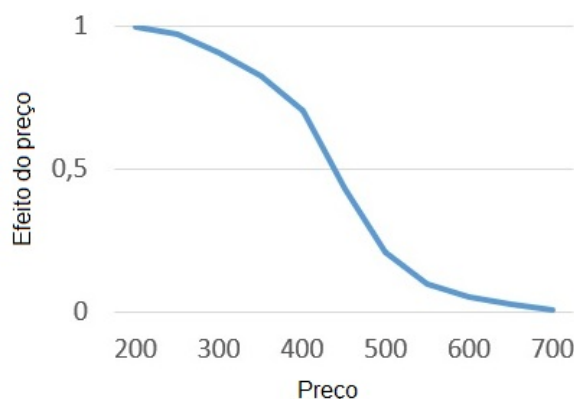
Figura 48 – Preços decrescentes



Fonte: Elaborado pelo autor

⁴ Usina Bonfim, da Raízen na cidade de Guariba (SP), com potencial de 21MW usando vinhaça

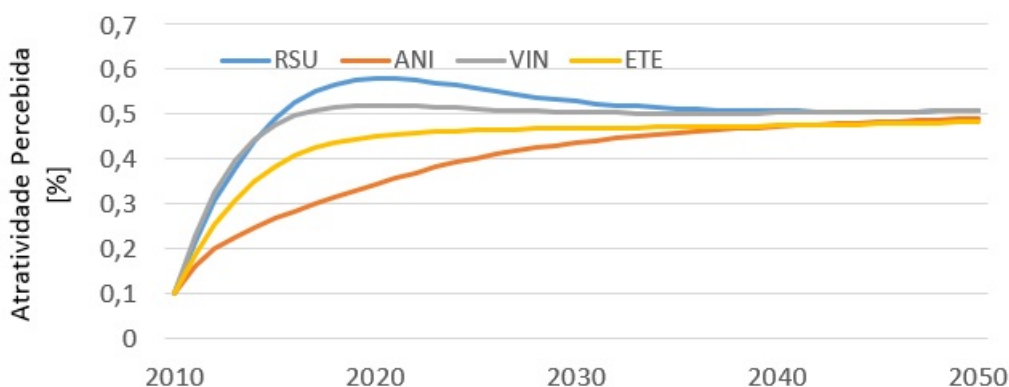
Figura 49 – Efeito do preço



Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento do modelo é associado as mudanças na 'Atratividade Percebida', percebe-se que a atratividade não se sustenta ao longo do tempo. Por isso os cenários propostos irão incluir o PNBB que ao entrar em ação, permite que o crescimento seja acelerado. A Figura 50 ilustra o comportamento da atratividade. O principal componente afetando a atratividade ainda é o preço para conversão do gás em energia. Nota-se que a atratividade pode ultrapassar o valor de 1. Isto pode ser verdade, se considerar por exemplo que em alguns casos as plantas de biogás podem ser tão atraídas economicamente e eventualmente até prejudicar a sustentabilidade dos projetos (CAVICCHI, 2016).

Figura 50 – Atratividade percebida



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modelo proposto baseado no modelo de Bass foi validado através das suposições destacadas. O processo de construção do modelo foi detalhado, e considera que a validação é um processo que deve envolver a coleta de dados empíricos para

avaliar a precisão do instrumento, saindo do domínio exploratório. Ainda vale ressaltar que existem testes estatísticos e medidas para avaliar a validade de instrumentos quantitativos, o que geralmente envolve testes piloto. Assim, o que fica ao alcance do modelo nesta etapa é o desenvolvimento de cenários testando diferentes parâmetros e discutindo suas influências no rendimento de metano.

6.2.1 Testes de sensibilidade

Os cenários desenhados nesta etapa estão divididos em dois grupos. O primeiro grupo faz variações graduais nos coeficientes de inovação e imitação. No segundo grupo, são aplicados incentivos financeiros que reduzem o custo da conversão de biogás em energia. Todo cenário traçado nestas seções, incentivado ou desincentivado é aplicado no modelo a partir de 2025, assim buscou-se entender o efeito de longo prazo na produção total de metano em comparação com o cenário da BAU validado durante os procedimentos. A importância destes testes está em averiguar a amplitude dos resultados, para que por exemplo não ultrapassem a margem máxima definida pela EPE.

6.2.2 Grupo A

Neste grupo são realizados incrementos pontuais nos parâmetros de inovação e imitação a partir do ano de 2025. O crescimento da produção a curto prazo depende de influências externas para aumentar a produção de biogás, porém as influências internas são mais poderosas considerando uma perspectiva de longo prazo, como mostra a Figura 51 e a Tabela 22. Portanto, é melhor fornecer incentivos de longo prazo, que promovam segurança regulatória e jurídica para os produtores investirem, do que apoiar um aumento de curto prazo, contando apenas com novas capacidades. Apesar dos cenários serem ilustrativos, o destaque fica no resultado de F que aumenta a produção do país em aproximadamente 8 Mm³/d. O aumento é significativo de aproximadamente 45% quando comparado ao cenário BAU.

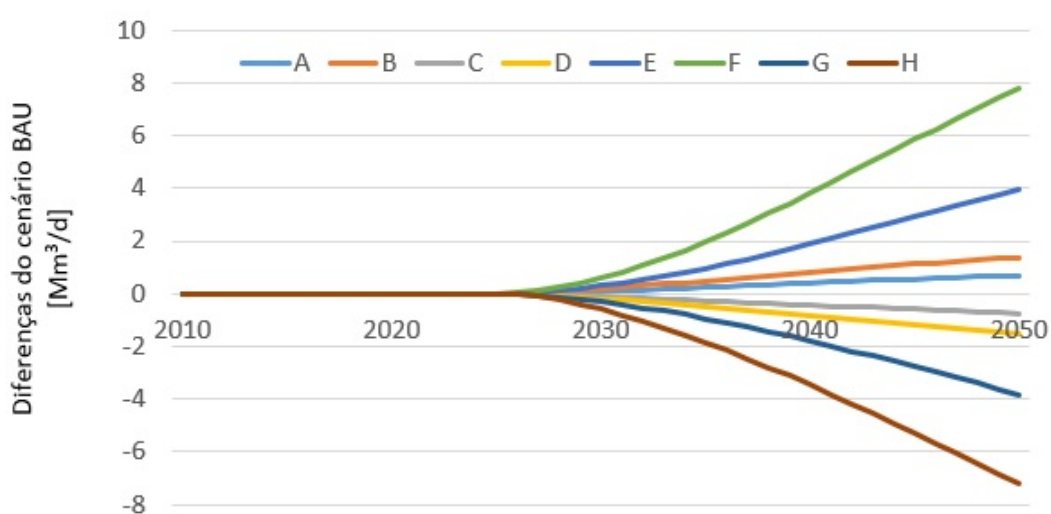
Tabela 22 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo A

Cenários	Parâmetros	Alteração	Descrição
A	p +	+ 10%	Influência Externa
B	p ++	+ 20%	Propaganda
C	p -	- 10%	
D	p - -	- 20%	
E	q +	+ 10%	Influência Interna
F	q ++	+ 20%	Palavra de boca a boca
G	q -	- 10%	
H	q - -	- 20%	

Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento do parâmetro 'q' é entendido como uma soma de várias iniciativas, como novos modelos de negócios, novas rotas tecnológicas, atividades de pesquisa e desenvolvimento, além de significado cultural para incentivando a separação dos resíduos orgânicos. Aumentar p representa mais atividades de inovação, como mais produtores se juntando a geração de energia elétrica remota em micro redes, através do modelo de geração distribuída (*net metering*), mas também representa um aumento na aquisição obrigatória de biometano pelas empresas locais de serviços de gás natural (por exemplo pela inclusão destas empresas no RenovaBio).

Figura 51 – Resultados da sensibilidade do Grupo A



Fonte: Elaborado pelo Autor

6.2.3 Grupo B

Empregando incentivos nos preços para transformar biogás em energia é possível analisar qual rota tecnológica tem uma capacidade de escala melhor com menos esforço. Os incrementos são usados como subsídios para cada uma das rotas individualmente, os subsídios são assumidos como contínuos, iniciam em 2025 e não cessam durante o período de simulação. Os resultados dos incrementos são mostrados na Figura 52 e na Tabela 23. O melhor resultado é do cenário J, que superou I, porque o potencial do setor ANI é o mais relevante em grandeza, o que levou a melhores resultados diante dos incentivos. Os setores de VIN e ETE (cenários K, L, O e P) não mudaram muito em relação às suas contribuições para a produção geral de metano.

O comportamento dinâmico mostrou que quando os subsídios ou qualquer tipo de competitividade diminuem, a má influência na produção de metano é mais poderosa do que um incentivo da mesma ordem. Reduzir a competitividade dos setores de ANI e dos RSU (cenários M e N) é claramente a pior suposição, pois diminui os rendimentos

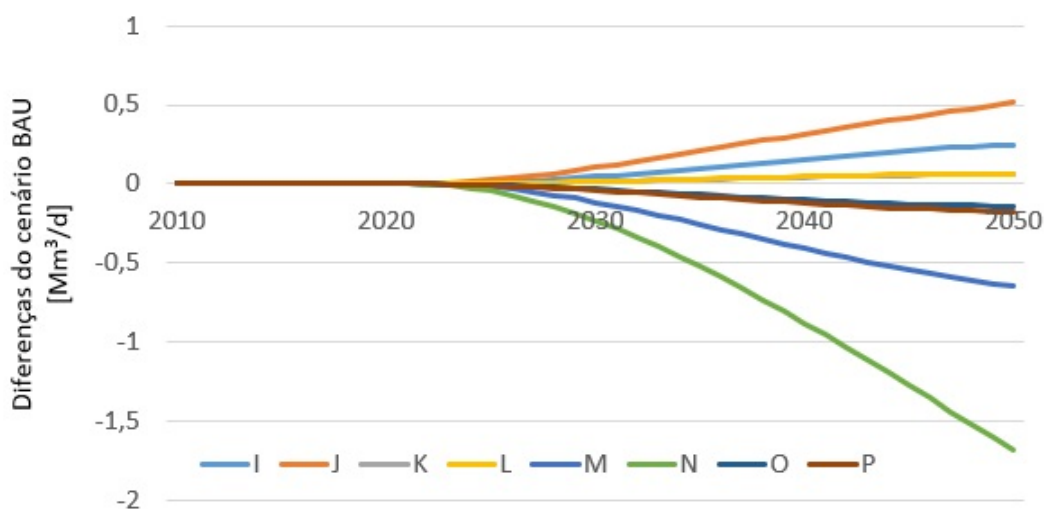
Tabela 23 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo B

Cenários	Parâmetros	Alteração
I	<i>Preco_{RSU}</i>	+ 20%
J	<i>Preco_{ANI}</i>	+ 20%
K	<i>Preco_{VIN}</i>	+ 20%
L	<i>Preco_{ETE}</i>	+ 20%
M	<i>Preco_{RSU}</i>	- 20%
N	<i>Preco_{ANI}</i>	- 20%
O	<i>Preco_{VIN}</i>	- 20%
P	<i>Preco_{ETE}</i>	- 20%

Fonte: Elaborado pelo autor.

de metano em relação ao BAU aproximadamente três vezes mais do que um incentivo poderia de mesma ordem poderia incrementar o rendimento. Os cenários propostos consideram um conjunto de medidas, como políticas de suporte ativo, o efeito de novos programas de tarifas de alimentação e o incentivo a entrada de plantas de biogás de diversos portes no mercado de crédito de carbono.

Figura 52 – Resultados da sensibilidade do Grupo B



Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.3 SIMULAÇÃO E CENÁRIOS

Para formulação de cenários nesta seção, são desenvolvidos 8 cenários. São propostas diferentes interpretações no crescimento de legitimidade que resulta em maior atratividade. Os 6 primeiros cenários são relacionados ao PNBB. São testados diferentes valores e datas de início para o programa. Depois os dois último cenários interpretam que a variável 'efeito do preço' é mais importante que as outras na compo-

sição da legitimidade, sua influência é multiplicada por 2. O mesmo é feito no último cenário, porém a variável multiplicada é a 'atratividade devido a capacidade'. O Tabela 24 a seguir busca resumir os cenários propostos.

Tabela 24 – Definição dos testes de sensibilidade do Grupo B

Cenários	Parâmetro	Alteração
Q	Data de início do PNBB = 2025	Incremento do PNBB = 0.10
R	Data de início do PNBB = 2025	Incremento do PNBB = 0.15
S	Data de início do PNBB = 2025	Incremento do PNBB = 0.05
T	Data de início do PNBB = 2035	Incremento do PNBB = 0.10
U	Data de início do PNBB = 2035	Incremento do PNBB = 0.15
V	Data de início do PNBB = 2035	Incremento do PNBB = 0.05
X	Efeito do preço na atratividade	x2
Z	Atratividade devido a capacidade na atratividade	x2

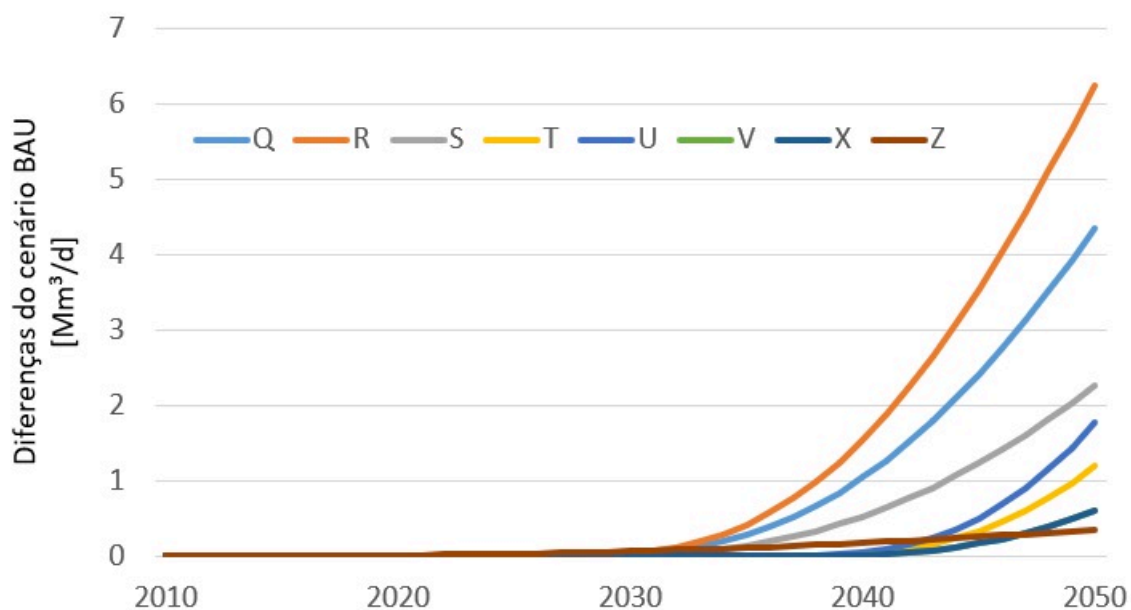
Fonte: Elaborado pelo autor.

O cenário R teve o maior incremento na atratividade e apresentou um crescimento de $6,2Mm^3/d$ no final do horizonte de análise. Mesmo sendo implantado em 2025 o PNBB não apresenta resultados significativos para o horizonte 2030, isso decorre do tempo de atraso na percepção e destaca a importância de uma celere implantação deste programa. O número de plantas para o cenário R é apresentado na Figura 53 e a Figura 55 apresenta o ganho na atratividade percebida. O cenário ainda demonstra a importância de alcançar valores de atratividade acima de 1, para que todos os potenciais adotantes que entrem em contato com a tecnologia, realmente a adquiram, removendo as restrições ao fluxo de adoção.

Ainda pode-se verificar o número de plantas neste cenário otimista. São 221 plantas em aterros sanitários, 8388 plantas para processamento de resíduos de animais, 289 plantas em indústrias de processamento de cana-de-açúcar e 154 em estações de tratamento de efluentes. Totalizando 9054 plantas, cerca de 30% a mais que no cenário BAU.

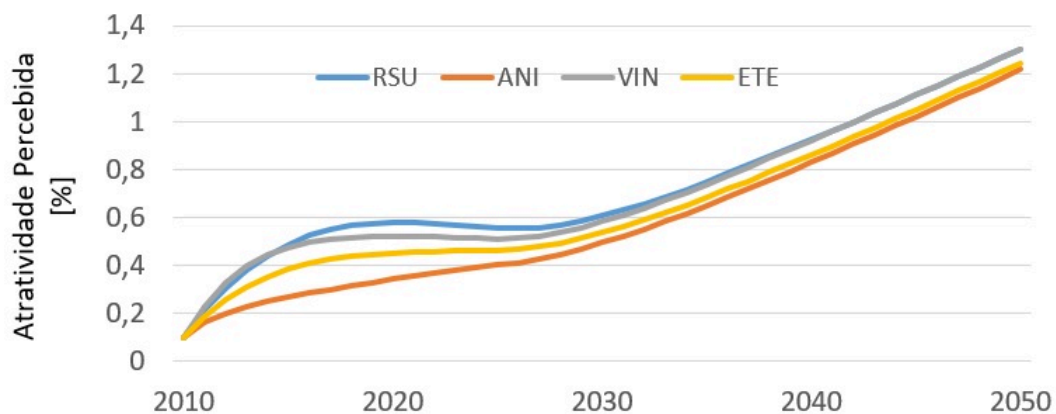
Os cenários X e Y não apresentaram crescimento significativo, embora o preço para transformar biogás em energia seja essencial para a manutenção das operações é a atratividade em conjunta que informa o fluxo de adoção. Este incentivo precisaria crescer gradualmente e em uma função ramp como a utilizada para o PNBB. A implantação do PNBB em 2035 teve um desempenho cerca de três vezes inferior ao cenário R. A recomendação geral aqui é que haja uma combinação de incentivos e que a

Figura 53 – Cenários com incrementos de atratividade



Fonte: Elaborado pelo Autor.

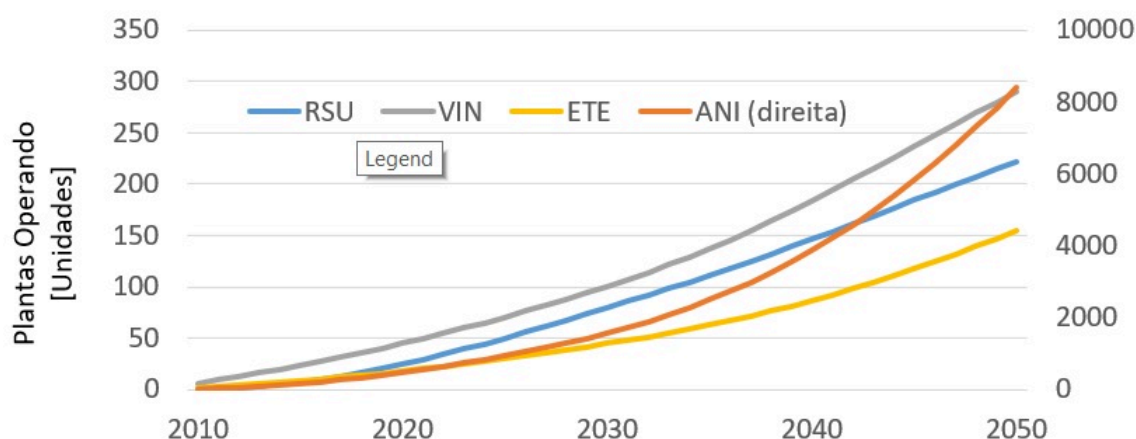
Figura 54 – Atratividade percebida cenário R



Fonte: Elaborado pelo Autor.

influência do PNBB seja melhor determinada, visto que sua implantação é incerta em data e grau de influência. Os cenários assumiram um crescimento exponencial para a atratividade do PNBB.

Figura 55 – Plantas operando cenário R.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.4 DISCUSSÃO DE CENÁRIOS

Embora o crescimento das plantas de biogás no Brasil seja considerável, ou seja, é capaz de atingir $6,8\text{Mm}^3/\text{d}$ (aprox $3,5\text{TWh}/\text{ano}$)⁵ de metano em 2030 e $18\text{Mm}^3/\text{d}$ ($9.4\text{TWh}/\text{ano}$) de metano em 2050 com 187 plantas em aterros sanitários, 5264 plantas processando resíduos de animais, 223 plantas em indústrias de cana-de-açúcar e 112 em estações de tratamento de efluentes. Porém, o aumento é relativamente baixo em comparação com macrorregiões de tamanho semelhante. Por exemplo, a Europa triplicou sua produção de biogás de 2005 a 2015, atingindo $49\text{Mm}^3/\text{d}$ equivalente de metano, associado a aproximadamente 17.400 plantas. As usinas possuem 10 GW de capacidade instalada e fornecem 61 TWh de eletricidade e 127 TJ de calor por ano (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018; SCARLAT; FAHL *et al.*, 2018).

O resultado do cenário BAU representa apenas cerca de 0,6% da demanda de energia elétrica projetada como demanda para o país ([1.605Twh] em 2050 (EPE, 2018)). Enquanto o cenário mais otimista com a implantação do PNBB em 2025 com crescimento exponencial, foi capaz de atingir $24,2\text{Mm}^3/\text{d}$ ($12,6\text{TWh}/\text{ano}$) em 2050, cerca de 0,8% da demanda em 2050. A conclusão principal deste modelo então, define que o biogás pode alcançar 1% da matriz energética no longo prazo, caso implante um PNBB e crie incentivos para os produtores.

Ainda pode-se inferir que a falta de estratégias eficazes para o desenvolvimento sustentável, a instabilidade política e as redes ineficientes entre os atores estão entre alguns dos obstáculos institucionais mais significativos que atuam como barreiras a produção de biogás no Brasil (como em muitos países em desenvolvimento). Grande parte de seu apoio vem de legisladores, mas a atual política de energia renovável

⁵ usando a taxa de conversão de $1,43\text{Kwh}$ para cada metro cúbico de biogás produzido

ilustra a falta de ambição de agilizar seu desenvolvimento (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019). Para resolver esses problemas, os resultados indicaram que a mídia, organizações públicas e ou profissionais devem estabelecer a conexão entre os problemas ambientais atuais e como eles podem ser melhorados pelo biogás (por exemplo, melhor gerenciamento de resíduos, fornecimento de energia limpa). Além dessa conscientização, as agências reguladoras devem supervisionar o biogás com políticas de apoio (em oposição às restritivas), criando oportunidades de mercado para produtores de biogás dentro dos sistemas de energia elétrica e de gás natural.

