

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

MARIANA OLIVEIRA BARBOSA

**O estado de São Paulo rumo ao processo de descarbonização: principais
drivers e a participação do gás natural**

**SÃO PAULO
2021**

MARIANA OLIVEIRA BARBOSA

O estado de São Paulo rumo ao processo de descarbonização: principais *drivers* e a participação do gás natural.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Análise e Planejamento Energético

Orientadora: Profa. Dra. Drielli Peyerl

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA
CATALOGRÁFICA

Barbosa, Mariana Oliveira.

O estado de São Paulo rumo ao processo de descarbonização: principais drivers e a participação do gás natural. / Mariana Oliveira Barbosa; orientadora: Drielli Peverl. – São Paulo, 2021.

172 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Gás natural. 2. Fontes alternativas de energia. I. Título.

Nome: BARBOSA, Mariana Oliveira

Título: O estado de São Paulo rumo ao processo de descarbonização: principais *drivers* e a participação do gás natural.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Análise e Planejamento Energético

Orientadora: Profa. Dra. Drielli Peyerl

Aprovado em: 02 de Setembro de 2021

Banca Examinadora

Prof. Dr. Gildo Magalhães do Santos Filho

Instituição: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH/USP)

Julgamento:

Prof. Dr. Evandro Mateus Moretto

Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH/USP)

Julgamento:

Prof. Dr. George Augusto Batista Câmara

Instituição: Universidade Rey Juan Carlos (URJC)

Julgamento:

*Este trabalho é dedicado à minha família: meu
irmão, meus pais e meus sobrinhos.*

AGRADECIMENTOS

Para início dos agradecimentos, gostaria de destacar a frase “Sonho que se sonha só/ é só um sonho que se sonha só/sonho que se sonha junto é realidade”. É verdade e eu tive o privilégio de construir essa dissertação com a ajuda e incentivo de muitas mãos. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família. Meu irmão, Guilherme, que desde o início me mostrou o grande valor de estudar e insistir em nossos sonhos. Mostrou-me desde cedo a importância de correr atrás do que a gente almeja e ao mesmo tempo mostrou como a ciência faz o nosso olho brilhar. Meu pai e minha mãe, Valdemir e Olívia, que tanto me incentivaram nas minhas escolhas e permitiram que eu chegasse até aqui. Educaram para que eu sempre tivesse o olhar voltado aos estudos e pudesse seguir os trilhos que me ensinaram, sem perder o caminho de volta para casa. Me mostraram como a ética, responsabilidade e respeito sempre devem prevalecer. Também não posso deixar de mencionar a Eva e o Jake, os meus sobrinhos. A chegada de vocês fez a minha esperança e vontade de buscar um mundo melhor ser renovada. Obrigada à Suzana, que me agregou com conversas e serviu de inspiração como uma mulher na ciência.

Eu agradeço, e muito, à minha orientadora, que também é uma grande amiga, Drielli Peyerl. Essa mulher é uma inspiração à todas nós na ciência. Mostra-se forte e apegada aos seus alunos. Durante esses mais de dois anos de trabalho em conjunto, nunca deixou de acreditar em mim e no meu trabalho. Sempre na busca por elevar a qualidade do nosso trabalho. Você é um exemplo como mulher, amiga, pesquisadora e professora. Obrigada por tantas oportunidades!

Dentro do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, pude entrar em contato com importantes professores e pesquisadores que ajudaram na minha construção até aqui. Não posso deixar de citar o prof. Ildo Sauer, Nilton, Carlos, Gallo, Daniele, Profa. Virgínia, Prof. Evandro, Profa. Marilin, Prof. Célio, Prof. Zilles, Prof. Piantini, Prof. Edmilson e tantos outros. Mas além deles, todos os outros funcionários e técnicos do instituto que muito me agregaram desde um “bom dia” sorridente até outros vastos conhecimentos. Que saudades de um encontro que não seja virtual! Obrigada também à prof. Helena e todos os outros colegas de turma da disciplina “A formação do professor universitário”. O que eu aprendi nessa matéria foi além do seu escopo e revolucionou a minha visão sobre a universidade. Por fim, no meio do percurso eu tive a minha qualificação. Esse foi um momento de muito aprendizado e resiliência. Não seria possível a passagem desse momento sem a minha orientadora, profa. Virgínia e profa. Sílvia. Obrigada por isso e por todas as lições que pude levar nesse dia.

Agradeço também à FAPESP pelo apoio à essa pesquisa (processos nº 2017/18208-8 e 2019/04555-3). Mais do que nunca ficou evidente a necessidade do investimento em pesquisa. Avante!

Mas além disso, há os amigos que sempre estiveram por perto e em discussões no café, encontros em palestras e aulas, tardes fazendo o trabalho e artigos. As meninas da “minha casa minha vida”, Maria, Sônia e Julia e a todos os outros ingressantes do ano de 2019. Obrigada ao pessoal da disciplina de transição energética, BET, do RCGI, do PLANGEA, da AAPG, do Jovens de Energia, do Até o Último Barril e do *Geneva Challenge*. Todos esses fóruns de estudo e discussão me ajudaram de uma forma, além de me sentir verdadeiramente do lado de pessoas tão brilhantes.

E por fim, mas não menos importante, aos amigos da vida que em muitos momentos estiveram comigo simplesmente para escutar uma notícia boa ou sentir comigo um momento ruim. Obrigada àqueles de Americana e de São Paulo. Sei que sempre vou poder contar com vocês. Lucas, meu melhor amigo, e que nunca deixou de sonhar comigo. E é dessa forma que encerro esse agradecimento.

RESUMO

BARBOSA, Mariana Oliveira. O estado de São Paulo rumo ao processo de descarbonização: principais *drivers* e a participação do gás natural. 2021. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

O processo de transição energética para uma economia de baixo carbono tem sido um desafio para o setor energético mundial. Recentemente, um conjunto de ações globais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, junto a ações nacionais e locais, como a Contribuição Nacionalmente Determinada, têm contribuído para alcançar metas de descarbonização do setor. Nesse contexto, o papel a ser exercido pelo gás natural como um energético do processo de transição tornou-se evidente em alguns países. Isso se deve, principalmente, pelo desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, disponibilidade e abundância do recurso e a apresentação de baixa emissão de gases de efeito estufa quando comparados com carvão ou petróleo. No entanto, ao mesmo tempo, permanece a dúvida sobre o seu papel justamente por pertencer ao grupo dos combustíveis fósseis. Portanto, é fundamental uma avaliação mais acurada, inclusive pelo fato de o gás natural apresentar uma grande diversidade de usos finais e inserções nos países e setores. Nesse sentido, um dos principais estados brasileiros que possui a cultura do gás natural é São Paulo, tendo inclusive uma infraestrutura construída ao longo da história, diversos usos na sua matriz energética e localização propícia relacionada a exploração de petróleo e gás natural na costa litorânea. Assim, o trabalho tem como objetivo avaliar os fatores que influenciaram as emissões de CO₂ e o papel da inserção do gás natural nos últimos anos, de acordo com os dados disponíveis para o estado de São Paulo, suas regiões administrativas e os setores consumidores (industrial, comercial, geração elétrica, residencial e transportes). É necessário compreendermos o passado e presente e, assim, observarmos qual o papel que esse combustível poderá ter na matriz energética do estado. Para tanto, será feita a análise a partir dos efeitos que compõem a Identidade de Kaya Estendida, utilizando o método *Logarithmic Mean Divisia Index* para a verificação dos fatores econômicos, demográficos e energéticos para com as emissões de CO₂ no estado de São Paulo, relacionados com os dados municipais (2006-2018) e aos setoriais (2009-2018). Como resultado, observa-se que, o aumento do Produto Interno Bruto *per capita* tem contribuído fortemente para o aumento das emissões de CO₂, apesar de ter apresentado uma estagnação observada nos últimos anos. Além disso, os ganhos tecnológicos permitiram a redução dos níveis totais de CO₂ emitidos. A substituição de derivados de petróleo por gás natural não apresentou proporções elevadas como os efeitos anteriores, mas evitou a ascensão das emissões de CO₂, sobretudo no setor industrial. Com isso, a sua inserção junto às ações que permitam o ganho de eficiência energética, tornam-se necessárias para cumprir os objetivos de descarbonização futura do estado, sem comprometer a elevação das atividades econômicas e associá-la à um desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Gás natural; Estado de São Paulo; Identidade de Kaya Estendida; *Logarithmic Mean Divisia Index*; Descarbonização.