O modelo desenvolvido demonstra que os incentivos indiretos para os empreendedores em todas as rotas (a primeira função de um STI) foram os principais impulsionadores para os primeiros passos do desenvolvimento do STIBB. O aumento das atividades de pesquisa e desenvolvimento foi o segundo maior impulsionador, por exemplo com os esforços para prolongar a vida útil da tecnologia, ou mesmo em adaptar tecnologia importada.

Outro fator que se torna interessante é o mecanismo de boca a boca devido ao seu poder de influência na adoção. Em outras palavras a imitação pode substituir a influência positiva que os incentivos de preço tiveram na produção de biogás, pelo menos até certo ponto. Para aumentar a produção, porém, mais plantas precisarão receber benefícios que vão além do lucro, como a utilidade derivada de uma boa administração ambiental. À medida que a utilidade cresce, no entanto, ela não pode enfrentar eventos ruins (e.g., má gestão do biodigestor ou acidentes) por causa do efeito prejudicial que o boca a boca negativo tem na produção. Portanto, são necessários incentivos para proteger as usinas contra esses possíveis contratempos negativos até que se acumule conhecimento suficiente entre os técnicos e o mecanismo de imitação seja o principal motivador da adoção.

Os resultados ilustram que os incentivos devem ser orientados para o setor ANI, em oposição ao setor de RSU. Embora os aterros sanitários tenham potencial para produzir muito mais biometano por planta, o número das plantas não cresce tão rapidamente com o passar do tempo, quando comparado ao setor de ANI. Vale ressaltar que existe um teto de exploração, limites biofísicos e vários fatores que devem ser considerados para entender esse potencial. A razão de priorizar o setor ANI é o boca a boca e o fato de que os aterros sanitários ainda são más alternativas para o processamento de resíduos orgânicos e conseqüentemente para uma produção ótima de biogás. O compartilhamento positivo de informações nesse setor aumenta a experiência com a tecnologia, reduzindo preços e, conseqüentemente, promovendo a adoção. Com tantos adotantes, o rendimento do metano não apenas crescerá a uma taxa mais rápida que o setor de resíduos, como também promoverá resultados mais sustentáveis (e.g., diminuir o escoamento de fósforo da contenção de dejetos animais).

Finalmente a análise do modelo revela que o Brasil está longe de explorar todo o

seu potencial de biogás. Nenhum dos cenários ilustrou a curva em forma de 's' comum ao modelo de Bass, isto ocorre devido ao tamanho do mercado crescendo rapidamente. Ou seja, o mercado é grande demais para a adoção aumentar exponencialmente em um curto período, mas, ao contrário, cresce gradualmente ao longo de um período mais longo. Para que ocorra uma curva exponencial, o apoio simultâneo de diferentes sistemas sociotécnicos (por exemplo, apoio governamental, investimento internacional) precisaria ocorrer, mas é provável que surjam grandes dificuldades devido à falta de integração entre os diversos setores (por exemplo, Habitação, Gás Natural, Eletricidade, resíduos, água, agricultura) e também devido ao suporte que o país oferece para o escoamento da oferta de GN fóssil prevista para quase duplicar nos próximos 10 anos devido a perfuração de novos poços e investimentos em gasodutos de transporte. Basicamente a produção de biogás fica nas sombras do que hoje é a dificuldade do país, sua transição para o GN.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a realização de uma análise do STIBB em seu estado atual e perspectivas futuras. O trabalho foi dividido em quatro grandes seções. A primeira identificou dentro da literatura de transições sociotécnicas como o setor de biogás interage com diversos setores econômicos. A segunda apresentou o contexto brasileiro e a situação atual dos principais sistemas sociotécnicos do país, com os quais o STIBB se envolve diretamente. A terceira parte utilizou da estrutura conceitual das funções do sistema de inovação para identificar mecanismos de bloqueio e derivar questões políticas para acelerar o desenvolvimento do STIBB. A quarta grande seção demonstra um modelo prospectivo para as atividades empreendedoras do setor, mais especificamente as novas plantas de produção de biogás.

As duas últimas grandes seções buscaram contribuir para o sistema em questão. A análise fatorial pôde determinar questões práticas que podem fundamentar uma métrica mais precisa sobre como avaliar a situação de um sistema de inovação, baseado em seus objetivos de difundir a tecnologia e conhecimento. Já o modelo de dinâmica de sistemas é até o momento uma das tentativas pioneiras em estimar o potencial de produção do país de forma dinâmica, ou seja, com uma visão de futuro.

As revisões de literatura permitiram o cumprimento do primeiro objetivo específico, identificando a relevância do biogás para os principais setores econômicos (i.e., agropecuária, saneamento, transporte, energia elétrica e gás natural), mas principalmente, serviram para destacar a necessidade de ampliar a presença do biogás em matrizes energéticas variadas a fim de perseguir transições para sustentabilidade. A revisão demonstrou que os SI relacionados a energias renováveis passam por diferentes tipos de transições. As características de cada região geográfica se aprimoram de forma a criar seus próprios e bem particulares nichos protegidos (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

Há um destaque para a necessidade de regular a produção e distribuição de biogás considerando as necessidades da cadeia, como incentivos financeiros e segurança jurídica. Mesmo que esses setores estudados cumpram funções sociais, eles possuem dificuldades de interação quando o intuito é uma transição para sustentabilidade. Além disso, o biogás pode ser originado de diversas fontes diferentes, gerando mais dificuldades para regulamentação e mais burocracia. À medida que essas agências aprendem sobre o biogás e adquirem conhecimento técnico, suas instituições e regras não apenas mudam, mas também a maneira pela qual elas interagem para formular as mudanças no setor, algo essencial para o mecanismo de reconfiguração que caracteriza a transição para o uso do biogás (SCHOT; GEELS, 2008; RAVEN; GEELS, 2010; MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016).

O maior exemplo extraído da revisão de literatura, que serve de modelo para

criação de objetivos do STIBB, se refere a Suécia. O país é um caso de sucesso em que vários setores interagiram, alinharam suas políticas e formaram fortes vínculos setoriais para agregar resíduos de uma maneira em que o transporte público se tornou movido principalmente pelo biogás (FALLDE; EKLUND, 2015). Trata-se de um exemplo perfeito onde a população percebe os efeitos benéficos deste tipo de energia renovável e acelera a reconfiguração. O Brasil possui uma grande oportunidade substituindo diesel por biometano, que poderiam reconfigurar o setor de transportes, principalmente em veículos pesados.

Em um segundo momento da revisão de literatura, referente ao segundo objetivo específico, foram descritos e explicados os setores econômicos com que o biogás interage, em materiais sobre a economia Brasileira. Os SI relacionados ao biogás como é o caso do STIBB enfrentam diversas barreiras de transição, a barreira mais complexa e holística identificada durante a revisão é a necessidade de uma cooperação em nível estratégico e operacional entre vários setores para criação de legitimidade e objetivos para o sistema. Foi possível durante esta etapa, demonstrar que um país considerado em desenvolvimento, é prejudicado pela falta de capital direcionado para promover uma transição mais rápida para combustíveis gasosos renováveis, por exemplo para instalar infraestrutura (e.g., redes de gasoduto, biodigestores). Além disso, há uma falta de estratégias eficazes para suportar o desenvolvimento sustentável, a instabilidade política, a falta de alinhamento de instituições financeiras e as redes ineficientes e iniciantes entre os atores estão entre alguns dos obstáculos institucionais mais significativos que também atuam como barreiras a produção de biogás no país (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019). Ainda, as autarquias fazem parte de uma rede que naturalmente é resistente a mudança, dificultando o mecanismo de reconfiguração de entrar em ação.

Pode-se argumentar nesta análise que embora o STIBB já possua uma identidade fortalecida por regulamentações (e.g., ANP e ANEEL), grande parte de seu apoio vem de estados e municipalidades, enquanto a atual política energética, pouco considera a importância do biogás e demonstra uma falta de ambição de agilizar seu desenvolvimento. Algo que se reflete nas publicações da EPE, com baixas expectativas e pouco detalhadas sobre a expansão do biogás. O que acontece no país é que o foco do governo federal está em promover seus negócios de gás natural, principalmente no escoamento da produção *offshore*, uma competição onde o biogás não conseguirá competir em preço. A recomendação é que enquanto os níveis de consumo de GN cresçam, o biogás seja um importante aliado, recebendo incentivos para poder alcançar a fonte fóssil no curto prazo. Novamente a regulamentação se torna essencial para permitir explorar de forma concomitante GN e biometano.

A condução da análise funcional possibilitou avaliar parcialmente o estado atual do sistema, mas notoriamente, foi capaz de incluir a interpretação da visão atores do

STIBB em relação ao estágio de desenvolvimento do setor e permitiu uma identificação mais tangível de barreiras que bloqueiam o desenvolvimento atual do sistema além de destacar diversos mecanismos de bloqueio (i.e., técnico, econômico, mercado, institucional, socio-cultural e ambiental). Para buscar solução destas barreiras e bloqueios, os resultados indicaram que organizações públicas, mídias e profissionais devem estabelecer a conexão entre os problemas ambientais atuais e como eles podem ser melhorados pelo produção sustentável de biogás, formar coalizões (centralizadas nos produtores) e integrar os setores de gás e energia elétrica de forma compulsória a cadeia do biogás, um excelente exemplo seria a inclusão das distribuidoras de GN no RenovaBio.

Dois temas centrais emergiram nesta etapa do estudo, embora a função em destaque sejam as atividades empreendedoras (maior média entre as funções), os produtores de biogás não apareceram como centrais no STIBB, há mais empreendedores atuando como fornecedores que produtores de biogás efetivamente. Os produtores de pequeno e médio porte não estão organizados de forma eficiente para que o sistema acelere seu processo de expansão e alcance um de maturação, com conexões bilaterais entre os sistemas (MARKARD, 2018). Existe uma rede de produtores, porém, um pouco dispersa, algo comum, visto que a produção de biogás geralmente não é a atividade central de um produtor de biogás.

O outro tema diz respeito a formação de um mercado para o digestato/biofertilizantes, trata-se de um desafio para o país que depende de fertilizantes importados. O foco na reciclagem dos nutrientes e na logística dos substratos é vista como fator de legitimidade do STIBB. Este mecanismo pode ser explicado considerando as cadeias de nutrientes, por exemplo, a produção de alimentos ocorre em determinadas áreas, que enviam seus produtos para seus clientes (e.g., cidades, pecuaristas) que por sua vez mantém em suas áreas os resíduos destes alimentos. Portanto há uma falha grave na economia circular de nutrientes, aspectos que devem ser tratados através políticas específicas, pois trata-se de um problema sistêmico.

Outro problema sistêmico destacado é relacionado ao sistema de energia atual baseado em combustíveis fósseis, este representa uma barreira para o desenvolvimento do biogás. Principalmente no caso do Brasil, empresas estatais possuem uma grande participação de mercado na produção, distribuição e venda de combustíveis fósseis e o domínio dessas empresas (e seu poder de precificação) dificulta para pequenas e independentes empresas de bioenergia competir. De forma complementar a esta barreira, os combustíveis fósseis como o Gás Liquefeito de Petróleo (gás de cozinha) e eletricidade continuam fortemente subsidiados (BÖSSNER *et al.*, 2019). Subsídios em combustíveis fósseis são fundamentados em expectativas de crescimento econômico, porém não são eficientes para incentivar grupos de baixa renda. Porém tentativas de remover estes subsídios, são acompanhados de forte oposição

social (LONNQVIST *et al.*, 2018).

A parte prospectiva deste trabalho investigou o desenvolvimento futuro das atividades empreendedoras (apenas de produtores de biogás, de apenas quatro rotas tecnológicas), apresentando cenários potenciais para a evolução da produção de biogás no Brasil e fatores de influência. O modelo desenvolvido fornece uma avaliação da sensibilidade de vários parâmetros na adoção da tecnologia de biogás e na subsequente produção. O comportamento abrangente do modelo oferece balizadores sobre como o cenário de biogás do Brasil responderá a vários cenários hipotéticos de política a longo prazo (2010-2050).

Apesar de várias suposições no modelo e a falta de restrições técnicas e mercadológicas, os resultados, principalmente o cenário BAU, indicam que a produção de biogás está crescendo, mas a uma taxa muito lenta para transformar significativamente a matriz energética, provavelmente alcançando apenas algo entre 0,6% e 0,8% da matriz do país em 2050. Sendo a maior parte do crescimento após 2030, concordando com a EPE. O país deve atingir em 2030 um volume de produção (em biometano equivalente) próximo de 7Mmc/d e alcançar em 2050 cerca de 18Mm/d. Valores baixos quando comparados ao potencial teórico que deve alcançar 52 Mmc/d em 2050. Em outras palavras, nenhum dos cenários simulados ilustrou a curva em forma de 'S' comum do modelo de Bass esperada das intervenções, ou seja, o potencial teórico ainda está longe de se tornar um potencial realizado. Então, a aceleração para uma curva exponencial está condicionada ao apoio simultâneo de diferentes setores em políticas de longo prazo. As recomendações desta etapa correspondem a necessidade de intervenções na pecuária e na separação de resíduos urbanos.

Na comparação dos resultados dos cenários, observou-se que, se o país deseja aumentar rapidamente a produção de biogás, os esforços e incentivos devem se concentrar nos produtores de tamanho médio (i.e., aqueles que podem viabilizar pequenas produções de biometano) em oposição às grandes usinas centralizadas, que deveriam ser viabilizadas por exigências ambientais e pela participação incentivada em leilões de energia. Mais especificamente, esses esforços devem estimular o mercado descentralizado de energia, através do fortalecimento de instituições e políticas. As políticas precisam ultrapassar fronteiras estaduais (e.g., PNBB e a Política Federal do Biogás e do Biometano) e aumentarem a cota obrigatória que o país deve consumir de energia renovável, priorizando o biogás devido ao enorme serviço de redução de emissões que o biogás presta. Novas políticas não precisam necessariamente ser criadas verticalmente (e.g., impulsionadas por objetivos como os provenientes do acordo de Paris), mas sim, demandar coordenação horizontal entre os setores de resíduos, agricultura, transporte e energia (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014).

Por fim, considera-se que o objetivo geral foi parcialmente atingido, pois foi possível caracterizar e realizar uma análise do estado futuro do STIBB baseado na

produção de biogás do país e na opinião de atores, mas não foi possível determinar o alcance de eventuais mudanças estruturais de grandes setores e ou determinar com precisão os resultados da produção de biogás, conseqüentemente, o resultado é parcial ao avaliar a contribuição do biogás na matriz energética Brasileira nas próximas décadas. Isso ocorreu devido a complexidade de levantar fatores de influência para o modelo de simulação (e.g., mercados, preços de bens substitutos, acesso a recursos naturais e tecnologia), o que reforça o resultado determinando que o Brasil está longe de explorar todo o seu potencial de biogás, embora esteja no caminho certo, possui pouca aceleração, permitindo a caracterização do STIBB em uma fase de expansão.

7.1 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS FINAIS

No campo teórico este trabalho destacou a importância da identidade do STI e da localidade para o desenvolvimento de projetos de biogás e sua viabilidade, mas também ressaltou a importância de alguns conceitos teóricos, como o caminho de reconfiguração (*Reconfiguration Pathway*), co-evolução, o papel dos atores construtores do sistema e o reposicionamento (*reframing*). Um dos aspectos mais importantes para compreender a co-evolução necessária nestes sistemas é compreender o mecanismo por qual o biogás emerge. O biogás possui um sistema de inovação próprio que se adapta a um caminho de reconfiguração (GEELS; SCHOT, 2007), requerendo poucas mudanças nos sistemas sociotécnicos mais amplos e já instaurados. Por exemplo, lixões precisam ser reconfigurados em aterros, que por sua vez deveriam receber menores quantias de resíduos orgânicos, que seriam corretamente destinados a biodigestores. Outro exemplo são os produtores rurais que hoje utilizam de composteiras, precisariam reconfigurar suas práticas para utilizarem biodigestores. Embora seja uma transformação simples do ponto de vista técnico, ela tem um alto custo de transição pois depende da integração de infraestruturas e instituições.

O padrão de reconfiguração pode ser melhor explicado com a ideia de inovações simbióticas, adotadas inicialmente no nível de regime para resolver problemas locais. Elas subsequentemente desencadeiam ajustes adicionais na arquitetura básica dos sistemas sociotécnicos vigentes. Inovações radicais podem ter relações simbióticas com o regime, e serem facilmente adotadas como complemento ou substituição de componente (GEELS; SCHOT, 2007). Como ocorre nos exemplos citados no parágrafo anterior, ainda, como complemento, pode-se averiguar que a medida que mais biometano estará disponível no interior do país, deverá também existir inovações complementares técnicas (e.g., purificadores de biogás mais acessíveis, GNL de biometano, máquinas agrícolas movidas a biometano) e institucionais (e.g., concessões para distribuição de biometano, convênios formando incentivos fiscais, maior equilíbrio de custos entre biometano e GN).

As adoções de tecnologias alternativas em um mecanismo de reconfiguração

são motivadas por considerações econômicas, com objetivos por exemplo de melhorar o desempenho ou resolver pequenos problemas, mas essencialmente deixando a maioria das regras do regime inalteradas. Em outras palavras, o GN e o Diesel ainda serão por muitos anos as principais opções dos usuários, devido ao baixo custo e a disponibilidade gerada por diversos anos de institucionalização, criando dependência de trajetória. O caminho da reconfiguração é especialmente relevante para sistemas sociotécnicos distribuídos (e.g, SI do biogás (TIGABU; BERKHOUT; BEUKERING, 2015)), sistemas que funcionam através da interação de múltiplas tecnologias (e.g., agricultura, hospitais, varejo). Nestes sistemas distribuídos, as transições não são causadas pelo avanço de uma tecnologia, mas por sequências de múltiplas inovações de componentes (GEELS; SCHOT, 2007).

Outro fator importante para teoria e para a criação de identidade de um SI diz respeito a necessidade de engajar atores construtores do sistema. São agentes que possuem como características comuns: boas habilidades em gerenciar redes de atores, competências interpessoais e de comunicação, além de capacidade de criar confiança (Williams, 2002 *apud* Smink, 2015, os quais facilitam ativamente a comunicação e colaboração para buscar por exemplo reconfigurações institucionais a partir de sua liderança (e.g., nicho da gaseificação da biomassa (HELLSMARK; JACOBSSON, 2009)). O problema fundamental que estes agentes podem resolver está relacionado ao desenvolvimento dos nichos de biogás, eles podem promover a capacidade do sistema tecnológico de inovação em se ancorar no cumprimento de funções sociais (SMINK *et al.*, 2015; KEMP; SCHOT; HOOGMA, 1998). Outro mecanismo muito citado é o mecanismo de reposicionamento (do inglês, *reframing*) que se refere a como uma tecnologia se posiciona em relação às estruturas institucionais existentes. Basicamente este mecanismo indica uma necessidade de proporcionar alternativas de mercado ou modelos de negócio para os produtores de biogás, principalmente em sistemas bem desenvolvidos (MARKARD; WIRTH; TRUFFER, 2016; MUTTER, 2019). Os produtores precisam de segurança para remunerar seus investimentos e contar apenas com uma alternativa de comercializar o gás, pode ser muito arriscado no longo prazo. As políticas precisam considerar a necessidade que este energético tem de participar de um mercado estável (FALLDE; EKLUND, 2015).

Portanto, é ótimo utilizar de um mercado consistente (e.g., transporte público) para assegurar viabilidade dos projetos, mas como a consistência tem base regulatória, as mudanças nas regulações promovem uma insegurança jurídica que pode resultar em reposicionamentos mal planejados. Em síntese os produtores de biogás apresentam dificuldades em alcançar e manter a rentabilidade dos empreendimentos, boa parte devido a instabilidade de políticas e regulamentações. No contexto da Suécia por exemplo, a queda da rentabilidade tem fatores importantes, como o acesso ao GN barato e a invasão do biogás da Dinamarca (LONNQVIST *et al.*, 2018). Vale

ressaltar que existe um risco em deixar os sistemas de nicho serem orientados para os negócios (e.g. lucro) pois estes falhariam em captar os deveres sociais e ambientais destes projetos (SÄRKILAHTI *et al.*, 2017).

Um dos aspectos mais enriquecedores e ligeiramente estressado na literatura é o reconhecimento dado a necessidade de cooperação/colaboração entre agentes de diversos setores e atores, em um modelo mais heterogêneo, multidisciplinar capaz de co-evoluir para promover o biogás de forma conjunta e com políticas coerentes (RAVEN; GEELS, 2010; WIRTH, 2014; HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014). A cooperação requer que as múltiplas partes interessadas (e.g., produtores, operadores regionais de rede de gás, empresas de energia, potenciais usuários finais e governos locais) estejam fortemente integrados. A integração de sistemas requer uma "superestrutura", isto é, uma organização que pode coordenar atividades e assumir riscos importantes para garantir que a integração de sistemas seja realizada (VERNAY *et al.*, 2013).

A cooperação tem papel inclusive em facilitar o acesso a linhas de financiamento e em otimizar as economias de escala. A tecnologia requer atenção dos cooperados para manter os níveis de rentabilidade (e.g., processando bateladas estratégicas de outros substratos, comercializando energia) e a segurança operacional (e.g., riscos aos operadores e ao meio ambiente) (HOPPE; SANDERS, 2014). De forma geral a amostra também aponta para a importância de cooperação internacional via transferência de tecnologia. Isso faz todo o sentido pois conhecimentos e recursos relacionados à tecnologia geralmente podem ser transferidos com mais facilidade do que fatores institucionais (SCHMIDT; DABUR, 2014).

Ainda pode inferir que a estrutura mercadológica deve ser criada através de regulamentações, incluindo aspectos operacionais e de segurança. Estruturas institucionais (e.g. padrões tecnológicos, programas de pesquisa e desenvolvimento, sistemas educacionais, cultura local e expectativas coletivas) então possuem um papel central neste processo, principalmente na noção de fechamento dos ciclos de nutrientes e dos biofertilizantes. Não obstante, sabe-se que incentivos econômicos não se traduzem imediatamente (i.e. sofrem de um atraso) em ação, mas interferem com a comunidade local e com as forças institucionais, que eventualmente impulsionam a difusão (WIRTH, 2014).

Também observam-se diferenças no surgimento de diversos sistemas de inovação do biogás, que não podem ser explicados apenas por exemplo, pelas condições geográficas (e.g. potencial de biomassa), sistemas agrícolas e de resíduos regionais ou instituições. O surgimento destes sistemas é mais relacionado a capacidade de cooperação e de criar regulamentações previsíveis, estáveis e progressistas. A co-digestão permite às usinas de biogás criarem ligações mais fortes com os sistemas de energia, de resíduos orgânicos urbanos e da agricultura através do processamento de substra-

tos (GEELS; RAVEN, 2007). Eis que surge a necessidade de políticas integradas entre ministérios interessados nestes aspectos (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014). Inclusive para prevenir que a matéria orgânica residual utilizada para co-digestão venha a ter custo crescente para os que prestam o serviço de processá-la. Em síntese o biogás requer um nível de alinhamento entre as organizações públicas, os núcleos do sistema de inovação, e os agente periféricos como o mercado e a sociedade civil, que raramente as nações possuem em seu contexto de governança (LONNQVIST *et al.*, 2018).

Uma das falhas globais da teoria dos sistemas de inovação, que também se manifestou neste estudo, pode ser relacionada a forma de medir o sucesso dos sistemas de inovação do biogás, estes têm sido medidos pelo número de usinas, capacidade de produção ou produção de bioenergia (NEGRO; HEKKERT, 2008; WIRTH, 2014). O sucesso destes sistemas precisa analisar mais variáveis e de forma mais integrada, como por exemplo o volume de resíduo tratado, volume de fertilizante produzido, emissões evitadas. Embora estes indicadores sejam relacionado ao número de plantas, não é de uma forma linear. A capacidade de internalizar (e.g., monetizar) estes serviços é a chave para o desenvolvimento dos sistemas de biogás. O biogás demanda uma concessionária, privada ou pública que seja responsável por toda a cadeia do energético, mais capacitada a integra-lo com outros sistemas (LONNQVIST *et al.*, 2018).

Foi possível identificar na literatura que existe um padrão de bricolagem (i.e. pequenos passos, experimentação contínua) que demonstra-se mais promissor do que o padrão de rompimento (i.e. grandes investimentos, excesso de ganhos de escala) para difusão do biogás. Isso ocorre pois o primeiro permite mais interações nos mecanismos de seleção, retenção e variação que guiam o desenvolvimento dos nichos (RAVEN; GEELS, 2010).

No âmbito de políticas públicas percebe-se também um generalismo na formulação de regras, que falham em apreciar as peculiaridades de cada região. Uma barreira então se forma a partir das regulamentações e políticas existentes, que deixam pouco espaço para soluções integradas (VERNAY *et al.*, 2013). Embora a falta de coerência entre políticas (principalmente em nível local) faz emergir soluções fora do convencional, não obstante, novas políticas são criadas a partir de políticas antigas (HUTTUNEN; KIVIMAA; VIRKAMÄKI, 2014). Em complemento, as políticas energéticas tendem a enquadrar o biogás predominantemente como um solução em nível local sem discutir extensivamente uma definição de metas em nível nacional, que deveriam ser sucedidas da discussão de autonomia para diferentes contextos. Em outras palavras há necessidade de instaurar metas nacionais, considerando que as decisões para promover o biogás deveriam ser feitas mais localmente (BÖSSNER *et al.*, 2019).

Outro ponto relevante da análise é a necessidade de tratar os projetos de biogás com a devida segurança e excelência operacional e tecnológica. A falta de co-

nhecimento sobre possibilidades técnicas costuma ser um fator limitante que reduz a probabilidade de consolidação de um negócio e afeta conseqüentemente a segurança operacional das plantas (VERNAY *et al.*, 2013). Todavia, a segurança é o que merece mais atenção, existem vários riscos no manuseio e produção do biogás que podem destruir o lento ganho de legitimidade da tecnologia, em contrapartida os bons resultados precisam ser altamente visíveis para as comunidades fortalecendo a atuação das instituições informais (SÄRKILAHITI *et al.*, 2017; WIRTH, 2014; FALLER; SCHULZ, 2018).

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção, algumas formas de aprimorar e prosseguir a pesquisa são sugeridas, e são diretamente associadas a continuidade da aplicação dos métodos utilizados. Mais especificamente, os métodos de coleta de dados para análise funcional e o modelo de dinâmica de sistema proposto.

Para aprimorar o questionário, vale uma breve discussão sobre o método e a validade da análise funcional para o arcabouço teórico. Considera-se que o modelo proposto foi validado parcialmente. Algumas funções foram muito bem destacadas, como as funções F4 e F3 no fator 1, a função F7 e F5 no fator 2 e a função F1 no fator 3. Em contrapartida, as outras funções se apresentaram mais complexas de serem agrupadas, possivelmente pela falta de dados ou pelo caráter do sistema em desenvolvimento, pelo tamanho da amostra ou ainda pela baixa correlação das questões utilizadas com as funções que deveriam representar.

A adequação do modelo é possível e pode requerer mais questões. Ficou evidente nesta pesquisa que um constructo inteiro, representado por uma função, não é facilmente observado com poucas questões. O aprimoramento da técnica pode ser utilizado para capturar identidades de SI mais complexos e até mesmo fundamentar modelos de previsão. Uma coleta de dados mais completa poderia, por exemplo, associar os fatores aos motores dos sistemas de inovação (WALRAVE; RAVEN, 2016).

Por fim, como um dos fatores mais concisos é o fator 3, a análise prospectiva foi conduzida para prever a significância da inclusão de novos produtores de biogás no sistema, mais especificamente o quanto eles poderiam contribuir para a matriz energética do país. Acredita-se que com a previsão mais acurada destas atividades, mais recomendações políticas também possam ser derivadas. Por exemplo, focalizando em setores que tenham mais potencial de crescimento. Nesta etapa ficou claro a possibilidade de avaliar as funções de um SI a partir de dados quantitativos embasados na percepção dos atores, no entanto, não foi possível identificar todas as funções de forma individual. O pesquisador pode ampliar o escopo deste modelo para atender por exemplo a Teoria de Resposta ao Item, uma técnica de análise mais complexa e com resultados mais determinísticos. Ainda assim, diversas questões utilizadas no questio-

nário podem ser utilizadas para garantir uma melhor aplicação de novas técnicas.

Para aprimorar a análise prospectiva, deve-se ir além da teoria das transições, possivelmente entrando em aspectos técnicos de uma tecnologia mais específica. Uma pesquisa bibliográfica para cada sistema sociotécnico, ou setor produtor de biogás é uma possível avenida para aprimorar este estudo e deixaria mais detalhada a análise de conteúdo realizada neste trabalho. Mais pontualmente, o modelo necessita de restrições técnicas (e.g., acesso a redes de distribuição, acesso a insumos como água e resíduos, além de tecnologias e laboratórios de análise) e de uma estrutura de simulação para acesso ao mercado (e.g., aquisições compulsórias de biometano por distribuidoras de GN e de energia elétrica por distribuidoras de energia).

Outra sugestão para o modelo de dinâmica de sistemas, é buscar simular componentes mais amplos da matriz energética. Isso exigirá a parametrização do custo nivelado (do inglês, *Levelized Cost of Energy*) que permitirá que a produção de biogás cresça sem subsídios. Além disso, pesquisas futuras sobre biogás podem se basear no modelo atual, incluindo parâmetros que capturam reduções de emissão/escoamento superficial e crescimento da economia de biofertilizantes. Esses dois aspectos provavelmente aumentarão a adoção da tecnologia de biogás, uma vez que reduziriam a janela de tempo para o retorno do investimento. Outros aspectos também devem ser considerados, incluindo componentes sociais que projetariam difusão de tecnologia (por exemplo, preferências por características tecnológicas, compartilhamento de informações). O modelo de DS, portanto, deve atuar como um primeiro para informar atores de pesquisa em energia (por exemplo, EPE) sobre o que e onde coletar dados empíricos para a parametrização de variáveis (em vez de aplicá-las com premissas). Os modelos aplicados com dados empíricos são mais precisos e informativos sobre quando, onde e como aplicar políticas dinâmicas que produzam melhores resultados.

As recomendações de objetivos para trabalhos futuros derivadas deste trabalho são duas:

- Formalizar uma métrica quantitativa para mensurar o cumprimento das funções de um SI através da percepção dos atores do sistema;
- Formular um modelo prospectivo parametrizado para o volume de biogás e fertilizantes produzidos no Brasil com restrições e mercados.

Por fim, este trabalho destacou às partes interessadas como podem promover atividades empreendedoras, introduzir programas de apoio, formalizar um sistema de inovação e informar o público da necessidade de gerenciamento de resíduos. Finalmente e fundamentalmente este trabalho destacou a importância do envolvimento da sociedade no desenvolvimento do setor de biogás do Brasil, especialmente com o objetivo de criar uma identidade e objetivos para o STIBB.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS. **Associação Brasileira de Biogás e Biometano: Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano - PNBB**. [S.l.], 2018.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016 - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**. [S.l.: s.n.], 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 01/06/2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em:

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº 685, DE 29.6.2017 - DOU 30.6.2017**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685--2017>. Acesso em:

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº 8, DE 30.1.2015 - DOU 2.2.2015**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>. Acesso em:

ALBARRACIN, Astrid Lorena Torres. **Biogás oriundo de resíduos como vetor energético no Brasil**. 2016. F. 116. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

AMMENBERG, J. *et al.* Biogas in the transport sector-actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. **Resources Conservation and Recycling**, v. 129, p. 70–80, 2018. ISSN 0921-3449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.010.

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. [S.l.: s.n.], 2019.

ANGELIDAKI, Irimi *et al.* Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018. ISSN 0734-9750. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

ARGOTE, Linda; EPPLE, Dennis. Learning curves in manufacturing. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 247, n. 4945, p. 920–924, 1990. DOI: 10.1126/science.247.4945.920.

BARICHELLO, Rodrigo. **Concepção de condomínios de agroenergia: análise e proposta de metodologia para aplicação em áreas de concentração da suinocultura**. 2015. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC.

BASS, F.M. A new product growth model for consumer durables. **Management Science**, v. 15, n. 5, p. 215–227, 1969.

BAXTER, David; WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry. **The biogas handbook: science, production and applications**. [S.l.]: Woodhead, 2013. P. 512. ISBN 978-0-85709-498-8.

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. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2007.12.003.

BINZ, Christian; TRUFFER, Bernhard. Global Innovation Systems—A conceptual framework for innovation dynamics in transnational contexts. **Research Policy**, v. 46, n. 7, p. 1284–1298, 2017. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2017.05.012.

BLEY JR., Cícero. **Biogás a energia invisível**. 2. ed. [S.l.]: São Paulo: CIBiogás. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015. ISBN 978-85-67785-04-2.

BOND, Tom; TEMPLETON, Michael R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347–354, 2011. ISSN 0973-0826. DOI: 10.1016/j.esd.2011.09.003.

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.

BÖSSNER, S. *et al.* Barriers and opportunities to bioenergy transitions: An integrated, multi-level perspective analysis of biogas uptake in Bali. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 457–465, 2019. ISSN 0961-9534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.002.

CAMPBELL, B.; SALLIS, P. Low-carbon yak cheese: Transition to biogas in a Himalayan socio-technical niche. **Interface Focus**, v. 3, n. 1, 2013. ISSN 20428898 (ISSN). DOI: 10.1098/rsfs.2012.0052.

CARLSSON, Bo; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. **Journal of evolutionary economics**, 1 n.2, p. 93–118, 1991. ISSN 0936-9937.

CASARIN, M. A. **Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura**.

2016. F. 259. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

CAVICCHI, B. Sustainability that backfires: the case of biogas in Emilia Romagna. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 21, p. 13–27, 2016. ISSN 2210-4224. DOI: 10.1016/j.eist.2016.02.001.

CIBIOGÁS. **Nota técnica N 002/2010: Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/#!/notastecnicas/detalhe/5>. Foz do Iguaçu - PR 06/06/2020.

COOKE, Philip; URANGA, Mikel Gomez; ETXEBARRIA, Goio. Regional innovation systems: Institutional and organisational dimensions. **Research Policy**, v. 26, n. 4, p. 475–491, 1997. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/S0048-7333(97)00025-5.

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. DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.030.

DESCLAUX, Laurene. **Desafios para o desenvolvimento do biogás no Brasil: A importância da coordenação na formulação de políticas públicas e na regulação**. 2019. F. 97. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories. **Revista Brasileira de Inovação**, 5 (1), 2006.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.

DOSI, Giovanni *et al.* (Ed.). **Technical Change and Economic Theory**. [S.l.]: Laboratory of Economics e Management (LEM), Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa, Italy, 1988. Disponível em: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ssa:lembks:dosietal-1988>.

DURÃO, Juliana Velloso. **Transição para o uso do biogás no Brasil: análise baseada na perspectiva multinível**. 2017. Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento - PPED da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro.

EDQUIST, Charles. **Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations**. [S.l.: s.n.], 1997. ISBN 9781855674523.

- EDSAND, Hans-Erik. Technological innovation system and the wider context: A framework for developing countries. **Technology in Society**, v. 58, p. 101150, 2019. ISSN 0160-791X. DOI: 10.1016/j.techsoc.2019.101150.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **NOTA TÉCNICA PR 04/18. Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. [S./], 2018.
- EPE. **Nota técnica DEA 13/14 Demanda de Energia 2050**. [S./], 2016. P. 257.
- EPE. **Plano Decenal de Energia 2027**. [S./], 2018. P. 345.
- FALLDE, M.; EKLUND, M. Towards a sustainable socio-technical system of biogas for transport: the case of the city of Linköping in Sweden. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 17–28, 2015. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.089.
- FALLER, F.; SCHULZ, C. Sustainable practices of the energy transition - Evidence from the biogas and building industries in Luxembourg. **Applied Geography**, v. 90, p. 331–338, 2018. ISSN 0143-6228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.06.027.
- FENTON, P.; KANDA, W. Barriers to the diffusion of renewable energy: studies of biogas for transport in two European cities. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 60, n. 4, p. 725–742, 2017. ISSN 0964-0568. DOI: 10.1080/09640568.2016.1176557.
- FERREIRA, L. R. A. *et al.* Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440–455, 2018. ISSN 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.06.034.
- FEVOLDEN, A. M.; KLITKOU, A. A fuel too far? Technology, innovation, and transition in failed biofuel development in Norway. **Energy Research & Social Science**, v. 23, p. 125–135, 2017. ISSN 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2016.10.010.
- FORRESTER, Jay W. **Industrial dynamics**. [S./]: M.I.T. Press Cambridge, Mass, 1961. 464 p.
- FREEMAN, Christopher. Technical change and future trends in the world economy. **Futures**, v. 25, n. 6, p. 621–635, 1993.
- FREEMAN, Christopher; SOETE, Luc. **The economics of industrial innovation**. [S./]: Routledge, 1997.
- GAVA, O. *et al.* Knowledge networks and their role in shaping the relations within the Agricultural Knowledge and Innovation System in the agroenergy sector. The case of biogas in Tuscany (Italy). **Journal of Rural Studies**, v. 56, p. 100–113, 2017. ISSN 0743-0167. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2017.09.009.

GEELS, F. W.; RAVEN, R. P. J. M. Socio-cognitive evolution and co-evolution in competing technical trajectories: Biogas development in Denmark (1970–2002). **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Taylor & Francis, v. 14, n. 1, p. 63–77, 2007. DOI: 10.1080/13504500709469708.

GEELS, Frank. Co-evolution of technology and society: The transition in water supply and personal hygiene in the Netherlands (1850–1930)—a case study in multi-level perspective. **Technology in Society**, v. 27, n. 3, p. 363–397, 2005. ISSN 0160-791X. DOI: 10.1016/j.techsoc.2005.04.008.

GEELS, Frank W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy**, v. 31, n. 8, p. 1257–1274, 2002. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00062-8.

GEELS, Frank W.; SCHOT, Johan. Typology of sociotechnical transition pathways. **Research Policy**, v. 36, n. 3, p. 399–417, 2007. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2007.01.003.

GEELS, Frank W.; SOVACOO, Benjamin K. *et al.* The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions. **Joule**, v. 1, n. 3, p. 463–479, 2017. ISSN 2542-4351. DOI: 10.1016/j.joule.2017.09.018.

GEELS, Frank; DEUTEN, J Jasper. Local and global dynamics in technological development: a socio-cognitive perspective on knowledge flows and lessons from reinforced concrete. **Science and Public Policy**, v. 33, n. 4, p. 265–275, mai. 2006. ISSN 0302-3427. DOI: 10.3152/147154306781778984.

HAIR, Joseph F. *et al.* **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2009. ISBN 978-85-7780-402-3.

HEFNER, Robert A. The age of energy gases. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 27, n. 1, p. 1–9, 2002. ISSN 0360-3199. DOI: 10.1016/S0360-3199(01)00079-9. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901000799>.

HEKKERT, M. P. *et al.* Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 4, p. 413–432, 2007. ISSN 0040-1625. DOI: doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002.

HELLSMARK, Hans; JACOBSSON, Staffan. Opportunities for and limits to Academics as System builders—The case of realizing the potential of gasified biomass in Austria. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5597–5611, 2009. ISSN 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.023>.

HOPPE, T.; SANDERS, P. T. M. Agricultural green gas demonstration projects in the Netherlands. A stakeholder analysis. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 13, n. 12, p. 3083–3096, 2014. ISSN 15829596 (ISSN).

HORSCHIG, Thomas; ADAMS, P.W.R. *et al.* How to decarbonize the natural gas sector: A dynamic simulation approach for the market development estimation of renewable gas in Germany. **Applied Energy**, Elsevier, v. 213, p. 555–572, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.016.

HORSCHIG, Thomas; WELFLE, Andrew *et al.* From Paris agreement to business cases for upgraded biogas: Analysis of potential market uptake for biomethane plants in Germany using biogenic carbon capture and utilization technologies. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 313–323, 2019. ISSN 0961-9534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.022.

HUTTUNEN, S.; KIVIMAA, P.; VIRKAMÄKI, V. The need for policy coherence to trigger a transition to biogas production. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 12, p. 14–30, 2014. ISSN 2210-4224. DOI: 10.1016/j.eist.2014.04.002.

IEA. **International Energy Agency. Renewables information: overview**. [S.l.], 2017. P. 11.

IPBES. **Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental - Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)**. [S.l.], 2019.

IPEA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores - Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada**. [S.l.: s.n.], 2012.

KEMP, René; SCHOT, Johan; HOOGMA, Remco. 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. DOI: 10.1080/09537329808524310.

KINNON, Michael A. Mac; BROUWER, Jacob; SAMUELSEN, Scott. 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. DOI: 10.1016/j.pecs.2017.10.002.

KOHLER, Jonathan *et al.* An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, 2019. ISSN 2210-4224. DOI: 10.1016/j.eist.2019.01.004.

LAKATOS, Eva Maria; ANDRADE MARCONI, MARina de. **Metodologia do trabalho científico**. [S.l.]: São Paulo: Atlas, 1991.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation modeling and analysis**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 2010.

LEUSIN, Matheus Eduardo. **Análise da difusão da tecnologia eólica no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC.

LIMA, Rodolfo M *et al.* Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. **Waste Management**, v. 74, p. 323–334, 2018. ISSN 0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.12.011.

LONNQVIST, T. *et al.* Large-scale biogas generation in Bolivia - A stepwise reconfiguration. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 494–504, 2018. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.174.

LUNDEVALL, Bengt-Åke. **National Systems of Innovation: towards a Theory of Innovation and Interactive Learning**. [S.l.]: London: Printer Publishers, 1992.

LYYTIMAKI, J. Renewable energy in the news: Environmental, economic, policy and technology discussion of biogas. **Sustainable Production and Consumption**, v. 15, p. 65–73, 2018. ISSN 2352-5509. DOI: 10.1016/j.spc.2018.04.004.

MAGNUSSON, T.; BERGGREN, C. Competing innovation systems and the need for redeployment in sustainability transitions. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 126, p. 217–230, 2018. ISSN 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.08.014.

MALERBA, Franco. Sectoral systems of innovation and production. **Research Policy**, v. 31, n. 2, p. 247–264, 2002. Innovation Systems. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/S0048-7333(01)00139-1.

MARIANI, Leidiani. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2018. F. 144. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP.

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. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2012.02.013.

MARKARD, J.; STADELMANN, M.; TRUFFER, B. Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland. **Research Policy**, v. 38, n. 4, p. 655–667, 2009. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2009.01.013.

- MARKARD, J.; WIRTH, S.; TRUFFER, B. Institutional dynamics and technology legitimacy - A framework and a case study on biogas technology. **Research Policy**, v. 45, n. 1, p. 330–344, 2016. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2015.10.009.
- MARKARD, Jochen. The life cycle of technological innovation systems. **Technological Forecasting and Social Change**, 2018. ISSN 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.07.045.
- MARKARD, Jochen; TRUFFER, Bernhard. Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. **Research Policy**, v. 37, n. 4, p. 596–615, 2008. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2008.01.004.
- MARTIN, Hanna; COENEN, Lars. Institutional Context and Cluster Emergence: The Biogas Industry in Southern Sweden. **European Planning Studies**, Routledge, v. 23, n. 10, p. 2009–2027, 2015. DOI: 10.1080/09654313.2014.960181.
- MCTIC. **Plano de ciência tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis 2018-2022**. [S.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018.
- MEADOWS, Donella. **Thinking in Systems: a primer**. [S.l.]: Vermont: Chelsea Green Publishing, 2008.
- MENDONÇA, Andréa Torres Barros Batinga de. **O processo de transição sociotécnica para a ecoinovação a partir da relação multinível: o caso dos programas da Itaipu**. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba - PR.
- MILANEZ, A. Y. *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: Panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 47, p. 221–276, 2017.
- MORECROFT, John. **Strategic Modelling and Business Dynamics: a feedback systems approach**. 2. ed. [S.l.]: Chichester: John Wiley e Sons, 2015. 504 p.
- MUTTER, A. Mobilizing sociotechnical imaginaries of fossil-free futures. Electricity and biogas in public transport in Linköping, Sweden. **Energy Research and Social Science**, v. 49, p. 1–9, 2019. ISSN 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2018.10.025.
- NEGRO, Simona O.; ALKEMADE, Floortje; HEKKERT, Marko P. Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3836–3846, 2012. ISSN 1364-0321. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.043.
- 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.

NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. **An Evolutionary Theory of Economic Change**. [S.l.]: 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. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100414.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Emissões de GEE no Brasil (1970-2016)**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/%20Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>. Acessado em: 18/05/2019).

OCDE. **The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities**. 4. ed. [S.l.]: FINEP 3ed., 2018. P. 258.

OLAYA, Camilo. Cows, agency, and the significance of operational thinking. **System Dynamics Review**, Wiley, v. 31, n. 4, p. 183–332, 2015.

PAPACHRISTOS, George. System dynamics modelling and simulation for sociotechnical transitions research. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, Elsevier BV, v. 31, n. 4, 2018.

PIDD, Michael. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2012.

RABONI, M.; URBINI, G. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, p. 191–202, 2014. DOI: 10.4136/ambi-agua.1324.

RAVEN, R. P. J. M. Implementation of manure digestion and co-combustion in the Dutch electricity regime: a multi-level analysis of market implementation in the Netherlands. **Energy Policy**, v. 32, n. 1, p. 29–39, 2004. ISSN 0301-4215. DOI: 10.1016/S0301-4215(02)00248-3.

RAVEN, R.; GEELS, F. W. Socio-cognitive evolution in niche development: Comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973-2004). **Technovation**, v. 30, n. 2, p. 87–99, 2010. ISSN 0166-4972. DOI: 10.1016/j.technovation.2009.08.006.

ROGERS, Everett M. **Diffusion of innovations**. [S.l.]: New York: Free press, 2003.

ROSENBERG, Nathan. Inside the Black Box: Technology and Economics. **Technology and Culture**, v. 25, jul. 1984. DOI: 10.2307/2596875.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos *et al.* Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54–63, 2018. ISSN 0921-3449. DOI: doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012.

SÄRKILAHITI, M. *et al.* Replacing centralised waste and sanitation infrastructure with local treatment and nutrient recycling: Expert opinions in the context of urban planning. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 118, p. 195–204, 2017. ISSN 0040-1625. DOI: [10.1016/j.techfore.2017.02.020](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.02.020).

SCARLAT, Nicolae; DALLEMAND, Jean-François; FAHL, Fernando. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457–472, 2018. ISSN 0960-1481. DOI: [10.1016/j.renene.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006).

SCARLAT, Nicolae; FAHL, Fernando *et al.* A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 915–930, 2018. DOI: [10.1016/j.rser.2018.06.035](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.035).

SCHMIDT, Tobias S.; DABUR, Sandeep. Explaining the diffusion of biogas in India: a new functional approach considering national borders and technology transfer. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 16, p. 171–199, 2014. DOI: [10.1007/s10018-013-0058-6](https://doi.org/10.1007/s10018-013-0058-6).

SCHOT, Johan; GEELS, Frank W. Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy. **Technology Analysis & Strategic Management**, Routledge, v. 20, n. 5, p. 537–554, 2008. DOI: [10.1080/09537320802292651](https://doi.org/10.1080/09537320802292651).

SCHUMPETER, Joseph A. **A teoria do desenvolvimento econômico**. [S.l.]: Nova Cultural, São Paulo, 1985.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf. Acesso em: 06/06/2020.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf. Acesso em: 06/06/2020.

SENGE, Peter M. **A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende**. 29. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: Best Sellers, 2018. ISBN 978-85-465-0109-0.

SGANZERLA, Edílio. **Biodigestor: uma solução**. Porto Alegre, RS: Agropecuária, 1983.

SMINK, Magda *et al.* How mismatching institutional logics hinder niche–regime interaction and how boundary spanners intervene. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 100, p. 225–237, 2015. ISSN 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.07.004.

SMITH, Adrian; RAVEN, Rob. What is protective space? Reconsidering niches in transitions to sustainability. **Research Policy**, v. 41, n. 6, p. 1025–1036, 2012. Special Section on Sustainability Transitions. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2011.12.012.

STERMAN, John D. **Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a complex world**. Boston: Mc Graw Hill Higher Education, 2000. 1008p.

SUTHERLAND, L. A.; PETER, S.; ZAGATA, L. Conceptualising multi-regime interactions: The role of the agriculture sector in renewable energy transitions. **Research Policy**, v. 44, n. 8, p. 1543–1554, 2015. ISSN 0048-7333. DOI: 10.1016/j.respol.2015.05.013.

THE WORLD BANK, W; **What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050**. Edição: The World Bank. [S.l.], 2018. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0.

TIGABU, A. D.; BERKHOUT, F.; BEUKERING, P. van. The diffusion of a renewable energy technology and innovation system functioning: Comparing bio-digestion in Kenya and Rwanda. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, p. 331–345, 2015. ISSN 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2013.09.019.

TSVETKOVA, Anastasia; GUSTAFSSON, Magnus. Business models for industrial ecosystems: a modular approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 29-30, p. 246–254, 2012. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.017.

UNRUH, G. C. Escaping carbon lock-in. **Energy Policy**, v. 30, n. 4, p. 317–325, 2002. ISSN 0301-4215. DOI: 10.1016/S0301-4215(01)00098-2.

UNRUH, G. C. Understanding carbon lock-in. **Energy Policy**, v. 28, n. 12, p. 817–830, 2000. ISSN 0301-4215. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00070-7.

URIONA MALDONADO, Mauricio; GROBBELAAR, Sara. Innovation system policy analysis through system dynamics modelling: A systematic review. **Science and Public Policy**, v. 46, n. 1, p. 28–44, 2019. DOI: 10.1093/scipol/scy034.

VAZ, Caroline Rodrigues; URIONA-MALDONADO, Mauricio. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and Systematic Yielding Mapping Process). **Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos da Engenharia de Produção (UFSC ed., Vol. 1, pp. 21-42 p)**., p. 21–42, 2017.

VERNAY, A. L. *et al.* Exploring the socio-technical dynamics of systems integration - the case of sewage gas for transport in Stockholm, Sweden. **Journal of Cleaner Production**, v. 44, p. 190–199, 2013. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.11.040.

WALRAVE, Bob; RAVEN, Rob. Modelling the dynamics of technological innovation systems. **Research Policy**, v. 45, n. 9, p. 1833–1844, 2016. ISSN 0048-7333. DOI: doi.org/10.1016/j.respol.2016.05.011.

WANG, Xiaojiao *et al.* Development process and probable future transformations of rural biogas in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 703–712, 2016. ISSN 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.097.

WBA. **World Biogas Association: Biogas - An important renewable energy source**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%5C%20-%5C%20Biogas.pdf>. Acessado em: 04/04/2019).

WIECZOREK, Anna J.; HEKKERT, Marko P. Systemic instruments for systemic innovation problems: a framework for policy makers and innovation scholars. **Science and Public Policy**, Beech Tree Publishing, v. 39, n. 1, p. 74–87, 2012. ISSN 0302-3427. DOI: 10.1093/scipol/scr008.

WIRTH, S. Communities matter: Institutional preconditions for community renewable energy. **Energy Policy**, v. 70, p. 236–246, 2014. ISSN 0301-4215.

WRIGHT, Theodore Paul. Factors affecting the cost of airplanes. **J. Aeronaut. Sci.**, v. 3, p. 122–128, 1936. DOI: 10.2514/8.155.

ŽÁK, Michal *et al.* Single-step purification of raw biogas to biomethane quality by hollow fiber membranes without any pretreatment – An innovation in biogas upgrading. **Separation and Purification Technology**, v. 203, p. 36–40, 2018. ISSN 1383-5866. DOI: doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.024.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. F. 97. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

APÊNDICE A – BIBLIOMETRIA

O interesse pelo processo de produção de biogás mudou muito nos últimos anos devido a diversas pressões exercidas pelo contexto do ambiente (e.g., pressão pela redução de emissões de GEE e o aumento da demanda de energia), mas também devido as inovações, aos aprimoramentos tecnológicos que possibilitaram o uso da DA em escalas maiores. Este novo estado da arte, permite que a tecnologia seja analisada como um motor (i.e., um motivador, fonte de mudanças) para uma transição para sustentabilidade, assim despertando a curiosidade da comunidade científica.

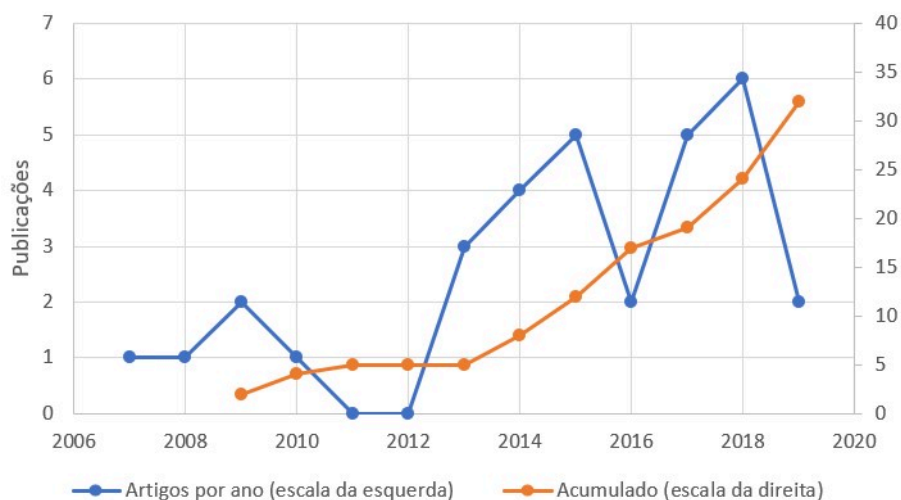
Esta revisão foi motivada pela dificuldade de encontrar um aglomerado de publicações sobre o biogás que pudesse auxiliar o leitor a perceber os autores, revistas e palavras-chave que suportam o biogás como agente transformador nesta transição energética. Como complemento, no corpo da dissertação está a análise de conteúdo destas publicações trouxe indícios de como cada setor da economia pode auxiliar, ou percebe dificuldades no desenvolvimento da cadeia do biogás.

Com relação as teorias que embasam parte desta comunidade (i.e., *Frameworks*), nota-se primeiramente que houve o tempo em que o termo transição poderia ser empregado para classificar a emergência de um combustível fóssil em detrimento de outros, como por exemplo o gás natural diante do petróleo. Hoje, no entanto a transição é em função das energias renováveis. De tal forma que energia solar e eólica já se aproximam das fontes mais comuns, o biogás porém, ainda é incipiente na transição energética. Apenas alguns países bem desenvolvidos possuem o biogás como uma fonte essencial em sua matriz.

Cada vez mais, pesquisadores buscam aprimorar não só as técnicas de produção de biogás, mas também as lentes teóricas em busca de compreender formas de incluir o biogás na transição, principalmente através de mecanismos regulatórios. O gráfico 56 ilustra o crescimento da temática do biogás nos estudos de transições. Basicamente, as publicações vem crescendo paulatinamente, demonstrando um crescimento exponencial. Vale lembrar que a amostra inclui artigos relacionados a transições, melhoramentos de eficiência na tecnologia não fizeram parte da amostra.

A análise dos periódicos permitiu a identificação da rede de pesquisa *Sustainability Transitions Research Network* que demonstra grande interesse no biogás. Nesta rede diversos pesquisadores possuem publicações em periódicos de alto impacto. Devido ao fortalecimento da rede ao longo dos últimos anos, ela possui o próprio periódico *Environmental Innovation and Societal Transitions (EIST)*, notoriamente é o segundo periódico, junto de outros dois, que possuem mais publicações sobre biogás e transições, com 3 artigos. Ainda assim, o periódico com mais artigos na amostra é o *Technological Forecasting and Social Change (TFSC)* com 4 artigos publicados. A Tabela 25 apresenta os periódicos mais relevantes na amostra analisada.

Figura 56 – Número de publicações sobre transições e biogás



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Revistas que mais publicaram sobre biogás e transições até 2019

Tipo	Artigos
<i>Technological Forecasting and Social Change</i>	4
<i>Environmental Innovation and Societal Transitions</i>	3
<i>Journal of Cleaner Production</i>	3
<i>Research Policy</i>	3
<i>Energy Policy</i>	2
<i>Energy Research & Social Science</i>	2
<i>Applied Geography</i>	1
<i>Biomass and Bioenergy</i>	1
<i>Energy, Sustainability and Society</i>	1
<i>Environmental Economics and Policy Studies</i>	1
<i>Environmental Engineering and Management Journal</i>	1
<i>European Planning Studies</i>	1
<i>Interface Focus</i>	1
<i>Journal of Environmental Planning and Management</i>	1
<i>Journal of Rural Studies</i>	1
<i>Resources Conservation and Recycling</i>	1
<i>Sustainability</i>	1
<i>Sustainable Production and Consumption</i>	1
<i>Technology Analysis and Strategic Management</i>	1
<i>Technovation</i>	1

Fonte: Elaborado pelo autor

O periódico EIST tem como objetivo abordar questões relacionadas a transição, particularmente associadas a inovações tecnológicas, organizacionais, econômicas, institucionais e políticas, além de mudanças de setores e em toda a economia, como nas áreas de energia, transportes, agricultura e gestão da água. Já o periódico TFSC é mais enfático a metodologia e a prática de previsão e estudos futuros, com o uso

de ferramentas de planejamento que inter-relacionam fatores sociais, ambientais e tecnológicos.

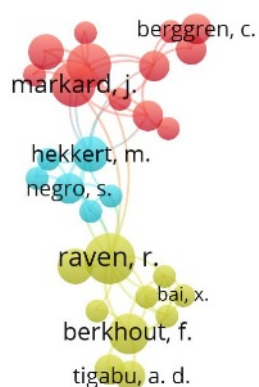
Os outros dois periódicos *Journal of Cleaner Production* e *Research Policy*, possuem linhas similares. Enquanto o primeiro aborda novas práticas mais integradas ao ambiente e a sustentabilidade o segundo aborda estudos econômicos, gestão de ciência, tecnologia e inovação. Em síntese, o biogás aparece preferencialmente em periódicos que tratam de barreiras e oportunidades sociais, econômicas, comportamentais, psicológicas e políticas para mudar o paradigma atual e promover a sustentabilidade. A presença do biogás nestes periódicos reforça sua importância como agente transformador.

A relação de autores na amostra apresentou um total de 78 autores, no entanto alguns se destacam por aparecer em mais de uma publicação. Os autores Raven, R., Markard, J., Truffer B., Wirth, S. são os mais influentes na amostra e participaram de 3 publicações cada um. O mais influente pode ser Rob Raven, pois o autor possui um dos artigos mais citados com cerca de 537 citações. Neste trabalho, em 2010 junto com Frank Geels (outro dos autores mais influentes, com duas publicações) os autores avaliaram a evolução da tecnologia do biogás no contexto dos Países Baixos, onde produtores de animais possuíam muitos problemas com o acúmulo de dejetos. Em síntese o trabalho teve um grande resultado, apontando que a DA é uma tecnologia que não deve ser concentrada, ela apresenta mais vantagens se utilizada de forma descentralizada. Plantas de grande porte são ótimas, mas plantas gigantes e centralizadas, só aumentam os custos de operação e diminuem a legitimidade e a capacidade de difusão da tecnologia.

Quanto aos autores Markard, J., Truffer B., Wirth, S. em um artigo relativamente recente, este com cerca de 79 citações, os autores explicam como muitos incentivos (principalmente para culturas de plantações dedicadas a produção de biogás) podem promover a tecnologia, mas deturpar a sua legitimidade, além de causar grande instabilidade jurídica para os investidores. Ao mapear a rede, ainda pode-se citar os autores Hekkert, M. e Negro, S. que aparecem diretamente conectados a rede principal, como mostra a Figura 57. Estes autores são extremamente relevantes, pois são trabalhos seminais que utilizam da análise funcional dos SI, exatamente o que busca-se neste trabalho.

Nesta etapa da análise pôde-se exprimir que a literatura não é dominada por poucos autores e sim por muitos. Mas a qualidade dos artigos dos autores mais influentes é excepcional e amplamente mais citada. Isso se deve ao fato que ao mesmo tempo em que estes autores tratam de ampliar a teoria das transições, utilizam do biogás e os estudos de caso como uma ferramenta para explorar a teoria. Eles afirmam que devido a característica do biogás em requerer uma forte integração entre diversos setores (aqui tratados como sistemas sociotécnicos), é um ótimo objeto para testar a

Figura 57 – Rede principal de autores



Fonte: Elaborado pelo autor

amplitude e os limites das teorias existentes.

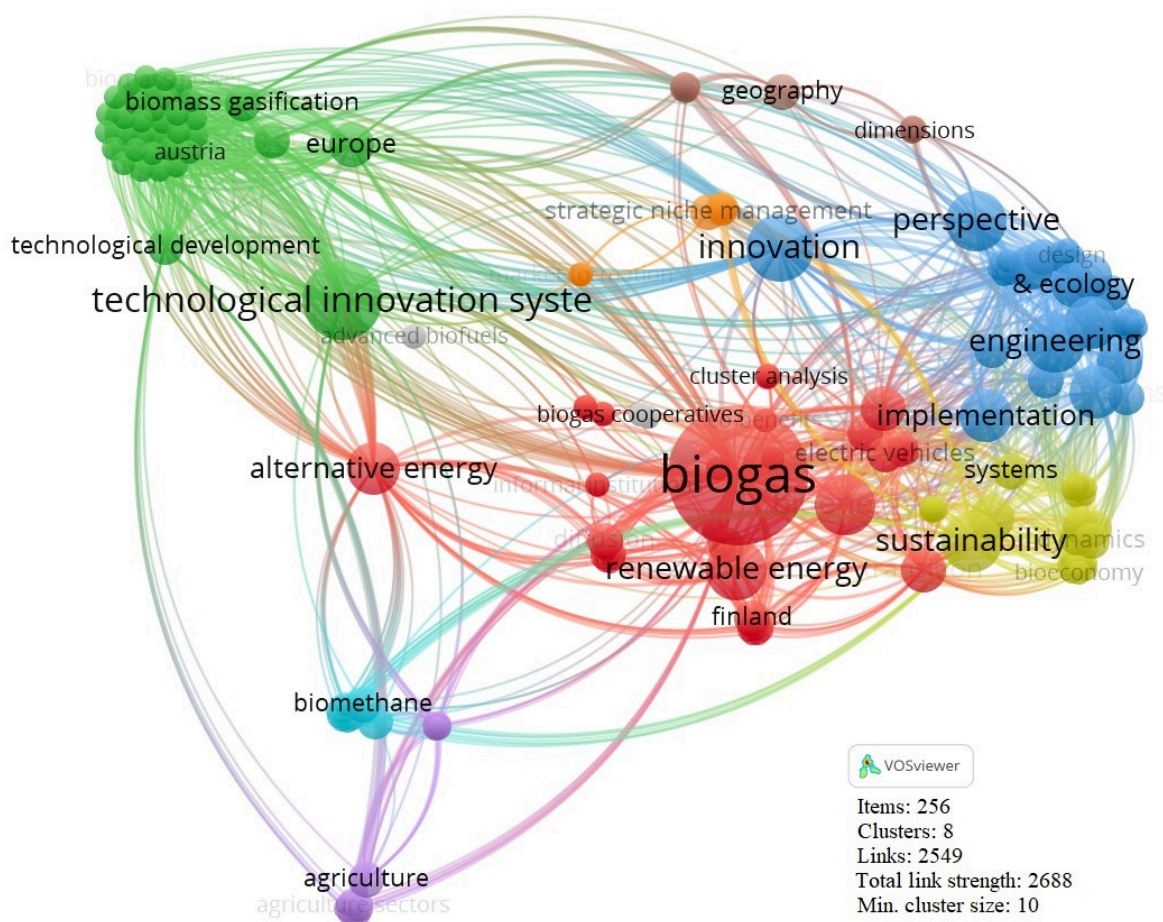
A última parte da bibliometria é a classificação das palavras-chave, com um total de 256, as palavras-chave foram classificadas pelo número de ocorrências de forma que as mais utilizadas aparecem em um tamanho maior (veja a Figura 58). No entanto, muitas vezes palavras diferentes são usadas com significados semelhantes (por exemplo, energia renovável ou energia alternativa), então vale lembrar que o tratamento dos dados contém inferências do pesquisador.

Com esta análise, foram identificados oito grupos a serem explorados. Começando pelo centralizado no biogás (vermelho), ele está conectado a diferentes nós como: energia alternativa ou renovável, que são óbvios até certo ponto, mas os nós mais interessantes são os menores em duas conexões: veículos elétricos e cooperativas. Estes dois nós mostram que o biogás vai além do autoconsumo do produtor, para interagir com nichos aparentemente não relacionados, como o de carros elétricos, não obstante, o segundo nó indica como o biogás requer mudanças em fatores sociais para se difundir, cooperativas são o exemplo perfeito desta necessidade.

O segundo grupo é centrado na lente teórica STI (verde) com conexões ao desenvolvimento tecnológico e a diferentes usos para biomassa, como por exemplo a gaseificação. A gaseificação é uma técnica de produção de gás renovável diferente da DA, apesar de promissora ainda não atingiu um nível tecnológico comercial e por isso aparece distante do biogás. Também pode-se reconhecer o papel da Europa como um nó importante, representando o estado da arte no desenvolvimento tecnológico do biogás e das abordagens analíticas relacionadas as transições, como é o caso dos STIs.

O terceiro grupo está em Engenharia (azul), vinculado a palavras-chave como: inovação, ciências ambientais, gerenciamento, design industrial e implementação. Este grupo representa o paradigma atual, as técnicas e práticas que vem guiando o com-

Figura 58 – Mapeamento de palavras chave



Fonte: Elaborado pelo autor

portamento de busca dos engenheiros nos últimos anos. O Quarto grupo (amarelo) destaca as palavras: sustentabilidade e bioeconomia, mas são duas outras menores que chamam atenção: sistemas e dinâmica. Estas duas últimas ilustram a necessidade de modelar os sistemas da bioeconomia, visto que a compreensão destes sistemas raramente é linear e geralmente se manifesta em longo prazo, o que dificulta a percepção de suas falhas e a tomada de decisão.