ABSTRACT

BARBOSA, Mariana Oliveira. The state of São Paulo towards the decarbonization: main drivers and the role of natural gas. 2021. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

The energy transition process towards a low carbon economy has been a challenge for the global energy sector. Recently, several actions, such as the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals, together with national and local efforts, such as the Nationally Determined Contribution, have contributed to achieving decarbonization targets for the sector. In this context, the role to be played by natural gas as an energy source in the transition process has become evident in some countries. This is mainly due to the technological development of the last decades, availability and abundance of the resource and the low emission of greenhouse gases compared to coal or oil. At the same time; however, it is questionable because it is also a fossil fuel. In this sense, one of the main Brazilian states with the natural gas culture is São Paulo, including an infrastructure built throughout history, several uses in its energy matrix and favorable location related to oil and natural gas exploration on the coastal coast. Thus, the work aims to evaluate the factors that influenced CO₂ emissions and the role of the rise of natural gas in recent years, according to data available for the state of São Paulo, for its administrative regions and consumption sectors (industrial, commercial, electricity generation, residential and transport). It is necessary to understand past and present and; thus, observe what role this fuel can play in the state's energy mix. Therefore, an analysis will be made for the effects that make up the Kaya Extended Identity, using the Logarithmic Mean Divisia Index method. It verifies the economic, demographic and energy factors that influence CO₂ emissions in the state of São Paulo according to municipal (2006-2018) and sectorial (2009-2018) data. As a result, it is observed that the increase in the Gross Domestic Product per capita has strongly contributed to the increase in CO₂ emissions, despite having shown a stagnation in recent years. In addition, technological gains allowed for a reduction in the total levels of CO₂ emitted. The substitution of oil derivatives for natural gas did not show high proportions as the previous effects, but it avoided the rise of CO₂ emissions, especially in the industrial sector. With that, its insertion in the actions that allow gain of energetic efficiency become necessary to fulfil the objectives of future decarbonization of the state, without compromising the increase in the economic activities and associating it with sustainable development.

Keywords: Natural gas; State of São Paulo; Extended Kaya Identity; Logarithmic Mean Divisia Index; Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráficos de índices relacionados ao desenvolvimento da sociedade e sua interação com recursos energéticos entre 1750-2010	23
Figura 2: Eventos e acordos mundiais para discussão de propostas e análise das ações relacionadas aos impactos antrópicos e às mudanças climáticas	29
Figura 3: Consumo de energia mundial em milhões de toneladas de óleo equivalente (toe).	30
Figura 4: Consumo total de gás natural em toneladas equivalentes de petróleo (Tep) (linha vermelha) com o fator de conversão de m ³ para tep de 2018 para gás natural seco	43
Figura 5: Consumo total, produção nacional e importação via gasodutos e gás natural liquefeito de gás natural entre os anos de 1970 e 2018	43
Figura 6: Reservas provadas de gás natural entre o período de 1975 e 2018 em milhões de metros cúbicos.	44
Figura 7: Reservas provadas de gás natural no ano de 2017 por estado no Brasil.	45
Figura 8: Produção de gás natural no ano de 2017 por estado no Brasil.	45
Figura 9: Caracterização da oferta total nacional e seus destinos durante o período de 2007 a 2019 no Brasil.	46
Figura 10: Infraestrutura de transporte de gás natural no Brasil em 2018.	48
Figura 11: Importância do GNL importado para o suprimento nacional total durante o período de 2007 a 2018.	49
Figura 12: Demanda de gás natural no Brasil por setor durante os anos de 2007 e 2019.	50
Figura 13: Histórico da progressão do Valor Adicionado Bruto ao PIB por cada setor econômico no estado de São Paulo (2006 – 2018) em valores correntes	53
Figura 14: Relação entre o progresso do PIB estadual e de cada setor econômico (em milhões de reais de 2005) e o consumo energético por cada setor (em milhões de toneladas de óleo equivalente) entre 2009 e 2018.	54
Figura 15: Matriz energética do estado de São Paulo.	55
Figura 16: Evolução histórica das emissões de CO ₂ equivalente de acordo com as categorias emissoras.	56
Figura 17: Mapa das regiões administrativas do estado de São Paulo.	57
Figura 18: População absoluta de cada região administrativa do Estado de São Paulo em 2018.	58
Figura 19: Participação do Valor Adicionado de cada setor da economia (primário, secundário e terciário) no ano de 2018 em relação à cada região administrativa.	60

Figura 20: Participação relativa de cada fonte energética na matriz energética de consumo no ano de 2018.	61
Figura 21: Emissões de CO ₂ (t de CO ₂) absolutas a partir do setor energético por região administrativa do estado de São Paulo em 2018.	63
Figura 22: Composição da oferta bruta de gás natural em relação à produção interna e à importação estadual durante os anos de 2009-2019 em 10 ⁶ de metros cúbicos.	64
Figura 23: Oferta doméstica bruta de fontes energéticas (%) em São Paulo.	65
Figura 24: Áreas concessionárias de cada empresa de distribuição de gás natural e as cidades atendidas em 2018.	67
Figura 25: Consumo de gás natural por setor das empresas Comgás (A), GasBrasiliiano (B) e Naturgy (C) (2006-2019).	68
Figura 26: Consumo de gás natural (em milhões de metros cúbicos) por setores no estado de São Paulo (2008 a 2018).	69
Figura 27: Progresso da geração elétrica por meio de centrais térmicas (10 ³ toe, colunas) e hidráulica (GWh, linha com marcadores) entre os anos de 2009 e 2018 no estado de São Paulo.	71
Figura 28: Consumo de combustíveis no setor durante os anos de 2009 e 2018.	72
Figura 29: Consumo de gás natural nas atividades industriais do estado de São Paulo em milhões de m ³ .	73
Figura 30: Uso das diferentes fontes primárias no setor residencial em 10 ³ toe.	74
Figura 31: Uso das diferentes fontes primárias no setor comercial.	75
Figura 32: Consumo energético do setor de transportes por combustível durante o período de 2009 a 2018 em 10 ³ toe.	76
Figura 33: Ações realizadas pelo poder público de São Paulo que se relacionam ao processo de descarbonização do setor energético no estado de São Paulo (1995-2021).	78
Figura 34: Demonstração gráfica da decomposição completa a partir do Método de Laspeyeres Refinado.	89
Figura 35: Categorias de dados brutos coletados.	98
Figura 36: Variação da população entre os anos de 2006 e 2018.	101
Figura 37: Variação do PIB a preços correntes entre os anos de 2006 e 2018.	103
Figura 38: Variação do consumo total de insumos energéticos entre os anos de 2006 e 2018.	106
Figura 39: Variação das emissões totais (em 10 ³ toneladas de CO ₂) entre os anos de 2006 e 2018.	109

Figura 40: Compilado dos efeitos verificados na Identidade de Kaya e Identidade de Kaya Estendida.	110
Figura 41: Definição da ordem das figuras a serem apresentadas conforme a abordagem e métodos aplicados.	110
Figura 42: Identidade de Kaya + MLR	111
Figura 43: Identidade de Kaya + LMDI.	111
Figura 44: Identidade de Kaya Estendida + MLR.	112
Figura 45: Identidade de Kaya Estendida e LMDI.	112
Figura 46: Variações ano a ano das emissões de CO ₂ no estado de São Paulo (em 10 ³ t).	115
Figura 47: Alterações das emissões de CO ₂ por setor entre os períodos analisados (2009-2013 e 2013-2018).	115
Figura 48: Mapa de correlação entre a série histórica de emissões totais de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	116
Figura 49: Valores do efeito de intensidade do fator de emissão durante os anos de 2006 e 2018 (colunas azuis) em 10 ³ t de CO ₂ .	117
Figura 50: Valores do efeito de intensidade de fator de emissão dos combustíveis fósseis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.	119
Figura 51: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade de fator de emissão de combustíveis fósseis de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	120
Figura 52: Relação entre o aumento da participação de gás natural na matriz energética e o efeito de substituição de derivados de petróleo por gás natural em 10 ³ t de CO ₂ entre 2006 e 2018.	121
Figura 53: Valores do efeito estrutural de participação do etanol dentre os combustíveis que contêm composição de carbono durante os anos de 2006 e 2018 (colunas azuis) em 10 ³ t de CO ₂ .	122
Figura 54: Valores do efeito estrutural da entrada de etanol entre os combustíveis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.	123
Figura 55: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito estrutural da substituição de combustíveis fósseis por etanol de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	124
Figura 56: Relação entre o aumento da participação de etanol na matriz energética e o efeito de substituição de combustíveis fósseis por etanol em 10 ³ t de CO ₂ entre 2006 e 2018.	125

Figura 57: Valores do efeito estrutural de participação dos combustíveis fósseis+etanol na matriz energética durante os anos de 2006 e 2018 (colunas cinza claro) em 10 ³ t de CO ₂ .	126
Figura 58: Valores do efeito estrutural da entrada de etanol entre os combustíveis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.	127
Figura 59: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito estrutural da substituição de combustíveis fósseis+etanol por eletricidade de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	128
Figura 60: Relação entre o aumento da participação da eletricidade na matriz energética e o efeito de substituição de combustíveis com composição de carbono por eletricidade em 10 ³ t de CO ₂ (2006-2018).	129
Figura 61: Valores do efeito de intensidade energética durante os anos de 2006 e 2018 (colunas amarelas) em 10 ³ t de CO ₂ .	130
Figura 62: Valores do efeito da intensidade energética para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.	131
Figura 63: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade energética de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	132
Figura 64: Relação entre o aumento da melhoria da intensidade energética e seu efeito de intensidade em 10 ³ t de CO ₂ entre 2006 e 2018.	133
Figura 65: Valores do efeito de PIB <i>per capita</i> durante os anos de 2006 e 2018 (colunas amarelas) em 10 ³ t de CO ₂ .	134
Figura 66: Valores do efeito do PIB <i>per capita</i> para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.	135
Figura 67: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de escala do PIB <i>per capita</i> de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	136
Figura 68: Relação entre o aumento renda <i>per capita</i> e seu efeito de escala em 10 ³ t de CO ₂ entre 2006 e 2018.	136
Figura 69: Valores do efeito da população durante os anos de 2006 e 2018 (colunas amarelas) em 10 ³ t de CO ₂ .	137
Figura 70: Valores do efeito da população para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018	138

Figura 71: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade energética de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).	139
Figura 72: Relação entre o aumento da população e seu efeito de escala em 10^3 t de CO ₂ entre 2006 e 2018.	139
Figura 73: Acumulação dos diferentes efeitos da Identidade de Kaya Estendida no estado de São Paulo durante o período entre 2006 e 2018.	141
Figura 74: Efeitos totais entre os anos de 2009 e 2018 em cada setor de consumo.	142
Figura 75: Efeito do gás natural nas emissões de CO ₂ em cada região administrativa em relação ao somatório do efeito total e do gás natural durante os anos de 2006 e 2018.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre a distribuição geográfica das áreas administrativas do estado de São Paulo e as áreas que correspondem à concessão estabelecida para as empresas distribuidoras de gás natural do estado de São Paulo.	66
Tabela 2: Efeitos da Identidade de Kaya Estendida.....	86
Tabela 3: Número de habitantes entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo. A 100	
Tabela 4: Valores do Produto Interno Bruto à preços correntes (em bilhões de reais) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo.	102
Tabela 5: Valores do consumo total de insumos energéticos (em 10^6 toe) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo.....	105
Tabela 6: Fatores de emissão utilizados para os cálculos de emissão total e por cada categoria de insumo energético.	107
Tabela 7: Valores das emissões totais (em 10^3 toneladas de CO_2) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo.	108
Tabela 8: Participação do consumo de gás natural entre os combustíveis fósseis por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.	119
Tabela 9: Participação do consumo de etanol em relação ao consumo de combustíveis por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.....	123
Tabela 10: Participação do consumo de combustíveis fósseis + etanol em à matriz energética total por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.	127
Tabela 11: Valores de eficiência energética (10^3 toe/ R\$) por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018 e a variação do valor durante o período analisado (2009-2018).....	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D's	Descentralização, descarbonização e digitalização
ADI	Análise de Decomposição por Índices
AGNU	Assembleia Geral das Nações Unidas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutores de energia elétrica
ARSESP	Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i>
CEG	Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Comgás	Companhia de Gás de São Paulo
COP	Conferência por Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
ECO-92 ou RIO-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
EKC	<i>Environmental Kuznets Curve</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FPMCB	Fórum Paulista de Mudanças Climáticas Globais e de Biodiversidade
GASBOL	Gasoduto Bolívia-Brasil
GEx	Grupo Executivo sobre Mudança do Clima
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GNC	Gás natural comprimido
GNL	Gás natural liquefeito
GNV	Gás natural veicular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia ou <i>International Energy Agency</i>
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ou <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MDL ou LMDI	Método de Divisa de Índices com Peso Médio Logarítmico
MLR ou RLM	Método de Laspeyres Refinado
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MTep	Milhões de toneladas equivalente de petróleo
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada ou <i>Nationally Determined Contribution</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PDE	Plano decenal de expansão de energia
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo
PIB	Produto Interno Bruto
PIE	Produtores independentes de energia elétrica
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PPE	Plano Paulista de Energia
PPPG	Programa Paulista de Petróleo e Gás Natural
PROCLIMA	Programa Estadual de Mudanças Climáticas
RA_AB	Região administrativa de Araçatuba
RA_BA	Região administrativa de Bauru
RA_BT	Região administrativa de Barretos
RA_CA	Região administrativa de Campinas
RA_CE	Região administrativa de Central
RA_F	Região administrativa de Franca
RA_I	Região administrativa de Itapeva
RA_M	Região administrativa de Marília
RA_PP	Região administrativa de Presidente Prudente
RA_R	Região administrativa de Registro
RA_RMS ou RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RA_RP	Região administrativa de Ribeirão Preto
RA_SA	Região administrativa de Santos
RA_SJC	Região administrativa de São José dos Campos