Os outros aglomerados são pequenos mas relevantes, por exemplo, o biometano (ciano) é uma forma de comercializar o biogás que já está ganhando legitimidade para formar o próprio grupo, principalmente no caso de países desenvolvidos. A agricultura (roxo) aparece distante porque é um campo muito abrangente, embora o biogás afete a agricultura, não muda seu objetivo principal, nem muda drasticamente a maneira de conduzir os negócios, funciona mais como um negócio a parte. O grupo centrado na Gestão Estratégica de Nicho (GEN) indica que outras lentes teóricas também são úteis para compreender os caminhos pelos quais o biogás penetra na matriz energético. Por último o oitavo grupo se refere a geografia, basicamente expres-

sando que a tecnologia emerge de formas diferentes mesmo em países com contextos semelhantes.

Em uma análise mais holística, pode-se dividir o mapa em dois grandes campos horizontais, à direita os paradigmas atuais e a esquerda, como a inovação busca mudar tudo isso. Por fim, os artigos utilizados na revisão são listados nas tabelas abaixo, por ordem do maior número de vezes citado.

Tabela: Artigos revisão estruturada

Autores	Título	Cit.	Estudo de caso	Tipo de Análise	Agri cola	Sanea mento	Energ ia	Gas Natural	Tras portes
Raven, R., Geels, F. W. (2010)	Socio-cognitive evolution in niche development: Comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973–2004)	537	Dinamarca e Países Baixos	Gestão de nichos	x				
Negro, S., Hekkert, M., Smits, R., (2007)	Explaining the failure of the Dutch innovation system for biomass digestion—a functional analysis	331	Países Baixos	TIS	x	x	x		
Negro, S., Hekkert, M.P., (2008)	Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany	161	Alemanha	TIS	x	x	x	x	
Markard, J., Stadelmann, M. Truffer, B. (2009)	Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland	111	Suíça	TIS	x		x	x	
Markard, J., Wirth, S. Truffer, B. (2016)	Institutional dynamics and technology legitimacy – A framework and a case study on biogas technology	79	Alemanha	TIS	x		x		
Wirth, S. (2014)	Communities matter: Institutional preconditions for community renewable energy	78	Itália	TIS	x		x		
Wirth, S., Markard, J., Truffer, B., et al. (2013)	Informal institutions matter: Professional culture and the development of biogas technology	70	Austria	TIS + Instituições	x		x		
Hellmark, H., Jacobsson, S. (2009)	Opportunities for and limits to Academics as System builders—The case of realizing the potential of gasified biomass in Austria	69	Austria	TIS	x	x	x	x	
Tigabu, A. D., Berkhout, F., van Beukering, P. (2015)	The diffusion of a renewable energy technology and innovation system functioning: Comparing bio-digestion in Kenya and Rwanda	59	Rwanda, Kenya	TIS	x				
Falld, M., Eklund, M. (2015)	Towards a sustainable socio-technical system of biogas for transport: the case of the city of Linköping in Sweden	58	Suécia	MLP + SI construtores		x	x	x	x
Raven, R., Geels, F. W. (2007)	Socio-cognitive evolution and co-evolution in competing technical trajectories: Biogas development Denmark (1970-2002)	51	Dinamarca	MLP	x	x	x		
Huttunen, S., Kivimaa, P., Virkamäki, V. (2013)	The need for policy coherence to trigger a transition to biogas production	44	Finlândia	TIS + Coerência política	x	x	x	x	
Sutherland, L. A., Peter, S., Zagata, L. (2015)	Conceptualising multi-regime interactions: The role of the agriculture sector in renewable energy transitions	38	Reino Unido, Alemanha e	MLP	x		x		
Smink, M., Negro, S. O., Niesten, E., Hekkert, M. P. (2015)	How mismatching institutional logics hinder niche–regime interaction and how boundary spanners intervene	37	Países Baixos	MLP + Institucional	x			x	
Martin, H., Coenen, L. (2015)	Institutional Context and Cluster Emergence: The Biogas Industry in Southern Sweden	32	Suécia	TIS		x		x	x
Schmidt, T. S., Dabur, S. (2014)	Explaining the diffusion of biogas in India: a new functional approach considering national borders and technology transfer	32	Índia	TIS	x	x	x	x	
Vemay, A. L., Mulder, K. F., Kamp, L. M., et al. (2013)	Exploring the socio-technical dynamics of systems integration e the case of sewage gas for transport in Stockholm, Sweden	28	Suécia	MLP		x			x

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela: Artigos revisão estruturada

Autores (Ano de publicação)	Título	Cit.	Estudo de caso	Tipo de Análise	Agri cola	Sanea mento	Energ ia	Gas Natural	Tras portes
Campbel, B., Sallis, P. (2013)	Low-carbon yak cheese: transition to biogas in a Himalayan socio-technical niche	12	Nepal	Desenvolvimento de Nicho	x				
Cavicchi, B. (2016)	Sustainability that backfires: the case of biogas in Emilia Romagna	9	Itália	Sustentabilidade + DS	x		x		
Fenton, P., Kanda, W. (2017)	Barriers to the diffusion of renewable energy: studies of biogas for transport in two European cities	9	Suíça e Dinamarca	Difusão de inovações e TIS				x	x
Fevolden, A. M., Klitkou, A. (2017)	A fuel too far? Technology, innovation, and transition in failed biofuel development in Norway	8	Noruega	TIS	x	x		x	x
Hoppe, T., Sanders, M. P. T. (2014)	Agricultural green gas demonstration projects in the netherlands, a stakeholder analysis	8	Países Baixos	Desenvolvimento de nicho	x		x	x	
Ammenberg, J., Anderberga, S., Lönnqvist, T., et al. (2018)	Biogas in the transport sector—actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region	7	Suécia	MLP		x			x
Magnusson, T., Berggren, C. (2018)	Competing innovation systems and the need for redeployment in sustainability transitions	7	Suécia	Desenvolvimento de Nicho e SI			x		x
De Oliveira, L. G. S., Negro, S. o. (2019)	Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System	6	Brasil	SI + análise histórica	x	x	x	x	
Gava, O., Favilli, E., Bartolini, F., Brunori, G. (2017)	Knowledge networks and their role in shaping the relations within the Agricultural Knowledge and Innovation System in the agroenergy sector. The case of biogas in Tuscany (Italy)	5	Itália	SI da agricultura + redes sociais	x		x		
Lyytymäki, J. (2018)	Renewable energy in the news: Environmental, economic, policy and technology discussion of biogas	3	Finlândia	Transições + mídias	x	x	x	x	x
Sarkilahti, M., Kinnunen, V., Kettunen, R., et al. (2017)	Replacing centralised waste and sanitation infrastructure with local treatment and nutrient recycling: Expert opinions in the context of urban planning.	3	Finlândia	MLP foco no nicho em criação		x			
Faller, F., Schulz, C. (2018)	Sustainable practices of the energy transition e Evidence from the biogas and building industries in Luxembourg	2	Luxemburgo	Transições		x	x		
Bossner, S., Devisscher, T., Suljada, T., et al. (2019)	Barriers and opportunities to bioenergy transitions: An integrated, multilevel perspective analysis of biogas uptake in Bali	0	Índonesia	MLP	x				
Lonnqvist, T., Sandberg, T., Birbuet, J. C., et. al. (2018)	Large-scale biogas generation in Bolivia - A stepwise reconfiguration	0	Bolívia	MLP		x			
Mutter, A. (2019)	Mobilizing sociotechnical imaginaries of fossil-free futures – Electricity and biogas in public transport in Linköping, Sweden	0	Suécia	MLP + previsão					x

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B – CONSULTA SOBRE O SISTEMA TECNOLÓGICO DE INOVAÇÃO DO BIOGÁS DO BRASIL (STIBB)

*Este formulário foi desenvolvido no Formulários Google. O formulário ficou aberto de 07/01/2020 até 07/02/2020 sob o link: <https://forms.gle/bLcjmzTFEKngXVDJ8>



Este formulário busca fundamentar uma análise funcional sobre o nível atual e futuro do setor do biogás no Brasil. Este tipo de análise auxilia na formulação de políticas e na busca por pontos de alavancagem que possam impulsionar o desenvolvimento do setor.

Por favor, inicie preenchendo o formulário com seu e-mail, responda três perguntas sobre sua atuação no setor do biogás. Em sequência avalie/julgue as 20 afirmativas de acordo com a escala "Likert": (1) - Discordo Totalmente a (4) - Concordo totalmente. Marque apenas uma alternativa em todas as perguntas. A alternativa neutra pode ser uma opção (0) - Desconheço ou não tenho opinião a respeito. Informações pessoais não serão divulgadas.

Esta pesquisa faz parte do projeto de dissertação de Cosme Polese Borges. Caso surjam dúvidas, sugestões ou discussões pertinentes, por favor entrem em contato pelo e-mail: cosme.polese@hotmail.com

Insira seu e-mail:

A) Por favor assinale o seu papel/atuação no setor do biogás, caso possua mais de um assinale o mais acima

- Representante político
- Produtor de biogás
- Possível produtor de biogás
- Investidor interessado na área
- Representante de instituições de classe
- Fornecedor de equipamentos e serviços
- Consultor especializado
- Acadêmico pós-graduando
- Graduando ou em curso técnico

B) Qual região do país você atua? Pode assinalar mais de uma caixa.

- Norte
- Nordeste
- Centro-oeste
- Sudeste
- Sul
- Todo o Brasil

C) Se você é um produtor ou responsável por uma produção ou até mesmo um provável produtor de biogás nos próximos anos, por favor assinale em qual tipo de substrato sua produção faz/faria parte.

- Não sou e não serei produtor de biogás
- Pecuária (Resíduos de animais)
- Agroindústria (Cana-de-açúcar)
- Agroindústria (Processamento de alimentos e bebidas)
- Resíduos Sólidos Urbanos (Apenas aterros sanitários)
- Estações de tratamento de Efluentes (ETEs)
- Codigestão (Utiliza combinação de resíduos)

1) Agora iniciando as perguntas, por favor responda todas de acordo com a região que você selecionou que atua. Nesta região, percebo hoje que estão surgindo novas unidades de produção de biogás.

- 0 - Desconheço ou não tenho opinião a respeito
- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Concordo parcialmente
- 4 - Concordo totalmente

A partir daqui as questões possuem o mesmo padrão de respostas, escala likert de 0 a 4. 2) Estão surgindo novas empresas prestadoras de serviços e produtoras de

equipamentos relacionados ao biogás. Elas providenciam por exemplo: mão de obra, manutenção e estudos de viabilidade econômica.

3) Percebo um interesse por parte de instituições e produtores pelo desenvolvimento de novos conhecimentos na cadeia do biogás (por exemplo: novos protótipos, testes de performance de modelos, desenvolvimento de tecnologias complementares, estudos de impacto ambiental).

4) As instituições e os produtores no setor do biogás são reconhecidos pela capacidade de absorver e também adaptar tecnologias e conhecimentos transferidos de outros países.

5) Conheço estudos técnicos que buscam identificar as cadeias de resíduos orgânicos em cidades e regiões com potencial de produção de biogás.

6) Percebo universidades e instituições com cursos de capacitação/disciplinas que elaboram o tema do biogás.

7) Conheço seminários, conferências e campanhas de sensibilização que abordam sobre o biogás no país.

8) Estou ciente de metas e objetivos (tecnológicos ou regulatórios) que definem como explorar e difundir o biogás no país.

9) Conheço políticas públicas que promovem setores específicos a fazer melhor uso de seus resíduos orgânicos, por exemplo para produzir biogás.

10) Existem subsídios para auxiliar produtores de biogás remunerar seus investimentos. (subsídios por exemplo: redução de impostos, governo arcando com parte do investimento, distribuidoras oferecendo preços atrativos pelo biogás).

11) Percebo o surgimento de um mercado para biofertilizantes (subproduto do processo de biodigestão).

12) A nova lei de Biocombustíveis (RenovaBio) deverá criar um tipo de mercado de créditos de carbono. Isso irá incentivar a produção de biogás de forma uniforme para nos diversos modelos de negócio (por exemplo, criação de animais, saneamento, indústrias de bebidas e alimentos).

13) Percebo o surgimento de linhas de financiamento de fácil acesso para projetos de produção de biogás, com taxas de juros mais atrativas que as praticáveis no mercado.

14) Percebo o interesse de países mais desenvolvidos em colaborar com os projetos locais de biogás no Brasil. Por exemplo, com parcerias público-privadas.

15) Percebo os estados federativos com leis específicas sobre biogás. Estas leis possuem mecanismos efetivos para promoção do biogás (por exemplo, regulamentam a distribuição de biogás por gasodutos, incluem obrigações de injetar gás renovável nas redes de gás natural).

16) Percebo grupos organizados buscando influenciar nas decisões do poder público a favor do biogás.

17) Noto que cresce a percepção da população em geral com relação a necessidade de incentivar o biogás no Brasil para incentivar o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) promovidos pela ONU.

18) Acredito que nos próximos anos o governo irá instaurar uma Política Nacional do Biogás e Biometano (PNBB).

19) Com o crescimento da produção nacional de Gás Natural, e as perspectivas de abertura do mercado com o programa "Novo Mercado de Gás" é esperado que também seja incentivado o desenvolvimento do mercado de biogás no país.

20) Na sua opinião, em 2030 qual será a produção de biogás do país? Hoje a produção está próxima a 3 milhões de m³ por dia.

- 4 - 10 milhões de m³ por dia
- 10 - 15 milhões de m³ por dia
- 15 - 20 milhões de m³ por dia
- 20 - 25 milhões de m³ por dia
- Mais que 25 milhões de m³ por dia

Agora por favor, se puder deixe comentários/perguntas para aprimorar o questionário utilizado:

APÊNDICE C – TABELA DE CORRELAÇÕES

	VAR05	VAR06	VAR07	VAR08	VAR09	VAR10	VAR11	VAR12	VAR13	VAR14	VAR15	VAR16	VAR17	VAR18	VAR19	VAR20	VAR21	VAR22	VAR23	VAR24
VAR05	1,000	0,540	0,382	0,208	0,240	0,189	0,138	0,250	0,135	0,287	0,224	0,117	0,346	0,145	0,266	0,168	0,186	0,195	0,209	0,195
VAR06		1,000	0,484	0,188	0,198	0,022	0,134	0,264	0,236	0,177	0,271	0,234	0,191	0,339	0,161	0,334	0,184	0,287	0,212	0,185
VAR07			1,000	0,357	0,312	0,121	0,044	0,137	0,105	0,070	0,188	0,116	0,192	0,320	0,252	0,286	0,200	0,195	0,187	0,198
VAR08				1,000	0,115	0,006	0,118	0,092	0,099	0,151	0,207	0,025	0,187	0,146	0,184	0,203	0,248	0,104	0,308	-0,048
VAR09					1,000	0,425	0,205	0,402	0,324	0,115	-0,012	-0,001	0,111	0,229	0,339	0,113	-0,089	0,111	0,171	0,156
VAR10						1,000	0,464	0,472	0,423	0,260	0,179	0,094	0,177	0,247	0,435	0,273	0,104	0,152	0,362	0,100
VAR11							1,000	0,555	0,327	0,185	0,151	0,131	0,184	0,279	0,436	0,476	0,247	0,145	0,157	-0,031
VAR12								1,000	0,657	0,302	0,089	0,111	0,153	0,247	0,393	0,380	0,097	0,250	0,185	0,088
VAR13									1,000	0,231	0,076	0,161	0,229	0,245	0,408	0,274	0,159	0,235	0,263	0,141
VAR14										1,000	0,212	0,296	0,324	0,182	0,096	0,133	0,198	0,236	0,099	0,046
VAR15											1,000	0,292	0,323	0,219	0,119	0,108	0,210	0,272	0,260	0,001
VAR16												1,000	0,247	0,268	0,062	0,234	0,415	0,423	0,370	0,071
VAR17													1,000	0,303	0,290	0,120	0,350	0,309	0,388	0,189
VAR18														1,000	0,358	0,261	0,289	0,211	0,251	0,301
VAR19															1,000	0,446	0,301	0,191	0,255	0,159
VAR20																1,000	0,271	0,309	0,296	0,026
VAR21																	1,000	0,273	0,368	0,006
VAR22																		1,000	0,530	0,173
VAR23																			1,000	0,127
VAR24																				1,000





APÊNDICE D – RESULTADO DA ANÁLISE FATORIAL

Funções de um Sistema de Inovação e Atividades relacionadas a cada função. Tabela fonte: Tigabu et. al. 2015		Função do SI associada - Questão correspondente - Variável - Descrição da afirmativa	Componente					
			Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
F1	Fabricação e/ou instalação de tecnologia	F4 - Q8 - Estou ciente de metas e objetivos (tecnológicos ou regulatórios) que definem como explorar e difundir o biogás no país	0,814	0,045	0,112	-0,138	0,184	-0,016
	Entrada de firmas ou empresas	F3 - Q7 - Conheço seminários, conferências e campanhas de sensibilização que abordam sobre o biogás no país	0,736	0,192	0,047	0,092	-0,016	-0,254
F2	Realização de pesquisas de mercado/viabilidade	F3 - Q6 - Percebo universidades e instituições com cursos de capacitação/disciplinas que elaboram o tema do biogás.	0,723	0,041	-0,159	0,140	0,212	0,210
	Desenvolvimento de materiais de promoção	F4 - Q9 - Conheço políticas públicas que promovem setores específicos a fazer melhor uso de seus resíduos orgânicos, por exemplo para produzir biogás.	0,690	0,139	0,068	-0,082	0,156	0,152
	Desenvolvimento de novos protótipos	F7 - Q15 - Percebo os estados federativos com leis específicas sobre biogás. Estas leis possuem mecanismos efetivos para promoção do biogás.	0,631	0,154	0,099	0,376	-0,132	0,184
	Testes de performance de modelos	F2 - Q5 - Conheço estudos técnicos que buscam identificar as cadeias de resíduos orgânicos em cidades e regiões com potencial de produção de biogás.	0,516	-0,261	0,195	0,141	0,114	0,430
	Desenvolvimento de tecnologias complementares	F7 - Q16 - Percebo grupos organizados buscando influenciar nas decisões do poder público a favor do biogás.	0,511	0,410	0,375	0,110	-0,281	-0,227
	Acesso a tendências de combustíveis	F5 - Q12 - A nova lei de Biocombustíveis (RenovaBio) deverá criar um tipo de mercado de créditos de carbono. Isso irá incentivar a produção de biogás de forma uniforme para nos diversos modelos de negócio.	0,027	0,758	0,105	-0,160	0,216	-0,008
	Acesso das tendências da biomassa	F7 - Q18 - Acredito que nos próximos anos o governo irá instaurar uma Política Nacional do Biogás e Biometano (PNBB).	0,144	0,656	0,145	-0,037	0,172	0,193
F3	Acesso de matérias primas para tecnologia	F7 - Q17 - Noto que cresce a percepção da população em geral com relação a necessidade de incentivar o biogás no Brasil para incentivar o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).	0,096	0,640	0,057	0,363	0,038	-0,123
	Conduzir estudos de impacto	F5 - Q19 - Com o crescimento da produção nacional de Gás Natural, e as perspectivas de abertura do mercado com o programa "Novo Mercado de Gás" é esperado que também seja incentivado o desenvolvimento do mercado de biogás no país.	0,201	0,580	-0,058	0,393	0,118	0,267
F4	Treinamentos para técnicos e usuários	F1 - Q2 - Estão surgindo novas empresas prestadoras de serviços e produtoras de equipamentos relacionados ao biogás.	0,097	0,221	0,842	-0,027	0,140	0,073
	Condução de campanhas de sensibilização	F2 - Q3 - Percebo um interesse por parte de instituições e produtores pelo desenvolvimento de novos conhecimentos na cadeia do biogás.	0,061	0,062	0,682	-0,393	-0,045	0,237
	Organização de eventos, seminários e conferências	F1 - Q1 - Percebo hoje que estão surgindo novas unidades de produção de biogás.	0,129	-0,006	0,599	0,188	0,452	0,148
F5	Demonstrações e exibições da tecnologia	F2 - Q4 - As instituições e os produtores no setor do biogás são reconhecidos pela capacidade de absorver e também adaptar tecnologias e conhecimentos transferidos de outros países.	0,040	0,042	0,253	0,748	0,104	-0,148
	Definição de metas	F5 - Q10 - Existem subsídios para auxiliar produtores de biogás remunerar seus investimentos.	0,242	0,171	0,120	-0,088	0,724	-0,100
	Desenvolvimento de regulações e políticas	F1 - Q20 - Na sua opinião, em 2030 qual será a produção de biogás do país?	0,027	0,134	0,184	-0,139	-0,047	0,774
	Definir expectativas	F6 - Q14 - Percebo o interesse de países mais desenvolvidos em colaborar com os projetos locais de biogás no Brasil. Por exemplo, com parcerias público-privadas.	0,287	0,378	0,257	0,142	-0,060	0,367
F6	Procedimentos regulatórios	F6 - Q13 - Percebo o surgimento de linhas de financiamento de fácil acesso para projetos de produção de biogás, com taxas de juros mais atrativas que as praticáveis no mercado.	0,112	0,361	-0,011	0,364	0,488	0,290
	Publicar resultados de pesquisas	F5 - Q11 - Percebo o surgimento de um mercado para biofertilizantes (subproduto do processo de biodigestão).	-0,004	0,343	0,139	0,262	0,465	-0,066
	Subsídios (dividindo os custos de investimento)							
F7	Padronizações							
	Incentivos em forma de redução de impostos							
F6	Reforma de regulamentações							
	Procurações públicas							
F6	Provedor de incentivos financeiros (financiamento)							
	Provedor de empréstimos (crédito)							
F6	Mobilizar recursos humanos, consultores e técnicos							
	Provedor de melhores equipamentos							
F7	Conduzir atividades de lóbi							





<p>Matriz de componente rotativa* Método de Extração: análise de Componente Principal. Método de Rotação: Varimax com Normalização de Kaiser. a. Rotação convergida em 9 iterações.</p>	<p>Fator 1 - Reconhecimento da existência de um SI por parte dos atores. Fator 2 - Legitimidade formal e informal complementar do biogás e subprodutos. Fator 3 - Expectativas entre as atividades empreendedoras de produtores e fornecedores.</p>	<p>Fator 4 - Características transformadoras estruturais de evolução do SI no longo prazo. Fator 5 - Construção de incentivos e políticas para formação de mercado em curto e médio prazo Fator 6 - Perspectivas futuras positivas do marco institucional.</p>
---	---	--

APÊNDICE E – EQUAÇÕES DO MODELO DESENVOLVIDO


Setor da Atratividade Percebida

- $Adotantes_Insatisfeitos[Tech_Routes](t) = Adotantes_Insatisfeitos[Tech_Routes](t - dt) + (Taxa_de_adotantes_insatisfeitos[Tech_Routes]) * dt$
 INIT $Adotantes_Insatisfeitos[Tech_Routes] = 1$
 INFLOWS:
- ↳ $Taxa_de_adotantes_insatisfeitos[Tech_Routes] = Taxa_de_sucateamento[Tech_Routes]*Desativada_por_mau_funcionamento$
- $Atratividade_percebida[1](t) = Atratividade_percebida[1](t - dt) + (Incremento_de_Atratividade[1]) * dt$
 INIT $Atratividade_percebida[1] = 0.1$
- $Atratividade_percebida[2](t) = Atratividade_percebida[2](t - dt) + (Incremento_de_Atratividade[2]) * dt$
 INIT $Atratividade_percebida[2] = 0.1$
- $Atratividade_percebida[3](t) = Atratividade_percebida[3](t - dt) + (Incremento_de_Atratividade[3]) * dt$
 INIT $Atratividade_percebida[3] = 0.1$
- $Atratividade_percebida[4](t) = Atratividade_percebida[4](t - dt) + (Incremento_de_Atratividade[4]) * dt$
 INIT $Atratividade_percebida[4] = 0.1$
 INFLOWS:
- ↳ $Incremento_de_Atratividade[Tech_Routes] = (Atratividade_real[Tech_Routes]-Atratividade_percebida[Tech_Routes])/Tempo_para_perceber[Tech_Routes]$
- $Ano_inicial_do_PNBB = 2050$
- $Atratividade_devido_ao_PNBB = 0+ramp(Incremento_de_legitimidade_devido_ao_PNBB,Ano_inicial_do_PNBB)$
- $Atratividade_real[Tech_Routes] = (1+Atratividade_devido_ao_PNBB+Efeito_do_Preco[Tech_Routes]+Atratividade_devido_a_capacidade+Fracao_de_insatisfeitos[Tech_Routes])/4$
- $Tempo_para_perceber[1] = 4$
- $Tempo_para_perceber[2] = 6$
- $Tempo_para_perceber[3] = 4$
- $Tempo_para_perceber[4] = 5$
- $Atratividade_devido_a_capacidade = GRAPH(Producao_diaria_equivalente_de_Metano)$

 (0.00, 0.015), (2e+007, 0.11), (4e+007, 0.19), (6e+007, 0.27), (8e+007, 0.355), (1e+008, 0.455), (1.2e+008, 0.56), (1.4e+008, 0.655), (1.6e+008, 0.76), (1.8e+008, 0.875), (2e+008, 0.99)
- $Desativada_por_mau_funcionamento = GRAPH(time)$

 (2010, 0.0987), (2014, 0.0878), (2018, 0.0806), (2022, 0.0672), (2026, 0.0559), (2030, 0.0487), (2034, 0.042), (2038, 0.0302), (2042, 0.0239), (2046, 0.0181), (2050, 0.0118)
- $Fracao_de_insatisfeitos[Tech_Routes] = GRAPH(Adotantes_Insatisfeitos[Tech_Routes]/Abandono[Tech_Routes])$

 (0.00, 0.00), (0.1, 0.08), (0.2, 0.155), (0.3, 0.25), (0.4, 0.34), (0.5, 0.45), (0.6, 0.565), (0.7, 0.68), (0.8, 0.79), (0.9, 0.9), (1, 1.00)
- $Incremento_de_legitimidade_devido_ao_PNBB = GRAPH(TIME)$

 (2025, 0.0015), (2028, 0.046), (2030, 0.074), (2033, 0.091), (2035, 0.1), (2038, 0.1), (2040, 0.1), (2043, 0.1), (2045, 0.1), (2048, 0.1), (2050, 0.1)

Setor da Criação de Animais

- $Unidades_de_gado(t) = Unidades_de_gado(t - dt) + (Fluxo_de_gado) * dt$
 INIT Unidades_de_gado = 209000000
 INFLOWS:
 ✎ Fluxo_de_gado = Unidades_de_gado*Taxa_de_crescimento_gado
- $Unidades_de_galinhas(t) = Unidades_de_galinhas(t - dt) + (Fluxo_de_galinhas) * dt$
 INIT Unidades_de_galinhas = 210000000
 INFLOWS:
 ✎ Fluxo_de_galinhas = Unidades_de_galinhas*Taxa_de_crescimento_galinhas
- $Unidades_de_suínos(t) = Unidades_de_suínos(t - dt) + (Fluxo_de_suínos) * dt$
 INIT Unidades_de_suínos = 39000000
 INFLOWS:
 ✎ Fluxo_de_suínos = Unidades_de_suínos*Taxa_crescimento_suínos
- Metano_por_kg_gado = 14/1000
- Metano_por_kg_galinhas = 27/1000
- Metano_por_kg_suínos = 24/1000
- Potencial_de_metano_gado =
 Unidades_de_gado*Resíduos_por_dia_gado*Metano_por_kg_gado
- Potencial_de_metano_galinhas =
 Unidades_de_galinhas*Resíduos_por_dia_galinhas*Metano_por_kg_galinhas
- Potencial_de_metano_animais =
 (Potencial_de_metano_gado*Gado_confinado+Potencial_de_metano_Suínos+Potencial_de_metano_galinhas)
- Potencial_de_metano_Suínos =
 Unidades_de_suínos*Resíduos_por_dia_suínos*Metano_por_kg_suínos
- Resíduos_por_dia_gado = 10
- Resíduos_por_dia_galinhas = 0.18
- Resíduos_por_dia_suínos = 2.25
- Gado_confinado = GRAPH(TIME)

 (2010, 0.1), (2014, 0.135), (2018, 0.175), (2022, 0.205), (2026, 0.25), (2030, 0.285), (2034, 0.325), (2038, 0.36), (2042, 0.4), (2046, 0.445), (2050, 0.49)
- Taxa_crescimento_suínos = GRAPH(TIME)

 (2010, 0.015), (2014, 0.0142), (2018, 0.0133), (2022, 0.0126), (2026, 0.026), (2030, 0.026), (2034, 0.026), (2038, 0.026), (2042, 0.0253), (2046, 0.0246), (2050, 0.023)
- Taxa_de_crescimento_gado = GRAPH(TIME)

 (2010, 0.015), (2014, 0.0138), (2018, 0.0124), (2022, 0.001), (2026, -0.0025), (2030, -0.00162), (2034, 0.00888), (2038, 0.00818), (2042, 0.0073), (2046, 0.00608), (2050, 0.00468)
- Taxa_de_crescimento_galinhas = GRAPH(TIME)

 (2010, 0.0196), (2014, 0.0198), (2018, 0.0194), (2022, 0.0192), (2026, 0.0178), (2030, 0.0152), (2034, 0.0108), (2038, 0.0062), (2042, 0.0026), (2046, 0.001), (2050, 0.00)

Setor da Vinhaca e Torta

- $Massa_de_cana_de_acucar(t) = Massa_de_cana_de_acucar(t - dt) + (Fluxo_de_cana) * dt$
 INIT Massa_de_cana_de_acucar = 601000000
 INFLOWS:
 ✎ Fluxo_de_cana = Taxa_de_cana*Massa_de_cana_de_acucar
- DQO_Vinhaca = 35.5
- DQO_rem = Total_DQO*Eficiencia_da_remocao_Efv
- Eficiencia_da_coleta_Ecv = 0.9
- Eficiencia_da_remocao_Efv = 0.72
- Fator_especifico_Fv = 0.33
- Potencial_de_metano_vinhaca_e_torta =
 (DQO_rem*Eficiencia_da_coleta_Ecv*Fator_especifico_Fv/365)+(DQO_rem*Eficiencia_da_coleta_Ecv*Fator_especifico_Fv/365)*0.4
- Produção_de_vinhaca_por_kg_de_cana = 0.156
- Total_DQO = DQO_Vinhaca*Volume_de_vinhaca
- Volume_de_vinhaca = Massa_de_cana_de_acucar*Produção_de_vinhaca_por_kg_de_cana
- Taxa_de_cana = GRAPH(TIME)

 (2010, 0.01), (2014, -0.01), (2018, 0.033), (2022, 0.0308), (2026, 0.0266), (2030, 0.0198), (2034, 0.0125), (2038, 0.00732), (2042, 0.00474), (2046, 0.00239), (2050, 0.00192)

Setor de Plantas em Operacao

- $Abandono[Tech_Routes](t) = Abandono[Tech_Routes](t - dt) + (Taxa_de_sucateamento[Tech_Routes]) * dt$
 INIT Abandono[Tech_Routes] = 1
 INFLOWS:
 - Taxa_de_sucateamento[Tech_Routes] = $Plantas_Operando[Tech_Routes]/Tempo_de_vida_util[Tech_Routes]$
- $Adotantes[1](t) = Adotantes[1](t - dt) + (Taxa_de_Adocao[1] + Taxa_de_reforma[1] - Taxa_de_plantas_em_operacao[1]) * dt$
 INIT Adotantes[1] = 10
- $Adotantes[2](t) = Adotantes[2](t - dt) + (Taxa_de_Adocao[2] + Taxa_de_reforma[2] - Taxa_de_plantas_em_operacao[2]) * dt$
 INIT Adotantes[2] = 50
- $Adotantes[3](t) = Adotantes[3](t - dt) + (Taxa_de_Adocao[3] + Taxa_de_reforma[3] - Taxa_de_plantas_em_operacao[3]) * dt$
 INIT Adotantes[3] = 20
- $Adotantes[4](t) = Adotantes[4](t - dt) + (Taxa_de_Adocao[4] + Taxa_de_reforma[4] - Taxa_de_plantas_em_operacao[4]) * dt$
 INIT Adotantes[4] = 10
 INFLOWS:
 - Taxa_de_Adocao[1] = $(Adocao_por_limitacao[1] + Adocao_por_inovacao[1]) * Atratividade_percebida[1]$
 - Taxa_de_Adocao[2] = $(Adocao_por_limitacao[2] + Adocao_por_inovacao[2]) * Atratividade_percebida[2]$
 - Taxa_de_Adocao[3] = $(Adocao_por_limitacao[3] + Adocao_por_inovacao[3]) * Atratividade_percebida[3]$
 - Taxa_de_Adocao[4] = $(Adocao_por_limitacao[4] + Adocao_por_inovacao[4]) * Atratividade_percebida[4]$
 - Taxa_de_reforma[1] = $Plantas_Operando[1]/Tempo_de_reforma[1]$
 - Taxa_de_reforma[2] = $Plantas_Operando[2]/Tempo_de_reforma[2]$
 - Taxa_de_reforma[3] = $Plantas_Operando[3]/Tempo_de_reforma[3]$
 - Taxa_de_reforma[4] = $Plantas_Operando[4]/Tempo_de_reforma[4]$
- OUTFLOWS:
 - Taxa_de_plantas_em_operacao[Tech_Routes] = $Adotantes[Tech_Routes]/Tempo_de_construcao[Tech_Routes]$
- $Plantas_Operando[1](t) = Plantas_Operando[1](t - dt) + (Taxa_de_plantas_em_operacao[1] - Taxa_de_reforma[1] - Taxa_de_sucateamento[1]) * dt$
 INIT Plantas_Operando[1] = 0
- $Plantas_Operando[2](t) = Plantas_Operando[2](t - dt) + (Taxa_de_plantas_em_operacao[2] - Taxa_de_reforma[2] - Taxa_de_sucateamento[2]) * dt$
 INIT Plantas_Operando[2] = 10
- $Plantas_Operando[3](t) = Plantas_Operando[3](t - dt) + (Taxa_de_plantas_em_operacao[3] - Taxa_de_reforma[3] - Taxa_de_sucateamento[3]) * dt$
 INIT Plantas_Operando[3] = 5
- $Plantas_Operando[4](t) = Plantas_Operando[4](t - dt) + (Taxa_de_plantas_em_operacao[4] - Taxa_de_reforma[4] - Taxa_de_sucateamento[4]) * dt$
 INIT Plantas_Operando[4] = 1

INFLOWS:

$$\rightarrow \text{Taxa_de_plantas_em_operacao}[\text{Tech_Routes}] = \text{Adotantes}[\text{Tech_Routes}] / \text{Tempo_de_construcao}[\text{Tech_Routes}]$$

OUTFLOWS:

$$\rightarrow \text{Taxa_de_reforma}[1] = \text{Plantas_Operando}[1] / \text{Tempo_de_reforma}[1]$$

$$\rightarrow \text{Taxa_de_reforma}[2] = \text{Plantas_Operando}[2] / \text{Tempo_de_reforma}[2]$$

$$\rightarrow \text{Taxa_de_reforma}[3] = \text{Plantas_Operando}[3] / \text{Tempo_de_reforma}[3]$$




$$\rightarrow \text{Taxa_de_reforma}[4] = \text{Plantas_Operando}[4] / \text{Tempo_de_reforma}[4]$$

$$\rightarrow \text{Taxa_de_sucateamento}[\text{Tech_Routes}] = \text{Plantas_Operando}[\text{Tech_Routes}] / \text{Tempo_de_vida_util}[\text{Tech_Routes}]$$


- $\text{Adocao_por_imitacao}[1] = q * \text{Adotantes_Potenciais}[1] * (\text{Plantas_Operando}[1] / \text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[1])$
- $\text{Adocao_por_imitacao}[2] = q * \text{Adotantes_Potenciais}[2] * (\text{Plantas_Operando}[2] / \text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[2])$
- $\text{Adocao_por_imitacao}[3] = q * \text{Adotantes_Potenciais}[3] * (\text{Plantas_Operando}[3] / \text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[3])$
- $\text{Adocao_por_imitacao}[4] = q * \text{Adotantes_Potenciais}[4] * (\text{Plantas_Operando}[4] / \text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[4])$
- $\text{Adocao_por_inovacao}[1] = \text{Adotantes_Potenciais}[1] * p$
- $\text{Adocao_por_inovacao}[2] = \text{Adotantes_Potenciais}[2] * p$
- $\text{Adocao_por_inovacao}[3] = \text{Adotantes_Potenciais}[3] * p$
- $\text{Adocao_por_inovacao}[4] = \text{Adotantes_Potenciais}[4] * p$
- $\text{Adotantes_Potenciais}[1] = (\text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[1]) - \text{Plantas_Operando}[1] - \text{Adotantes}[1]$
- $\text{Adotantes_Potenciais}[2] = (\text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[2]) - \text{Plantas_Operando}[2] - \text{Adotantes}[2]$
- $\text{Adotantes_Potenciais}[3] = (\text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[3]) - \text{Plantas_Operando}[3] - \text{Adotantes}[3]$
- $\text{Adotantes_Potenciais}[4] = (\text{Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica}[4]) - \text{Plantas_Operando}[4] - \text{Adotantes}[4]$
- $\text{Metano_produzido_por_rota}[\text{Tech_Routes}] = \text{Plantas_Operando}[\text{Tech_Routes}] * \text{Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica}[\text{Tech_Routes}]$
- $\text{Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica}[1] = 80000 * 0.6$
- $\text{Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica}[2] = 2000 * 0.6$
- $\text{Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica}[3] = 15000 * 0.6$
- $\text{Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica}[4] = 10000 * 0.6$
- $p = (0.04 - \text{STEP}(0, 2025))$
- $\text{Producao_diaria_equivalente_de_Metano} = \text{arraysum}(\text{Metano_produzido_por_rota}[*])$
- $q = 0.10 - \text{STEP}(0, 2025)$

- $Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica[1] = (Potencial_de_metano_animais*(0)+Potencial_de_metano_resíduos*(1)+Potencial_de_metano_efluentes*(0)+Potencial_de_metano_vinhaca_e_torta*(0))/Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica[1]$
- $Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica[2] = (Potencial_de_metano_animais*(1)+Potencial_de_metano_resíduos*(0)+Potencial_de_metano_efluentes*(0)+Potencial_de_metano_vinhaca_e_torta*(0))/Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica[2]$
- $Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica[3] = (Potencial_de_metano_animais*(0)+Potencial_de_metano_resíduos*(0)+Potencial_de_metano_efluentes*(0)+Potencial_de_metano_vinhaca_e_torta*(1))/Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica[3]$
- $Tamanho_do_mercado_por_rota_tecnologica[4] = (Potencial_de_metano_animais*(0)+Potencial_de_metano_resíduos*(0)+Potencial_de_metano_efluentes*(1)+Potencial_de_metano_vinhaca_e_torta*(0))/Média_de_producao_de_metano_por_planta_de_cada_rota_tecnologica[4]$
- $Tempo_de_reforma[1] = 100$
- $Tempo_de_reforma[2] = 20$
- $Tempo_de_reforma[3] = 20$
- $Tempo_de_reforma[4] = 20$
- $Tempo_de_construcao[1] = 10$
- $Tempo_de_construcao[2] = 2$
- $Tempo_de_construcao[3] = 4$
- $Tempo_de_construcao[4] = 5$
- $Tempo_de_vida_util[1] = 100$
- $Tempo_de_vida_util[2] = 30$
- $Tempo_de_vida_util[3] = 80$
- $Tempo_de_vida_util[4] = 50$


Setor de Resíduos Sólidos Urbanos

- $Populacao(t) = Populacao(t - dt) + (Natalidade) * dt$
INIT Populacao = 196800000
INFLOWS:
- $Natalidade = Populacao * Taxa_crescimento_populacao / 100$
- Eficiencia_da_coleta = 0.88
- Metano_por_kg = 170/1000
- Potencial_de_metano_residuos =
(Populacao * Fracao_organica * Metano_por_kg * Producao_de_residuo_por_habitante * Eficiencia_da_coleta)
- Fracao_organica = GRAPH(TIME)
 (2010, 0.58), (2014, 0.57), (2018, 0.559), (2022, 0.548), (2026, 0.52), (2030, 0.492), (2034, 0.469), (2038, 0.455), (2042, 0.435), (2046, 0.42), (2050, 0.403)
- Producao_de_residuo_por_habitante = GRAPH(TIME)
 (2010, 1.04), (2014, 1.06), (2018, 1.09), (2022, 1.11), (2026, 1.15), (2030, 1.17), (2034, 1.21), (2038, 1.26), (2042, 1.31), (2046, 1.35), (2050, 1.40)
- Taxa_crescimento_populacao = GRAPH(TIME)
 (2010, 0.994), (2014, 0.892), (2018, 0.766), (2022, 0.64), (2026, 0.52), (2030, 0.406), (2034, 0.298), (2038, 0.202), (2042, 0.094), (2046, 0.01), (2050, -0.074)

Setor de Tratamento de Efluentes

- C_concentracao = 1
- Fluxo_Efluente =
Populacao * Media_de_efluente_por_dia_por_pessoa * Fracao_da_populacao_atendida
- Ft_correcao_volumetrica_da_temperatura = 2.615
- li_indice_de_perda_de_gas = 0.4
- Media_de_efluente_por_dia_por_pessoa = 0.15
- Potencial_de_metano_efluentes =
(Fluxo_Efluente * (So_concentracao_de_DQO_do_efluente * (1 - Y_producao_de_material_solido) - S_concentracao_max_de_DQO_do_efluente) * (1 - li_indice_de_perda_de_gas)) / (Ft_correcao_volumetrica_da_temperatura * C_concentracao)
- S_concentracao_max_de_DQO_do_efluente = 0.251
- So_concentracao_de_DQO_do_efluente = 0.715
- Y_producao_de_material_solido = 0.17
- Fracao_da_populacao_atendida = GRAPH(TIME)
 (2010, 0.405), (2014, 0.445), (2018, 0.485), (2022, 0.535), (2026, 0.58), (2030, 0.61), (2034, 0.655), (2038, 0.7), (2042, 0.74), (2046, 0.805), (2050, 0.89)

Setor do Efeito de Aprendizado

- Ano_para_inicio_dos_incentivos = 2020
- Efeito_do_aprendizado_no_preco[Tech_Routes] =
((Plantas_Operando[Tech_Routes] + Adotantes[Tech_Routes]) / Experiencia_Inicial) ^ Indice_de_aprendizado
- Experiencia_Inicial = 10
- Incentivo[1] = 0
- Incentivo[2] = 0
- Incentivo[3] = 0
- Incentivo[4] = 0
- Indice_de_aprendizado = -0.12
- Preco[Tech_Routes] =
Preco_Inicial[Tech_Routes] * Efeito_do_aprendizado_no_preco[Tech_Routes] + STEP(-Incentivo[Tech_Routes], Ano_para_inicio_dos_incentivos)
- Preco_Inicial[1] = 460
- Preco_Inicial[2] = 690
- Preco_Inicial[3] = 450
- Preco_Inicial[4] = 500
- Efeito_do_preco[Tech_Routes] = GRAPH(Preco[Tech_Routes])
 (200, 1.00), (250, 0.975), (300, 0.905), (350, 0.825), (400, 0.705), (450, 0.43), (500, 0.21), (550, 0.1), (600, 0.05), (650, 0.025), (700, 0.005)

APÊNDICE F – PEDIDO DE DIVULGAÇÃO PARA ABIOGÁS



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA



Florianópolis, 5 de Fevereiro de 2020

Sr. Alessandro Sanches
Diretor Executivo da Associação Brasileira do Biogás

Prezado Sr. Sanches,

Em nome do Grupo de Sustentabilidade e Inovação em Energias Renováveis (SINERGIA) da Universidade Federal de Santa Catarina, solicito gentilmente o seu apoio para a divulgação do questionário *online* disponível em <https://forms.gle/JupgLYjzfVAXajPz9> sob responsabilidade do meu orientando de mestrado, Cosme Polese Borges.