RA_SJRP	Região administrativa de São José do Rio Preto
RA_SO	Região administrativa de Sorocaba
Rio + 10	Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável
SAG	<i>Société Anonyme du Gaz</i>
SDA	Análise de Composição Estrutural ou <i>structural decomposition analyzis</i>
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito
Estufa	
SIMA-SP	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do governo do estado de São Paulo
UN	<i>United Nations</i>
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima ou <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural
UTCGA	Unidade de Tratamento de Gás Monteiro Lobato
VAB	Valor Adicionado Bruto
WEC	Conselho de Energia Mundial ou <i>World Energy Council</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$Cons_C$	Consumo de combustíveis com carbono na composição (combustíveis fósseis + etanol)
$Cons_{CF}$	Consumo total de combustíveis fósseis (derivados de petróleo + gás natural)
I_C	Intensidade de carbono
I_{CF}	Intensidade de emissões dos combustíveis fósseis
I_E	Intensidade energética
S_{CE}	Participação de combustíveis compostos por carbono dentro da matriz energética total
S_{CF}	Participação dos combustíveis fósseis dentre os combustíveis com composição de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
$Econs$	Energia consumida total
EM_{tot}	Emissão total de CO_2
GWh	Gigawatt-hora
MTep	Milhões de toneladas equivalente de petróleo
N_2O	Óxido nitroso
Pop	População
toe	Toneladas de óleo equivalente
A	Afluência
E	PIB <i>per capita</i>
I	Impacto ambiental
P	População
T	Tecnologia
ε	Erro
ρ	Coefficiente de correlação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O GÁS NATURAL: QUAL É O SEU PAPEL E A SUA PARTICIPAÇÃO NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA?	22
2.1 O dilema dos combustíveis fósseis e as mudanças climáticas: a leitura pelos Acordos Internacionais com foco no processo de descarbonização	22
2.2 A transição energética rumo à descarbonização	32
2.3 Gás natural, utilização e impactos.....	37
2.4 O gás natural no Brasil: marcos históricos e atuais	40
3 O ESTADO DE SÃO PAULO: REGIONALIZAÇÃO E RECURSOS ENERGÉTICOS.....	52
3.1 Panorama energético do estado de São Paulo	52
3.1. Contextualização das regiões administrativas	56
3.2 Exploração, infraestrutura e consumo de gás natural	64
3.2.1 Oferta de gás natural no estado de São Paulo (offshore): produção e importação estadual.....	64
3.2.2 Malha de transporte e distribuição presente no estado de São Paulo.....	65
3.2.3 Consumo de gás natural por setor	69
3.2.3.1 Setor elétrico.....	70
3.2.3.2 Setor industrial	71
3.2.3.3 Setor residencial	73
3.2.3.4 Setor comercial.....	74
3.2.3.5 Setor de transporte	75
3.3 Políticas públicas voltadas a área de energia no estado de São Paulo.....	76
4 IDENTIDADE DE KAYA E DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES NO ESTADO DE SÃO PAULO	79
4.1 Índices e indicadores ambientais.....	79
4.1.1 Revisão conceitual e abordagens utilizadas.....	79
4.1.2 Abordagens teóricas	80
4.1.2.1 Identidade IPAT	82
4.1.2.2 Identidade de Kaya.....	83
4.1.2.3 Identidade de Kaya Estendida	84
4.2 Análise de decomposição de índices.....	87
4.2.1 Método de Laypeyeres Refinado.....	88
4.2.2 LMDI	96
4.3 Obtenção de dados	98
4.3.1 Dados demográficos.....	99
4.3.2 Dados econômicos	101
4.3.3 Dados energéticos	103

4.3.4 Dados de emissões de CO ₂	106
5 EFEITOS DA IDENTIDADE DE KAYA ESTENDIDA NO ESTADO DE SÃO PAULO E NAS DIVISÕES REGIONAIS	110
5.1 Aplicação das metodologias para cálculo dos efeitos no estado de São Paulo	110
5.2 Os efeitos da Identidade de Kaya Estendida no estado de São Paulo.....	113
5.2.1 Substituição de derivados de petróleo por gás natural	117
5.2.2 Substituição de combustíveis fósseis por etanol	121
5.2.3 Participação de combustíveis fósseis e etanol na matriz energética	125
5.2.4 Intensidade energética.....	129
5.2.5 PIB <i>per capita</i>	133
5.2.6 População.....	137
5.2.7 Panorama geral de todos os efeitos da Identidade de Kaya Estendida	140
5.3 Considerações parciais.....	143
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
REFERÊNCIAS	148
APÊNDICE A – [Consumo de derivados (10³ toe)]	166
APÊNDICE B – [Consumo de eletricidade (10³ toe)]	167
APÊNDICE C – [Consumo de gás natural (10³ toe)].....	168
APÊNDICE D – [Consumo de etanol (10³ toe)].....	169
APÊNDICE E – [Emissões de CO₂ associadas aos derivados de petróleo (10³ t de CO₂)].....	170
APÊNDICE F – [Emissões de CO₂ associadas ao gás natural (10³ t de CO₂)]	171
APÊNDICE G – [Dados dos setores econômicos]	172

1 INTRODUÇÃO

As necessidades de se verificar os dados históricos e inventários de emissões de gases de efeito estufa partem do fato, de que cada vez mais, tem sido consolidada a percepção do impacto de atividades humanas no meio ambiente, por parte da sociedade, dos pesquisadores, dos agentes públicos e do mundo corporativo. Isso é demonstrado por meio dos encontros e acordos mundiais realizados nas últimas décadas, os compromissos firmados a partir de políticas públicas e até mesmo algumas mudanças no comportamento do mercado. O setor energético é um relevante alvo nessa questão, pois, a nível mundial, é responsável por uma grande parcela de emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, vários dos debates, inclusive a nível nacional, voltam-se ao tema de transição energética.

A aceleração da transição energética visando a descarbonização da matriz energética apresenta-se como um grande desafio do século XXI. É de extrema urgência que se reverta a tendência observada, principalmente nas últimas décadas, de aumento das emissões de gases de efeito estufa. Dentre esses, o dióxido de carbono (CO₂) apresenta-se como o maior contribuinte, apesar de ter um potencial de aquecimento global inferior a outros gases, por exemplo, como o do metano. Isso é verificado, sobretudo, por dois motivos: as altas quantidades emitidas de CO₂ devido às atividades humanas – o que gera cerca de 60% do efeito estufa – e o tempo de permanência na atmosfera elevado (centenas de anos). Dito isso, para alcançar o objetivo de *Net Zero* em 2050 proposto pela Agência Internacional de Energia (IEA ou International Energy Agency) é necessário um conjunto de ações de mitigação de emissões de gases de efeito estufa, inclusive o CO₂, advindos do desenvolvimento das atividades humanas e econômicas. Entre essas ações pode-se mencionar as mudanças no comportamento de consumo, a eficiência energética, a inserção de biocombustíveis e outras fontes renováveis (solar e eólica, por exemplo), troca de combustíveis no uso final, e a prática de captura e utilização de carbono. Porém, observa-se que, o gás natural tem se apresentado como uma peça importante e discutível dentro do processo de transição energética rumo a descarbonização, sendo que vários estudos, os quais serão abordados nesse trabalho, expõem as suas vantagens, assim como os desafios.

Essa ampla discussão sobre o papel do gás natural frente a uma economia de baixo carbono associa-se à substituição de derivados de petróleo por combustíveis com menores fatores de emissão (ou até mesmo nulos) ou ao atendimento à crescente demanda energética por fontes menos (ou não) poluidoras. Com isso, busca avaliar se o gás natural é uma opção que auxiliará no processo de descarbonização, uma vez que apresenta menores emissões de gases de efeito estufa e particulados por conta de sua maior eficiência na combustão. Além

disso, apresenta-se como um combustível muito versátil com diversas penetrações nos setores de consumo energético e nas matrizes energéticas dos países. No entanto, salienta-se que o processo de exploração desse recurso acaba apresentando pontos de atenção e melhoria, seja por meio de emissões fugitivas ou de práticas como o *flaring*. Portanto, é fundamental que haja um levantamento mais minucioso sobre como esse combustível pode ou não contribuir para a descarbonização da matriz energética.

No Brasil, o gás natural apresentou três grandes momentos de aumento da oferta e do consumo. O primeiro foi originado pela Crise do Petróleo de 1973, o que ocasionou a busca por uma menor independência internacional e acarretou no investimento da exploração de áreas *offshore* e o início de exploração comercial de gás natural na década de 1980, na Bacia de Campos, Rio de Janeiro. Posteriormente, o segundo momento fundamental para a oferta de gás natural no país foi a entrada de operação do gasoduto Bolívia-Brasil. Por fim, o início do terceiro momento foi a exploração de gás natural da região do Pré-sal a partir de 2010. Nessa conjuntura, nos últimos anos, adiciona-se o fato do mercado de gás natural estar passando por algumas modificações regulatórias no intuito de fomentar uma maior abertura e concorrência, principalmente, nas áreas de transporte e distribuição.

Em meio ao contexto acima abordado, destaca-se o estado de São Paulo por estar em consonância ao âmbito federal e aos compromissos mundiais. Em 1995, fora iniciado o Programa Estadual de Mudanças Climáticas organizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo com o objetivo de aprofundar as discussões sobre a temática, colaborar com iniciativas federais e coordenar o inventário sobre emissões de gases de efeito estufa no estado. Até que em 2009, no sentido de reafirmar os compromissos estaduais, houve a criação da Política Estadual de Mudanças Climáticas, que decretou diretrizes para iniciativas que visavam também a descarbonização da matriz energética do estado. Por fim, neste documento também foi instaurado o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 20%, quando comparado ao ano de 2005, até o ano de 2020. O setor de energia paulista, diferente do que ocorre no Brasil, é o principal contribuinte para a liberação de gases de efeito estufa no estado. Ademais, o compromisso estadual frente ao aspecto ambiental é algo crescente e que recentemente firmou a iniciativa de ser *Net Zero* até o ano de 2050.

São Paulo também é definido como caso de estudo desse trabalho por apresentar uma robusta infraestrutura de gás natural e ser um dos principais estados produtores e o maior consumidor deste combustível no país. Dito isso, este estudo apresenta duas motivações: a definição de quais *drivers* que mais contribuem com as emissões de CO₂ no setor energético do estado de São Paulo, e mais especificamente, a segunda motivação, a qual avalia como a entrada

do gás natural a partir da substituição dos derivados de petróleo nos últimos anos tem contribuído ou não para o processo de descarbonização da matriz energética do estado de São Paulo. Assim, determinou-se o objetivo desse trabalho, o qual é avaliar os fatores que influenciaram as emissões de CO₂ e o papel da inserção do gás natural nas duas últimas décadas, de acordo com os dados disponíveis para o estado de São Paulo, suas regiões administrativas e os setores econômicos. É necessário compreendermos o passado e presente e, assim, observarmos qual o papel que esse combustível poderá ter na matriz energética do estado.

Assim, este trabalho utilizará da Identidade de Kaya Estendida para que os efeitos estruturais, de intensidade e escala que determinam a curva de emissões de CO₂ dos últimos anos sejam verificados para o estado de São Paulo. Além disso, a partir desse método, a participação do gás natural na matriz energética e seus impactos puderam ser identificados e diferenciados, por exemplo, da contribuição do etanol, outro insumo importante para o estado e com uma cultura também já bem consolidada. Em suma, para a avaliação das emissões de CO₂, as contribuições foram divididas pelos seguintes fatores: população e PIB *per capita* (efeito escala), intensidade energética e fator de emissão dos combustíveis fósseis (efeito intensidade), e penetração do etanol e eletrificação da matriz energética (efeitos estruturais). Utilizou-se também do método *Logarithmic Mean Divisia Index* (LMDI) para decompor cada um desses efeitos tanto em âmbito estadual como regional, para que fossem detectadas correlações regionais e setoriais que oferecessem indícios para com os objetivos geral e específicos desse trabalho.

Nessa linha, portanto, que essa dissertação buscará avaliar a participação do gás natural na matriz energética de São Paulo, tanto em relação aos setores de consumo, como nas possíveis regionalizações. Estas serão avaliadas de acordo com às regiões administrativas, mas também podem apresentar relação com as áreas das concessionárias de distribuição de gás natural, isto é, Comgás, Gás Brasileiro e Naturgy. Para isso, o acompanhamento de séries históricas a partir de índices e indicadores adequados torna-se fundamental, a fim de que haja embasamento na tomada de decisões e sejam definidas perspectivas futuras para uma transição sustentável.

O **primeiro capítulo** inicia-se com a discussão do impacto das atividades humanas frente ao meio ambiente, no qual o aumento das emissões de gases de efeito estufa torna-se evidente. Assim, ao reconhecer a relevância do homem como agente modelador do ambiente em vive, há uma movimentação na criação e cumprimento de metas de eventos e acordos mundiais com a finalidade de frear o aumento das emissões de gases de efeito estufa, que nas últimas décadas se mostrou acelerada. Além disso, esse capítulo introduz alguns estudos que

avaliam os benefícios do gás natural em relação ao processo de descarbonização da matriz energética e como este combustível se insere, principalmente, no contexto brasileiro.

O **segundo capítulo** é composto por uma descrição mais específica do estado de São Paulo e suas regiões administrativas, que compõem o caso de estudo desta dissertação. Para isso, há uma breve apresentação dos dados econômicos, ambientais, sociais e energéticos atuais. Além disso, detalha-se informações referentes à cada etapa do gás natural dentro do estado, ou seja, a descrição dos aspectos de exploração, transporte, distribuição e consumo. Por fim, é mencionado um histórico de ações e políticas públicas que envolvem a mitigação das mudanças climáticas e, em particular, como o gás natural aparece no planejamento destas.

O **terceiro capítulo** busca enfatizar a relevância das ferramentas para monitoramento das metas estabelecidas em acordos e/ou políticas públicas e dedicar-se à algumas das abordagens as quais buscam agrupar e quantificar indicadores socioeconômicos, energéticos e ambientais para que sejam calculadas as influências e efeitos, como é o caso da Identidade de Kaya Estendida. Além disso, evidencia-se dois dos métodos de análise de decomposição de índices e traz os dados históricos que serão utilizados na descrição proposta pelo trabalho.

Por fim, no **quarto capítulo** é apresentada a consolidação da abordagem metodológica utilizada e os resultados de cada um dos efeitos da Identidade de Kaya Estendida em relação ao estado, aos setores de consumo (residencial, comercial, transportes, industrial e geração elétrica) e às regiões administrativas. Ademais, o capítulo finaliza avaliando em particular como o aumento do consumo do gás em algumas regiões e setores comportou-se durante o período analisado (2006-2018).

2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O GÁS NATURAL: QUAL É O SEU PAPEL E A SUA PARTICIPAÇÃO NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA?

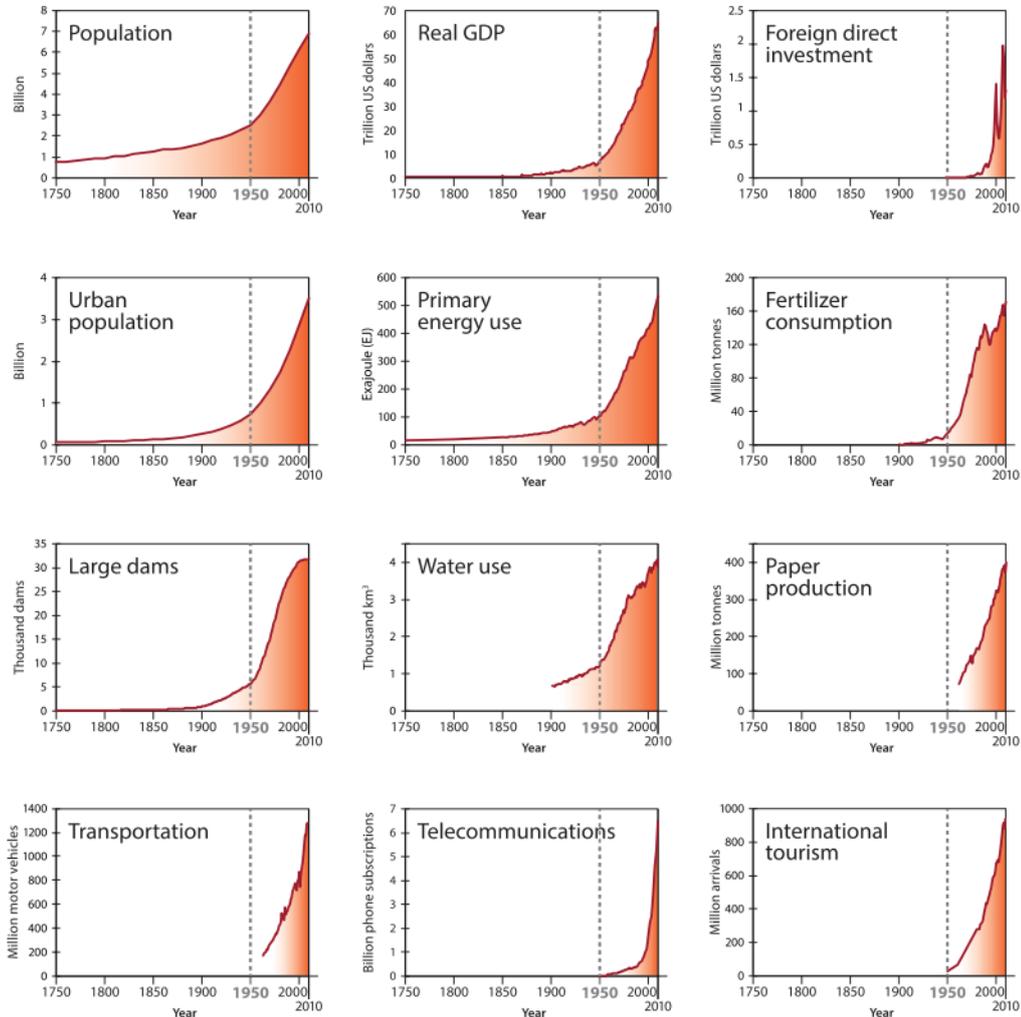
2.1 O dilema dos combustíveis fósseis e as mudanças climáticas: a leitura pelos Acordos Internacionais com foco no processo de descarbonização

A Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, caracterizou-se pelo desenvolvimento tecnológico (por exemplo, máquina a vapor) e pelo uso intensivo do carvão. A revolução alterou localmente a dinâmica social, política, econômica e ambiental e, posteriormente, alastrou-se para os demais países. Desde o início dessa revolução, houve uma melhoria na qualidade de vida de algumas pessoas, ocasionada pelo uso da energia, do saneamento, da habitação e da formação profissional de uma sociedade a partir do ensino (SANTOS, 2009). Especificamente em relação aos recursos energéticos, ocorreu um movimento intenso de substituição da utilização do carvão vegetal e lenha pelo carvão mineral, o que proporcionou um ganho de eficiência e produtividade nas fábricas (PEARSON; FOXON, 2012). No entanto, isso acarretou problemas ambientais, como a intensificação da poluição atmosférica decorrente das atividades industriais (KASA, 2009).

Durante o século XIX, esses avanços tiveram um outro impulso com a Segunda Revolução Industrial e seus desdobramentos, culminando no desenvolvimento de novas tecnologias que induziram os modos manufaturados de produção, assim como a ascensão de meios de escoamento de produção, como os trens, por exemplo. Dessa forma, diversas consequências sociais, econômicas e políticas também marcaram este período. Em relação às questões energéticas, o crescimento no consumo de petróleo, de motores à combustão e de eletricidade caracterizaram esse período (FOUQUET; PEARSON, 2012).

As primeiras décadas do século XX foram marcadas por duas guerras mundiais (a primeira, de 1914 a 1918, e a segunda, de 1939-1945) e a Grande Depressão (1929), o que resultou em uma estagnação na economia (SANTOS, 2009). No entanto, a partir da Terceira Revolução Industrial, principalmente a partir da década de 1950, ocorreu uma aceleração vertiginosa sem precedentes no crescimento mundial relacionado aos aspectos socioeconômicos (STEFFEN *et al.*, 2004; 2015). A partir de então, houve um crescimento populacional acentuado, intensificado em conjunto com o registro da ampliação da atividade econômica mundial, como pode ser observado na Figura 1 (STEFFEN *et al.*, 2004; 2015).

Figura 1: Gráficos de índices relacionados ao desenvolvimento da sociedade e sua interação com recursos energéticos entre 1750-2010. Em geral, todos eles apresentam grandes taxas de crescimento a partir de 1950 (ano marcado pela linha tracejada)



Fonte: Steffen *et al.* (2015, p. 84)¹.

Um outro marco da Terceira Revolução Industrial foi o progresso das telecomunicações, diretamente relacionado ao processo da globalização (SANTOS, 2009). Alguns índices apresentados na Figura 1 fomentam estas afirmações, como o crescimento dos índices de investimento estrangeiro direto e turismo internacional (STEFFEN *et al.*, 2015). Há uma profunda modificação da distribuição territorial, evidenciada pela ampliação dos indicadores

¹ Tradução: *Population* (população em bilhões de pessoas), *Real GDP* (PIB, Produto Interno Bruto em trilhões de dólares americanos), *Foreign direct investment* (investimento estrangeiro em trilhões de dólares americanos), *Urban population* (população urbana em bilhões de pessoas), *Primary energy use* (uso primário de energia em Exajoules (EJ)), *Fertilizer consumption* (consumo de fertilizantes em toneladas), *Large dams* (grandes represas em milhares de unidades), *Water use* (uso de água em milhares de km³), *Paper production* (produção de papel em milhões de toneladas), *Transportation* (transportes em milhões de veículos motorizados), *Telecommunication* (telecomunicações em bilhões de assinaturas de telefone), *International tourism* (turismo internacional em total de chegadas)

de transporte (número de veículos motorizados) e urbanização (população urbana) no período analisado. Destaca-se que, em 2008, em nível global, a população urbana ultrapassou a rural (SETO; ROBERTO; FRAGKIAS, 2010).

Todos os índices supracitados se apresentam como evidências da alta velocidade e intensidade das modificações ocorridas por meio das ações antropogênicas, do aumento do uso de fontes primárias de energia e, conseqüentemente, das emissões de gás carbônico (CO₂) e outros gases de efeito estufa, como o metano e os óxidos nitrosos. Na década de 1950, a quantidade de emissões por queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, superou aquelas causadas pelo uso da terra, que até então eram dominantes (QUÉRÉ *et al.*, 2018). Ressalta-se ainda que, entre 1750-1995, o período até 1950 foi responsável por apenas 25% das emissões totais de CO₂, enquanto o intervalo entre 1950 e 1995 representou 75% desse montante total (ANDRES *et al.*, 1999), reforçando a aceleração das atividades humanas e seus impactos no meio ambiente.

O crescimento das atividades antrópicas também tem demonstrado um aumento nos índices de desmatamento, de temperatura da superfície e de acidificação dos oceanos (STEFFEN *et al.*, 2015). Todas as atividades levantadas direcionam para a discussão atual sobre a relação entre as atividades humanas e as mudanças climáticas. Para tanto, inúmeros estudos específicos se voltam à essa discussão, como a percepção a partir dos *stakeholders* e conseqüências e adaptações às alterações do clima, inclusive nos países em desenvolvimento, nos quais há uma preocupação necessária em relação aos setores de agricultura e produção de energia (BRINI, 2021; CAO, 2020; FUNATSU *et al.*, 2019; GODDE *et al.*, 2021; TAN *et al.*, 2021).

Na década de 1970, começaram a surgir ações imediatas e mundiais referentes aos impactos gerados pela humanidade na natureza e na utilização desorientada dos recursos. O primeiro evento mundial que trouxe como foco a importância da relação entre o homem e o meio ambiente foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (mais conhecida como a Conferência de Estocolmo), em 1972. Essa Conferência foi um momento pioneiro, pois o homem foi colocado como um agente modificador do ambiente ao qual pertence (UN, 1972). De acordo com o Capítulo I do relatório final da Conferência:

O homem é ao mesmo tempo criatura e modelador de seu ambiente que lhe dá sustento físico e proporciona para ele a oportunidade de crescimento intelectual, moral, social e espiritual. Na longa e tortuosa evolução de raça humana neste planeta, um estágio foi alcançado quando, por meio da rápida aceleração da ciência e tecnologia, o homem adquiriu o poder de transformar seu ambiente de inúmeras maneiras e de uma forma sem precedentes em

relação à escala. Ambos os aspectos do ambiente do homem, tanto o natural quanto o feito pelo homem, são essenciais para o seu bem-estar e para o gozo de direitos humanos básicos - mesmo o direito para a própria vida. (UN, 1972, p. 3, tradução nossa).