A pesquisa do mestrando Cosme é de vital importância para definirmos as principais barreiras para a difusão do biogás no Brasil bem como os mecanismos que podem ser utilizados para acelerar essa difusão. Estamos trabalhando neste objetivo junto a parceiros de outras instituições nacionais e internacionais e o nosso propósito é construirmos também uma parceria com a sua Instituição de forma a compartilharmos com a ABiogás os nossos resultados à medida que eles forem obtidos.

Agradeço a atenção e fico a disposição para futuras comunicações pelo email: m.uriona@ufsc.br.

Atenciosamente,

Prof. Mauricio Uriona Maldonado
Grupo de Pesquisa de Sustentabilidade e Inovação em Energias Renováveis - Sinergia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Catarina



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA



Florianópolis, 5 de Fevereiro de 2020

Sr. Alessandro Sanches
Diretor Executivo da Associação Brasileira do Biogás

Prezado Sr. Sanches,

Solicito aprovação, por meio de conselho administrativo, para divulgar questionário de pesquisa nomeado “Consulta sobre o Sistema de Inovação do Biogás no Brasil” para os associados e integrantes da ABiogás. O formulário pode ser acessado pelo link (<https://forms.gle/JupgLYjzfVAXajPz9>) ou verificado em anexo. O formulário foi previamente validado com especialistas, aberto para coleta de respostas em 06/01/2020 e conta com a previsão de fechamento em 06/03/2020. Atualmente estão registradas 89 respostas, sendo:

Area de Atuação	Qtd.
Provedores de tecnologia e serviços	29
Consultor especializado	21
Produtores e possíveis produtores	14
Acadêmicos	11
Instituições de classe	8
Distribuidora de energia	6

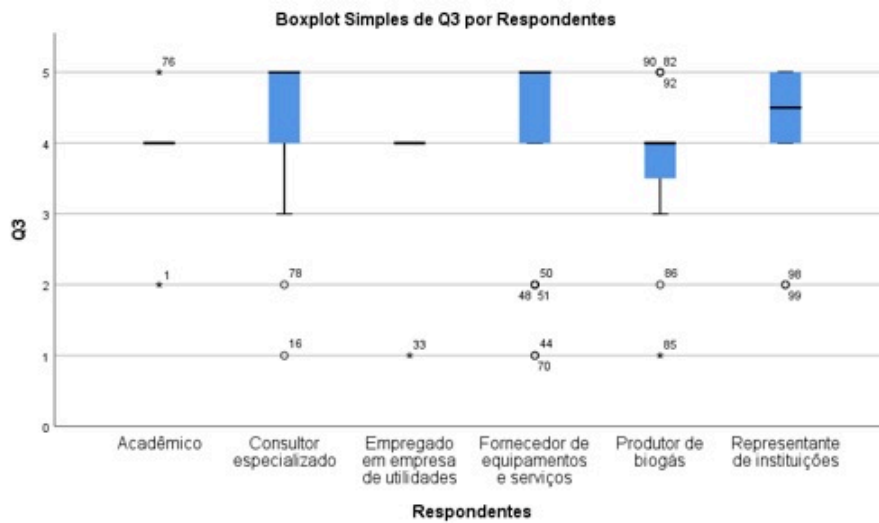
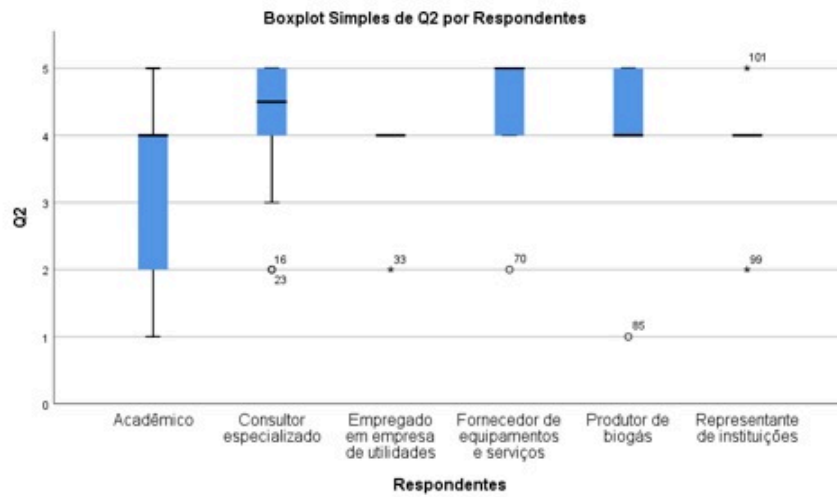
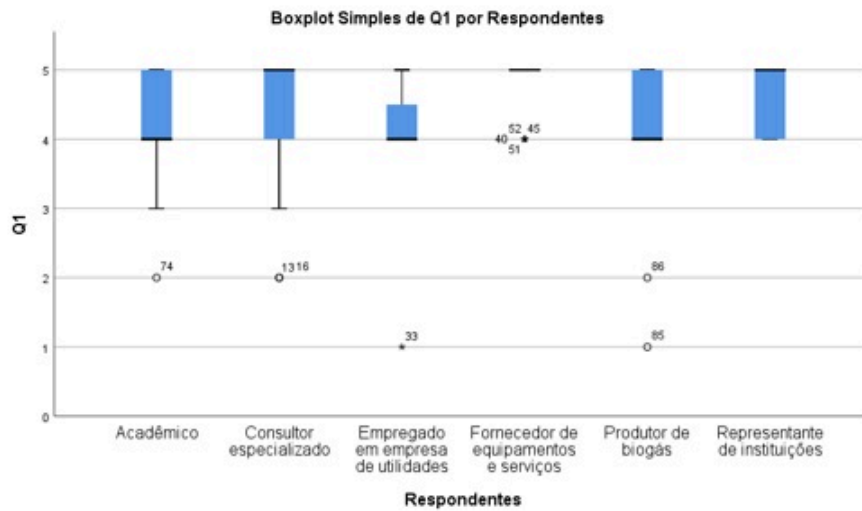
Os dados serão utilizados para realizar uma análise funcional do sistema de inovação embasada na percepção dos atores do sistema. Na literatura acadêmica estes sistemas executam sete funções principais, as quais estão ocultas nas perguntas do questionário. A tabela abaixo apresenta a correlação entre as perguntas e as funções.

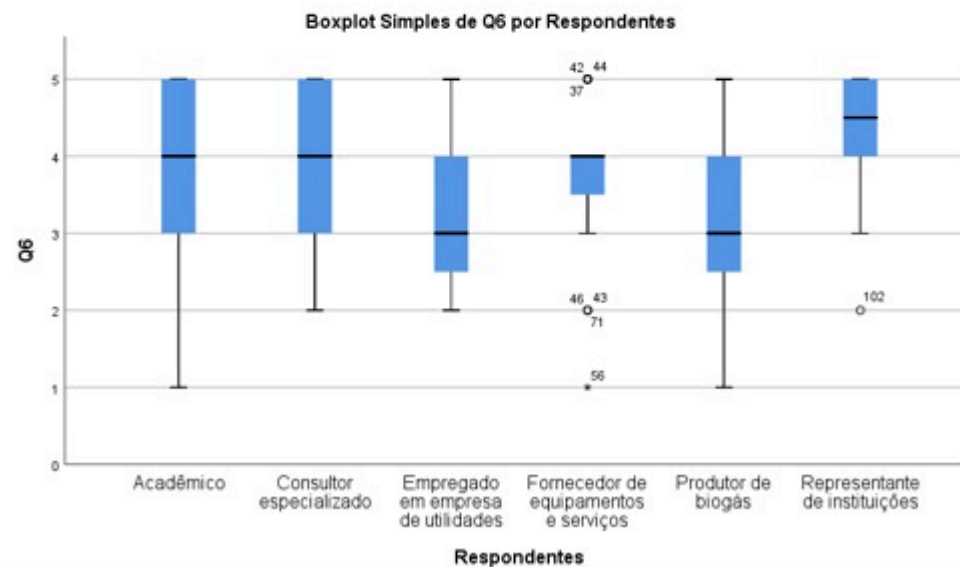
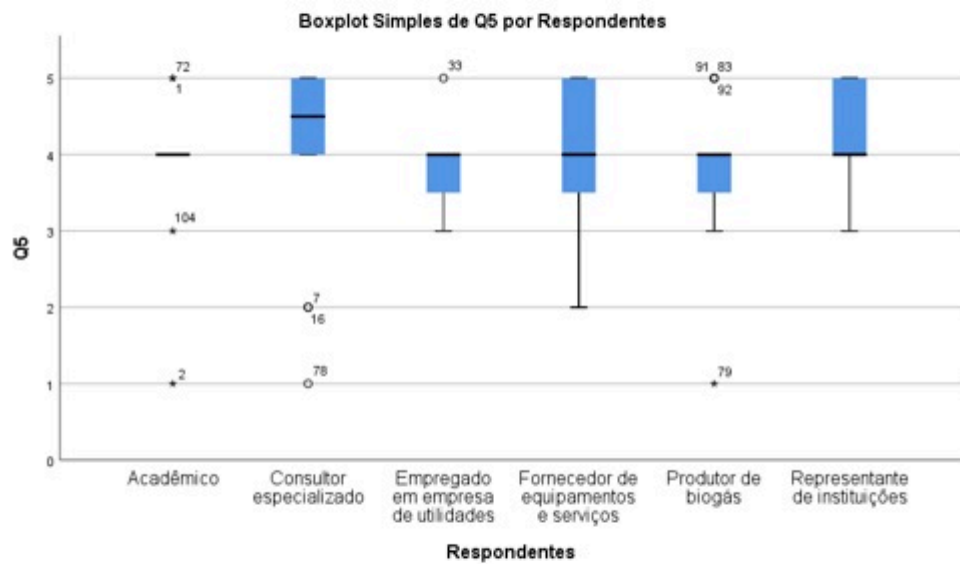
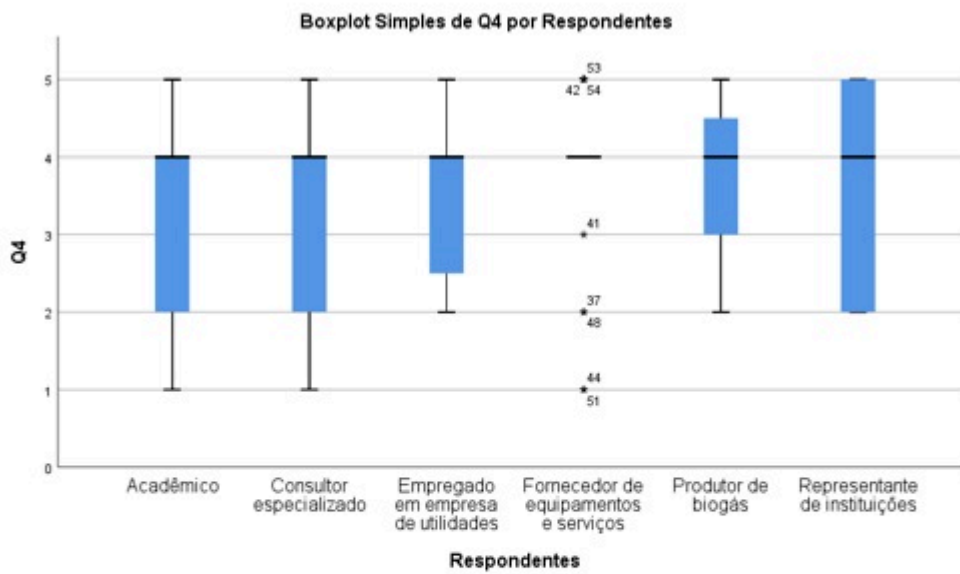
Função do Sistema de inovação	Questões
F1 – Atividades empreendedoras	1, 2, 20
F2 – Desenvolvimento e absorção de conhecimento	3, 4, 5
F3 – Difusão de conhecimento através de redes	6, 7
F4 – Orientação de pesquisa	8, 9
F5 – Formação de mercado	10, 11, 12, 19
F6 – Mobilização de recursos nacionais e internacionais	13, 14
F7 – Legitimidade formal e informal	15, 16, 17, 18

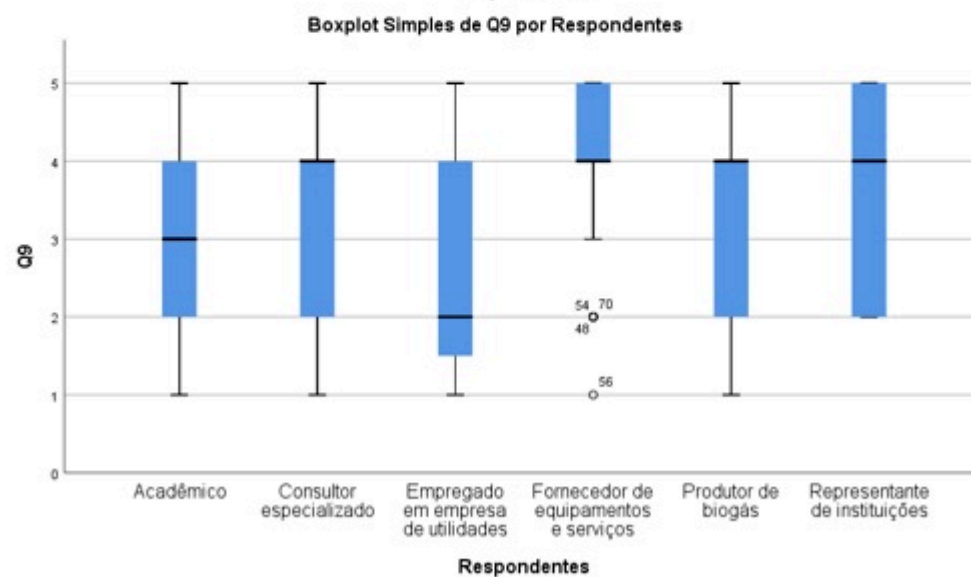
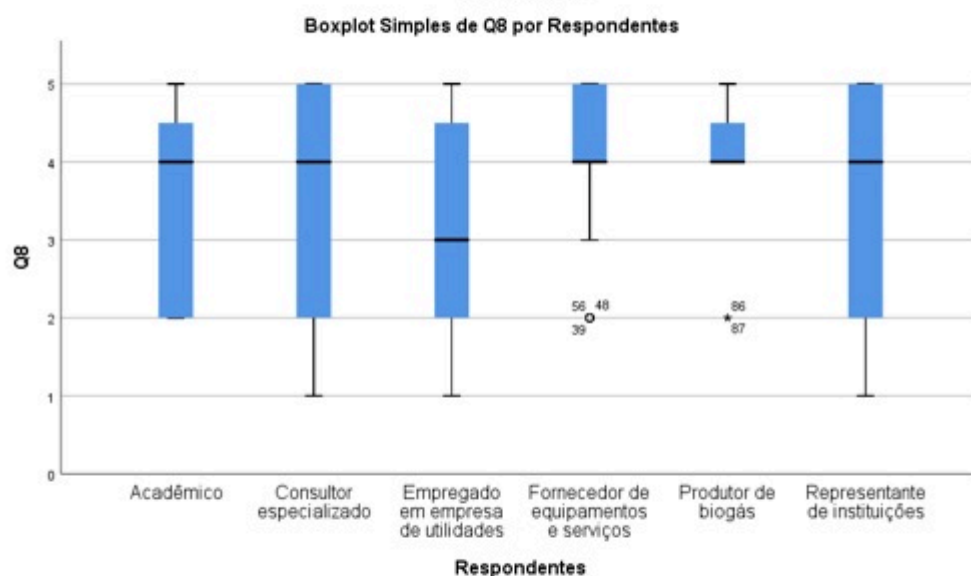
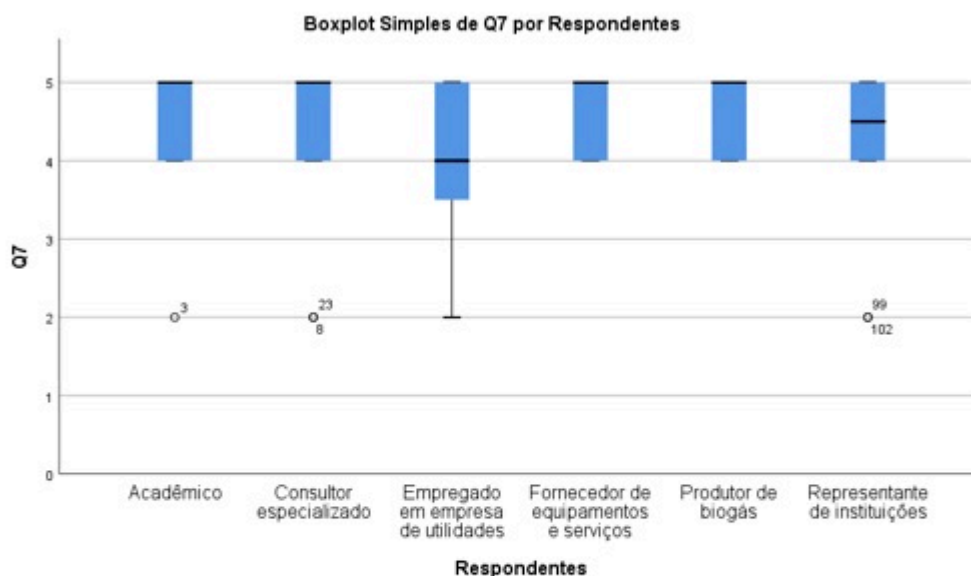
Antecipo meus agradecimentos,

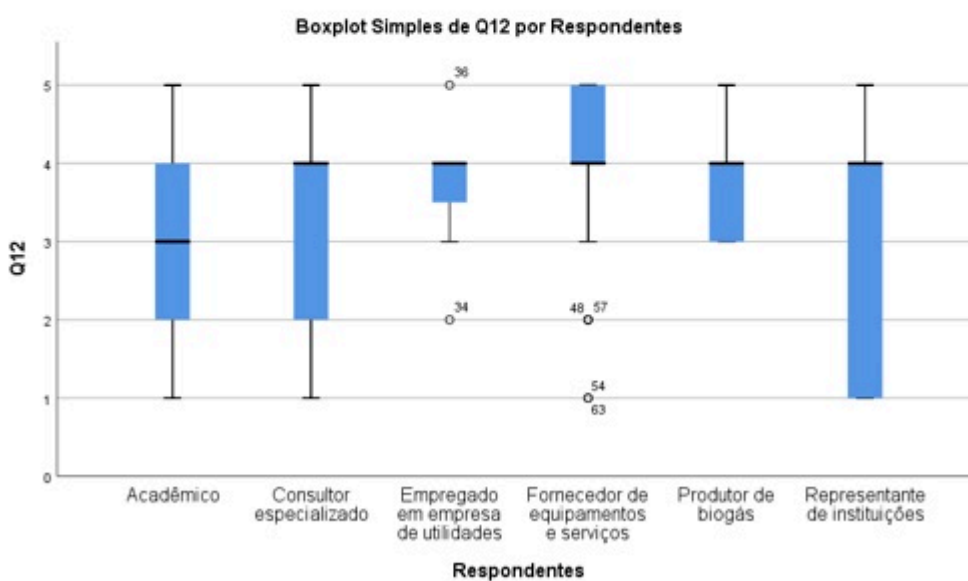
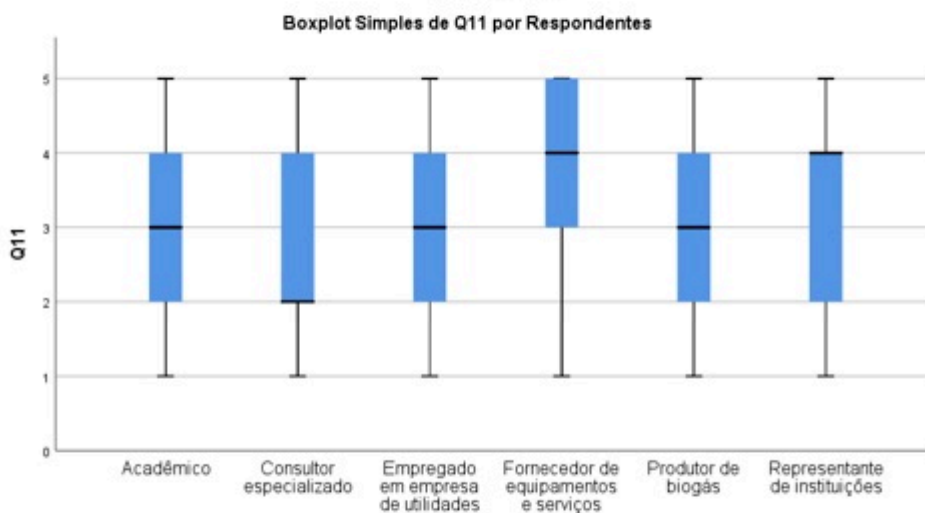
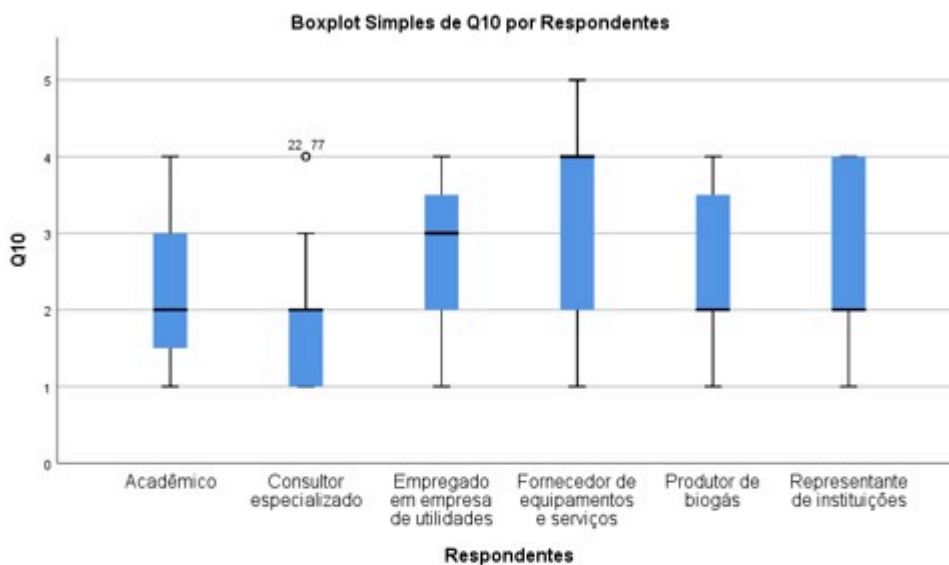
Cosme Polese Borges
Cosme Polese Borges