Apesar de a Conferência de Estocolmo não ter tido como foco as mudanças climáticas, e sim a poluição e os níveis de extração de recursos naturais, com ela iniciou-se uma conscientização da importância do equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, o crescimento populacional e a apropriação do meio ambiente (UN, 1972).

Em 1988, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*), com o objetivo de reunir estudos científicos e industriais sobre mudanças climáticas, aquecimento global e suas consequências junto a medidas necessárias para uma reversão do cenário atual. Para responder a esse objetivo e contribuir com a disseminação dessas informações, cinco relatórios de avaliação e previsão de futuros cenários foram publicados (IPCC, 1990; 1995; 2001; 2007; 2014), e um sexto relatório está previsto para 2022. Algumas edições especiais com foco em temáticas específicas têm sido publicadas, tais como: ambiente dos oceanos (IPCC, 2019a), mudanças e consequências do manejo da terra (IPCC, 2019b) e necessidade de ações mais concretas para que o aumento da temperatura da Terra não seja maior que 1,5°C em relação aos níveis da pré-revolução industrial (IPCC, 2019c).

Em 1992, no Rio de Janeiro (Brasil), ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (conhecida por Eco-92 ou Rio-92), a qual introduziu para todas as nações, além daquelas já estabelecidas no grupo G-7², o termo de desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA, 2011). Alguns dos temas colocados em discussão pela Eco-92 se concentraram na cooperação para o desenvolvimento econômico, o combate à pobreza, melhorias na qualidade do ar e água, a proteção de áreas naturais e da biodiversidade, a diminuição da emissão de poluentes e o debate sobre as mudanças climáticas (NOVAES, 1992; ONU, 1992). A noção de desenvolvimento sustentável aparece, portanto, como uma tentativa de superar a dicotomia entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental (CNO RIO +20, 2012). Ainda nesse cenário, criou-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*), com o objetivo de atingir as concentrações de gases de efeito estufa para níveis reversíveis e condizentes com o desenvolvimento sustentável (MMA, 2018).

² Os países que compõem o G-7 são Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Japão e Reino Unido.

Em 1997, criou-se o primeiro tratado internacional com o compromisso da redução de emissão de gases de efeito estufa, na Terceira Conferência das Partes³. Esse acordo ficou conhecido como Protocolo de Kyoto e estipulou uma redução de 5,2% na emissão de gases de efeito estufa em países desenvolvidos – quando comparado ao valor emitido em 1990 – para o período entre 2008 e 2012 (WIGLEY, 1998). Além disso, o Protocolo dispôs do mecanismo de mercado chamado de Créditos de Carbono, apesar de a introdução da ideia de cotas comercializáveis de emissão de carbono já ter ocorrido um ano antes, na Segunda Conferência por Partes (CRISTINA; SOUZA; CORAZZA, 2017; VIOLA, 2002). Com isto, a partir do limite estipulado, as indústrias que ultrapassassem os níveis de emissão de carbono permitidos deveriam comprar créditos de carbono e, portanto, esse instrumento de mercado fora pensado para promover o estímulo a mitigação das emissões (ANDRADE; COSTA, 2008).

Em 2002, a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, também chamada de Rio +10, ocorreu na África do Sul. Nela, os líderes das Nações Unidas realizaram um levantamento das iniciativas realizadas pelos países desde o último encontro (ECO-92). Além disso, foram retomadas as discussões para as futuras ações que facilitariam a implantação de medidas efetivas frente às questões de desenvolvimento social, econômico e ambiental. Algumas das demandas envolviam ainda as mudanças climáticas, emissão de poluentes, proteção das águas, destruição da camada de ozônio, uso do solo, resíduos perigosos, proteção da biodiversidade, mitigação da miséria e pobreza, cumprimento dos direitos humanos, entre outros (DINIZ, 2002). Sequinel (2002) pontua que esse encontro permitiu a ponderação do agravamento da situação ambiental e das poucas realizações feitas desde o Rio-92. O autor ainda enfatiza o alto nível de discordâncias entre as nações e da importância das ações da sociedade civil para atingir os objetivos estipulados, além de salientar a relevância do Brasil na apresentação de propostas como o aumento do uso de fontes renováveis na matriz energética e a iniciativa de reunir os países com alta biodiversidade de fauna e flora para a discussão de planos estratégicos de preservação (SEQUINEL, 2002).

Em 2012, a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável ocorreu novamente no Rio de Janeiro. Nela, os países das Nações Unidas organizaram uma agenda de ações diretas para as décadas seguintes, as quais envolvessem os campos do desenvolvimento econômico junto ao desenvolvimento sustentável, à erradicação da pobreza e à coordenação das instituições internacionais para ações multilaterais (CNO RIO +20, 2012).

³ Desde 1995, são realizadas anualmente as chamadas Conferências das Partes (COP) da UNFCCC para que sejam discutidas as regras e implementação da Convenção (CNO RIO +20, 2012). A única exceção ocorreu recentemente, quando a COP 26 foi adiada em um ano devido à pandemia da Covid-19.

Em setembro de 2015, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (AGNU) adotou a Agenda 2030, com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas distribuídas entre eles. Esse compromisso objetiva a garantia do desenvolvimento sustentável na área econômica, social e ambiental, com avanços previstos até o ano de 2030. Em relação aos ODS, destaca-se, para fins dessa pesquisa, os objetivos #7 (energia acessível e limpa) e #13 (combate às alterações climáticas) (ONU, 2015). No entanto, é aconselhável que todos os objetivos e metas sejam observados e acompanhados de modo uniforme e indivisível, já que em muitos casos pode haver sinergia e oportunidades de avanços em cooperação de certas áreas, ou até mesmo *trade offs* necessários. Ademais, essa verificação do grau de sinergia deve ser realizada dentro do contexto de cada país devido a suas particularidades que acabam gerando diferentes interações (BREUER; JANETSCHEK; MALERBA, 2019; PRADHAN *et al.*, 2017). Nesse sentido, a utilização de indicadores que reflitam as características socioeconômicas e ambientais de cada região é uma ferramenta relevante para o acompanhamento do avanço dessas metas, segundo os objetivos alinhados, e para a realização de ações integradas (SCHMIDT-TRAUB *et al.*, 2017).

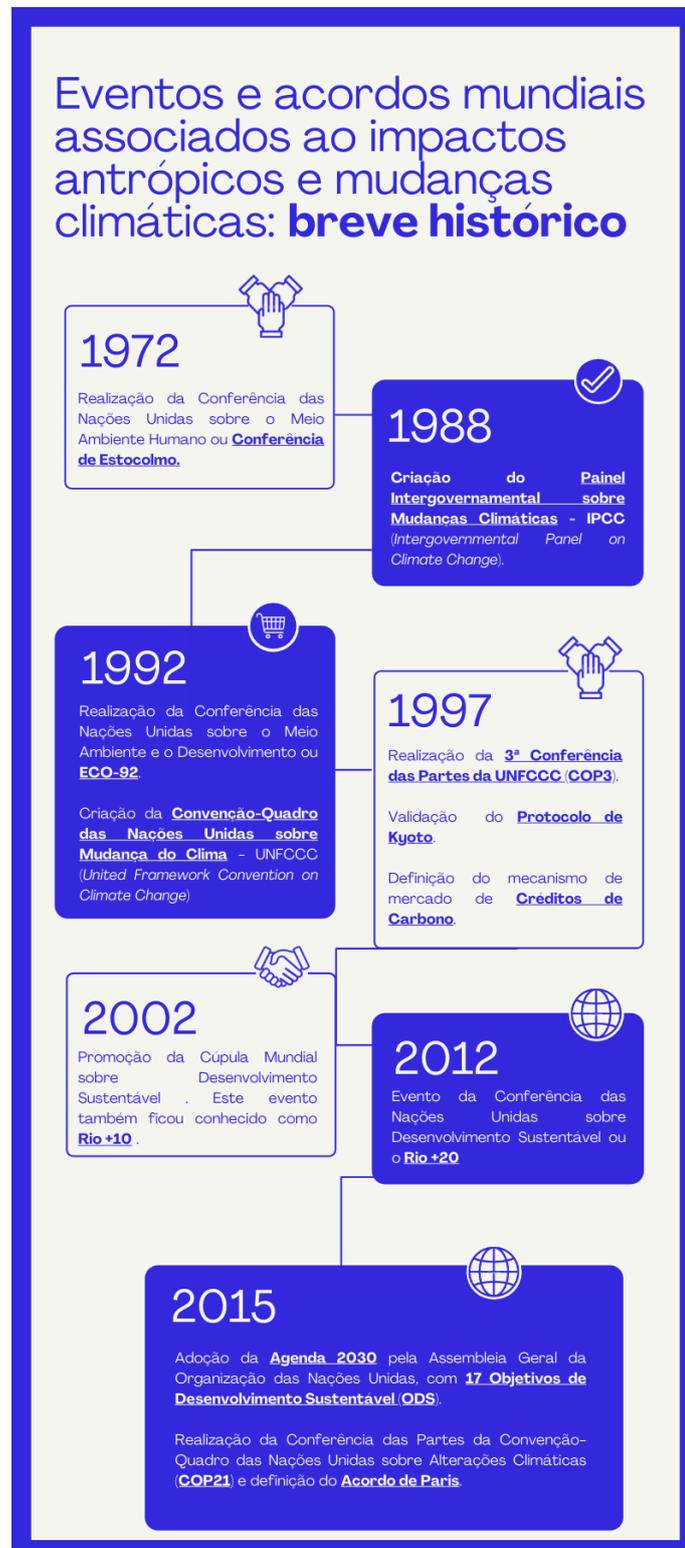
Um último evento a ser considerado nesse capítulo é a Vigésima Primeira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (COP21). A COP21 ocorreu em 2015 e é considerada particularmente relevante para o escopo deste trabalho, uma vez que influenciou muitas das metas e iniciativas dos últimos anos relacionadas às mudanças climáticas e ações individuais de cada país. O evento, ocorrido em Paris, teve como objetivo a elaboração de um acordo (que posteriormente foi nomeado Acordo de Paris), que complementaria os compromissos da Agenda 2030 entre os países partes da UNFCCC. O Acordo de Paris centrou-se em discussões e metas para que o aquecimento global se mantivesse abaixo dos 2°C nos anos seguintes, além de colocar esforços para que o aumento da temperatura não ultrapassasse em 1,5°C os níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Para tanto, todos os países devem fazer altos investimentos para alcançar essas metas. Vale ressaltar, no entanto, o papel dos países em desenvolvimento nesse contexto, os quais são mais afetados devido aos efeitos das mudanças climáticas. Algumas das características que ressaltam essa afirmação são a instabilidade política, a falta de recursos para investimento, a necessidade de aprimoramento regulatório e uma lacuna em relação à sistematização dos dados relevantes para o tema (RELVA *et al.*, 2021).

Como resultado do Acordo de Paris, os países signatários publicaram documentos próprios, de acordo com as suas particularidades, denominado de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC – *Nationally Determined Contributions*). O Brasil, por exemplo, se

comprometeu a reduzir as “emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025”, e “em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030” (BRASIL, 2015, pp. 1-2). Para tanto, uma das principais iniciativas propostas na NDC brasileira foi o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética, como a eólica e a solar. Em 2020, houve a atualização da NDC e reafirmação dos compromissos anteriormente já propostos, com o indicativo de neutralidade de emissões líquidas de carbono até 2060 (a depender do funcionamento dos mecanismos de mercado associados ao Acordo de Paris).

A Figura 2 sintetiza todos os eventos e acordos mundiais, acima mencionados, para a construção da avaliação dos impactos humanos e as consequências frente ao meio ambiente, além de compromissos e ações coordenadas para mitigá-los ou adaptá-los.

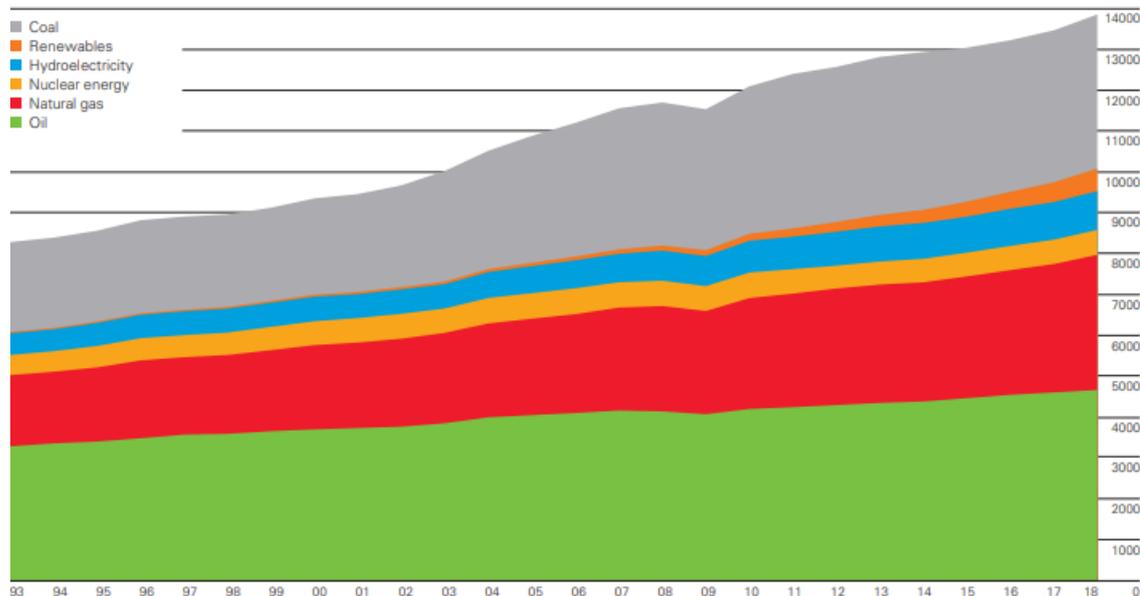
Figura 2: Eventos e acordos mundiais para discussão de propostas e análise das ações relacionadas aos impactos antrópicos e às mudanças climáticas.



Fonte: Elaborado pela autora.

A matriz energética brasileira já apresenta uma alta contribuição de renováveis quando comparada ao restante do mundo – o percentual da contribuição brasileira é de cerca de 43%, ao passo em que o percentual do restante do mundo não ultrapassa os 20% (ENERDATA, 2018). Em âmbito global, as maiores fontes de emissões de gases estufa estão relacionadas ao setor energético (produção de eletricidade e calor) e ao setor de transportes, que juntos produziram cerca de 70% de CO₂ emitido no mundo no ano de 2014 (RITCHIE; ROSER, 2017). Ilustrando esse fato, a Figura 3 mostra a evolução do consumo mundial de energia entre o período de 1993 a 2018, demonstrando a grande dependência sobre os combustíveis fósseis. Observa-se também o aumento do consumo de energia, do consumo por meio de fontes renováveis e do gás natural, além de uma pequena taxa de elevação na demanda por petróleo. Essa conjuntura de dados demonstrados apresenta alguns aspectos considerados positivos no progresso da diminuição de gases de efeito estufa pelo setor energético. No entanto, o consumo de carvão se apresenta como um fator na contramão deste processo, pois houve um crescimento vertiginoso no em seu consumo durante o período observado.

Figura 3: Consumo de energia mundial em milhões de toneladas de óleo equivalente (toe). As cores representam as diversas fontes primárias de energia.



Fonte: BP (2019, p. 10)⁴.

⁴ Tradução da Figura 3: *Coal* (Carvão Mineral), *Renewables* (Fontes renováveis), *Hydroelectricity* (Hidroeletricidade), *Nuclear Energy* (Energia Nuclear), *