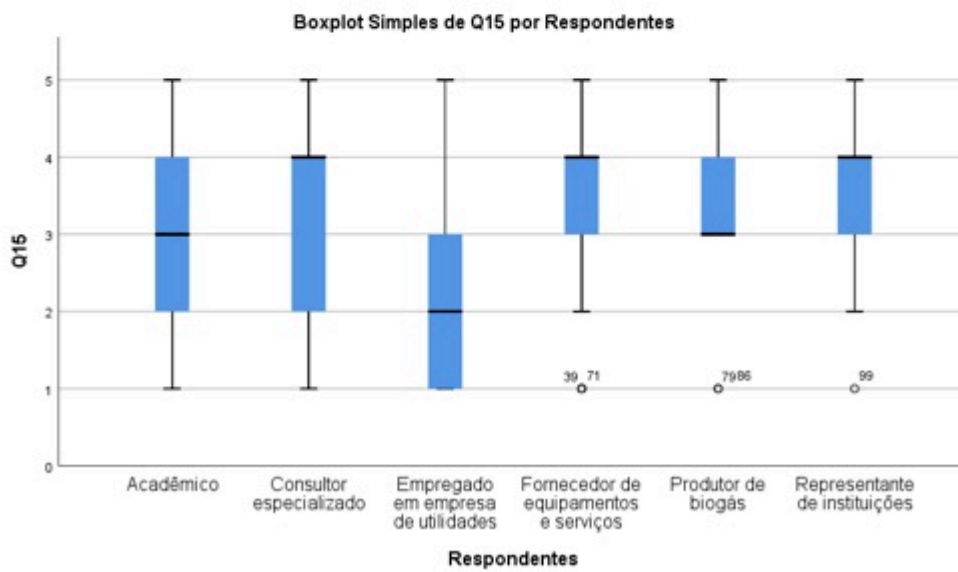
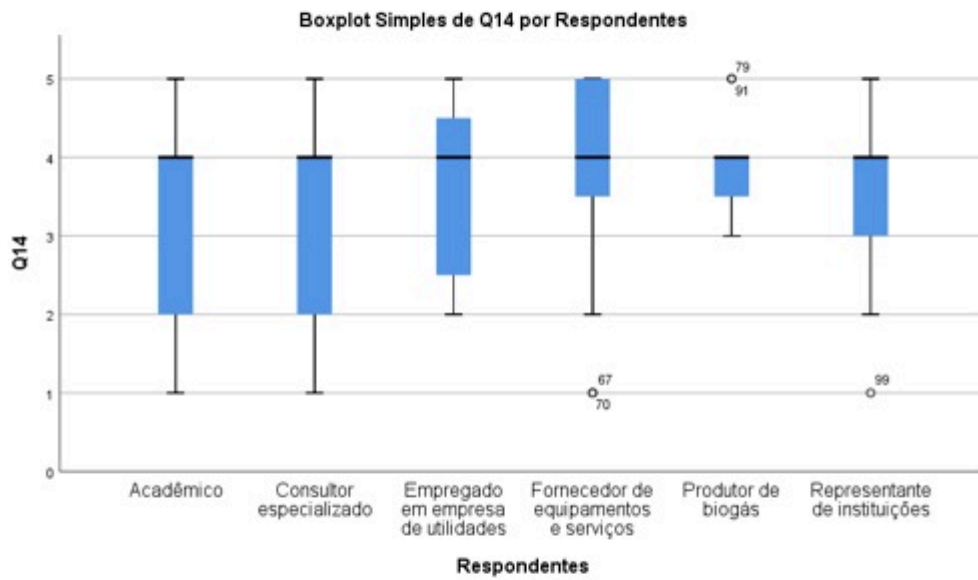
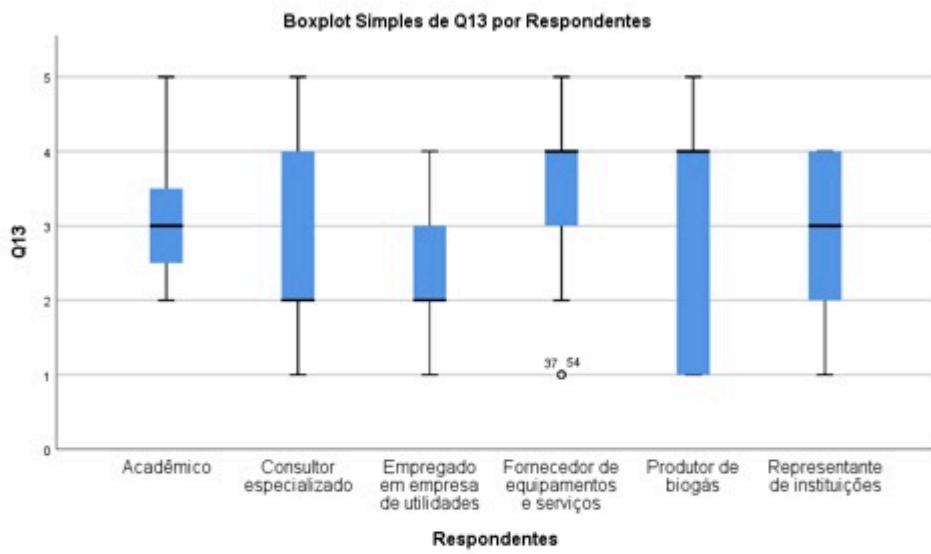
APÊNDICE G – DIAGRAMAS DE CAIXAS DE TIPOS DE RESPONDENTES POR QUESTÃO

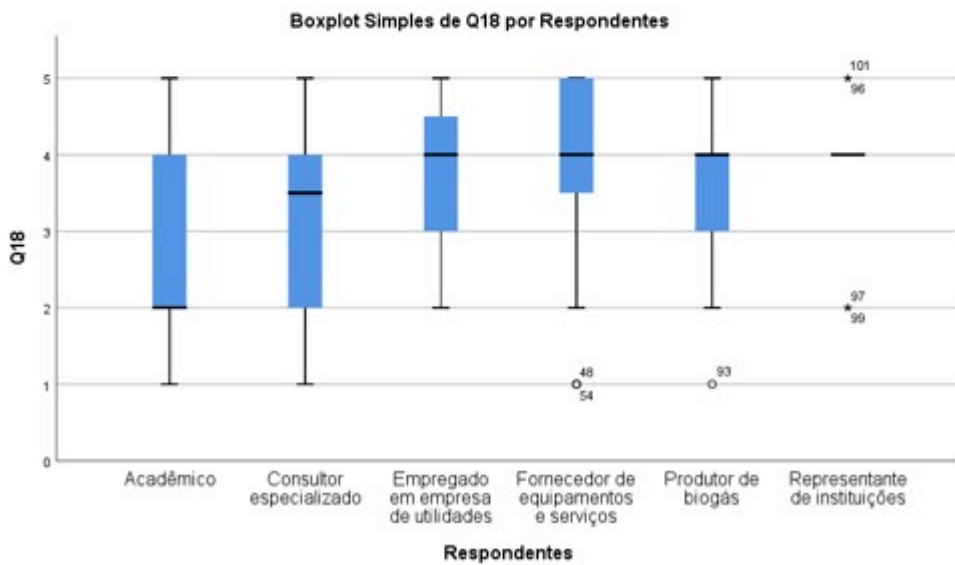
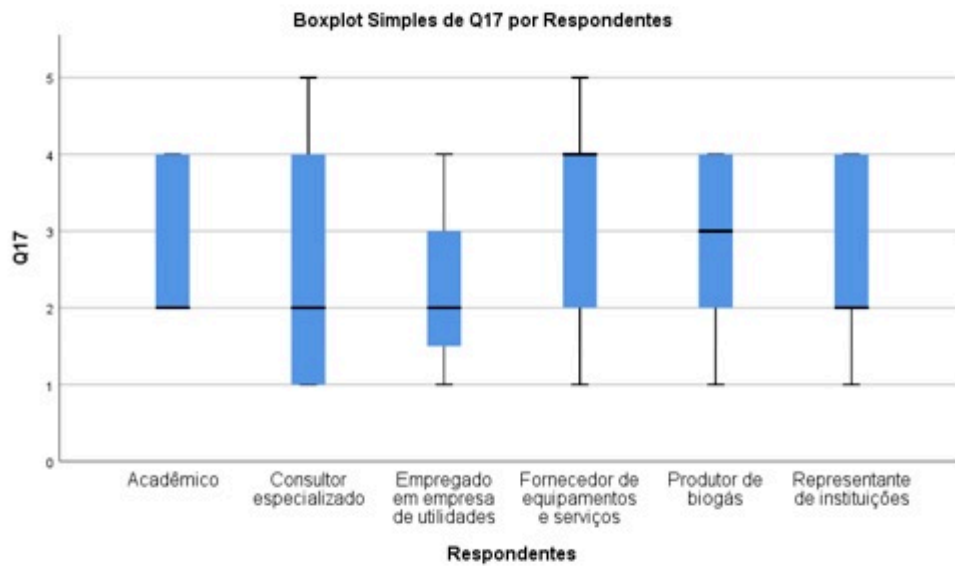
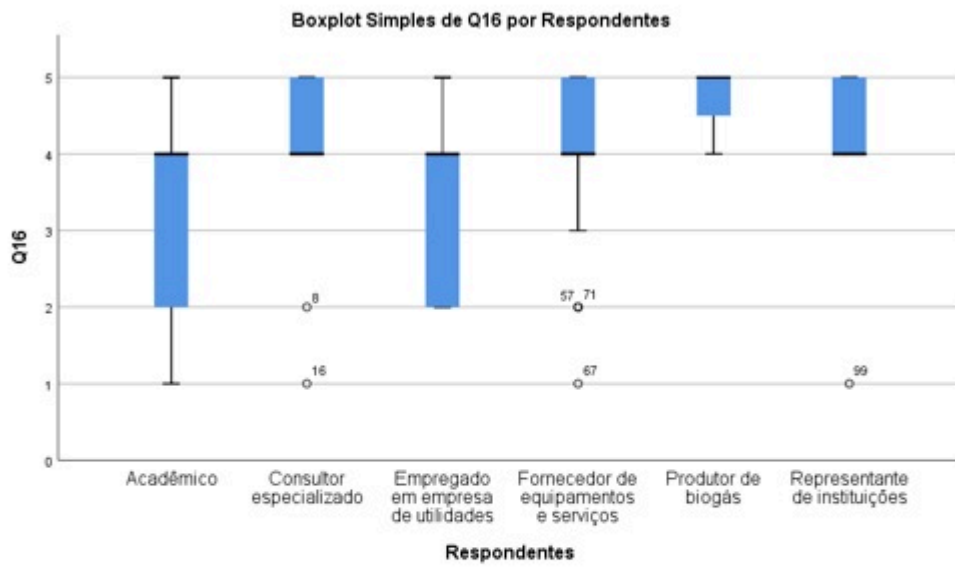


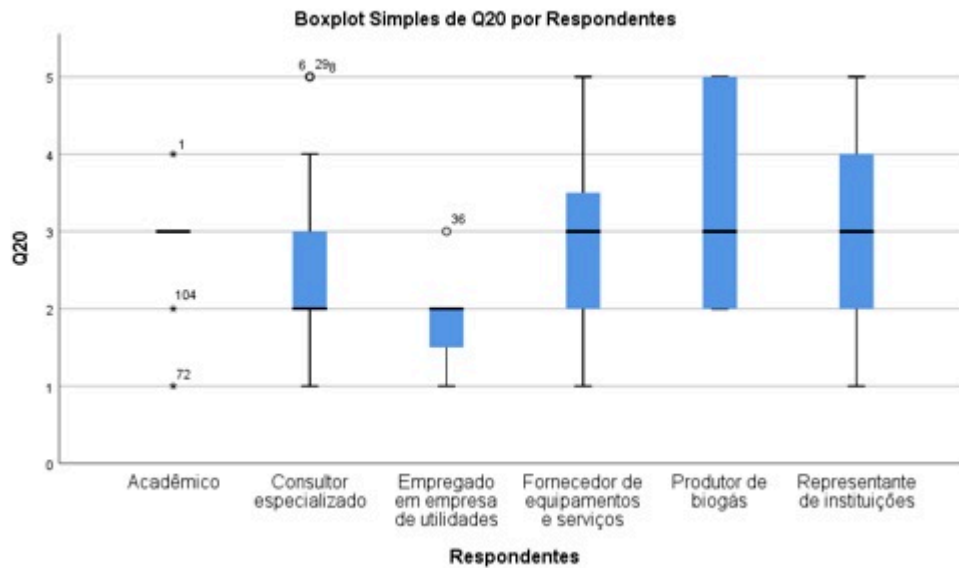
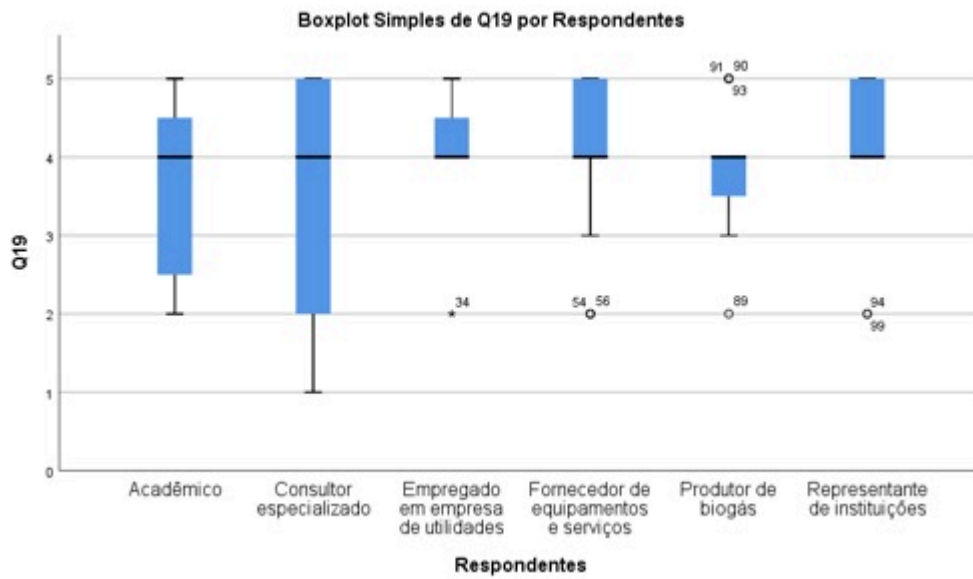




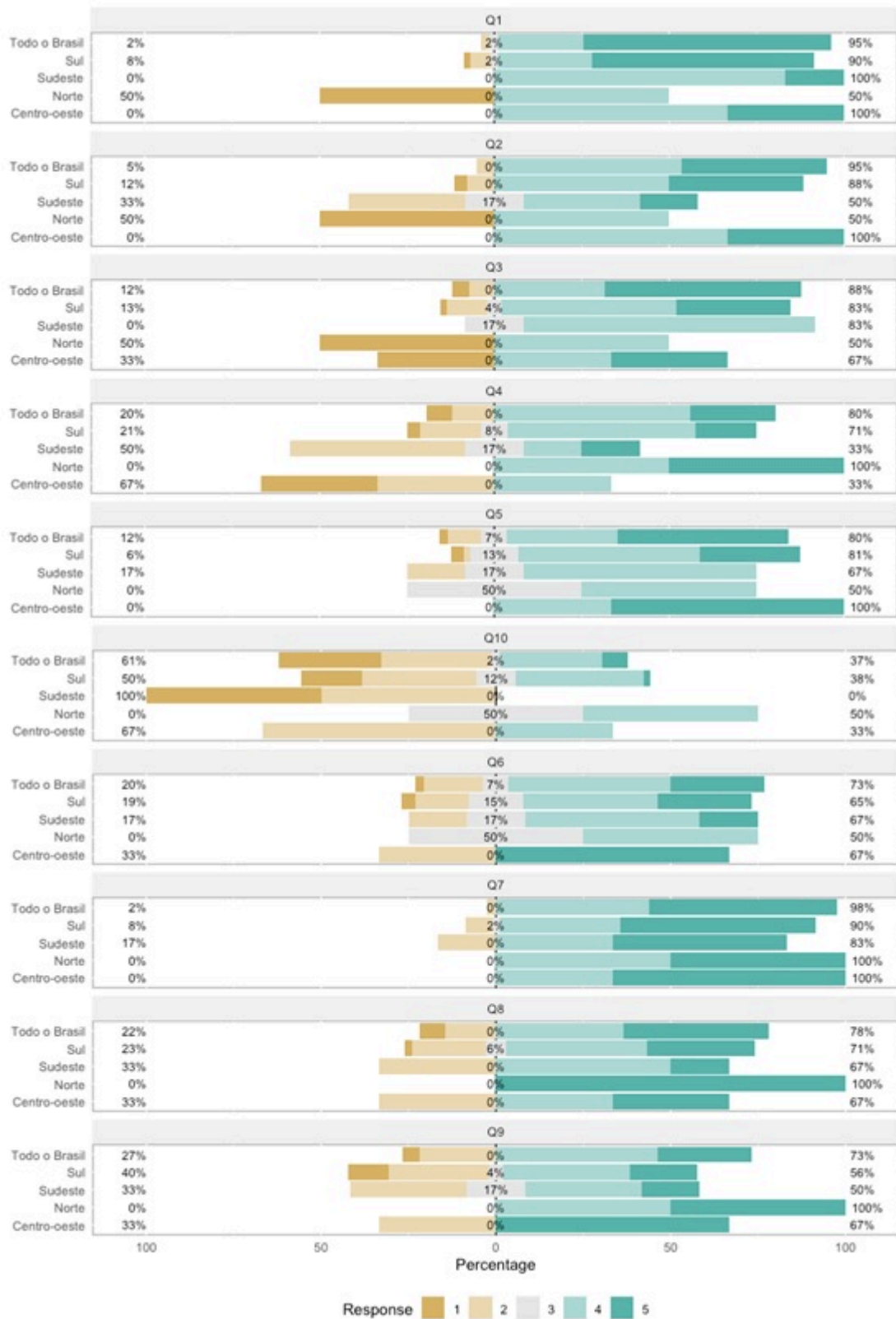


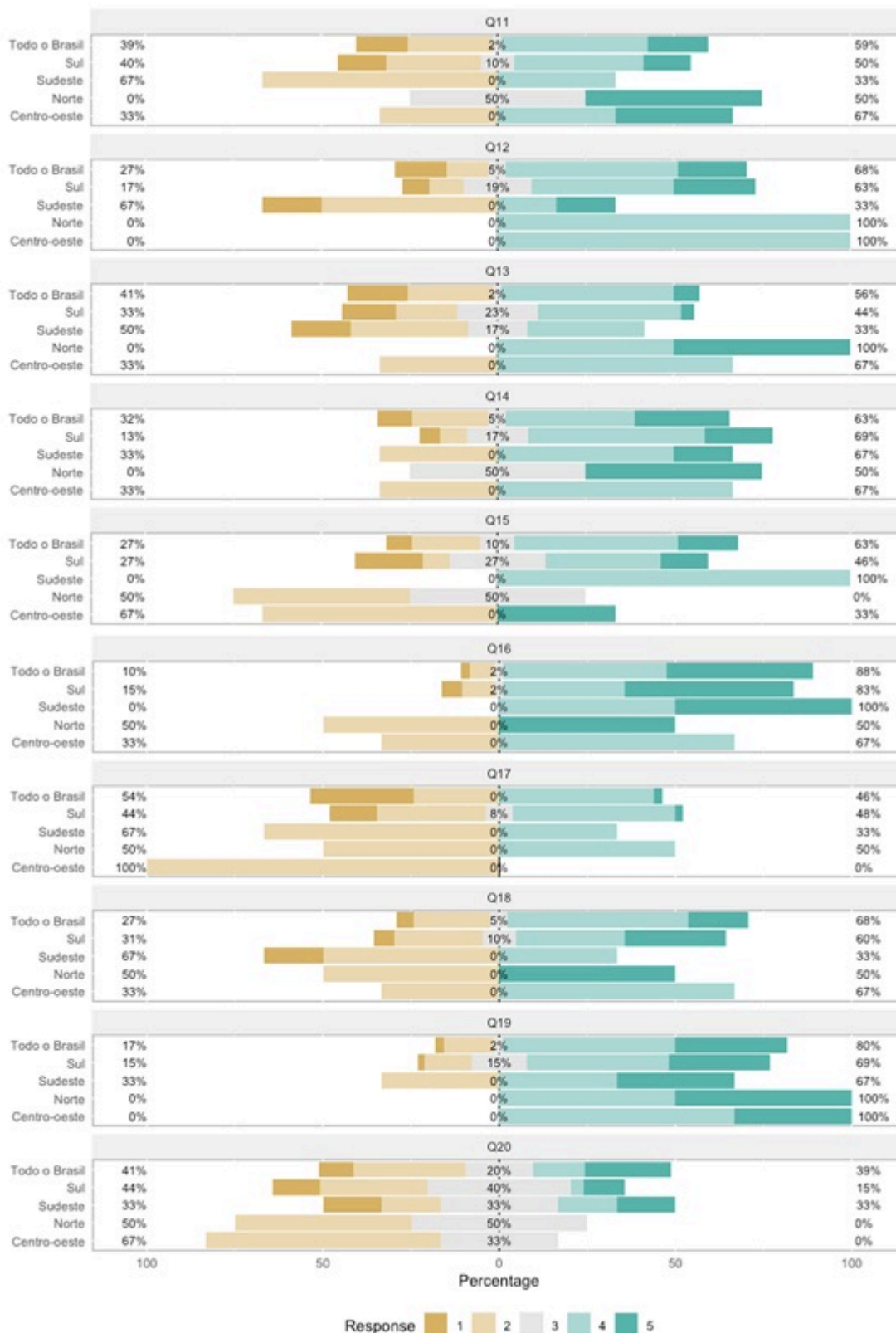






APÊNDICE H – GRÁFICOS DE BARRAS POR REGIÃO





APÊNDICE I – GRÁFICOS DE BARRAS POR ATUAÇÃO

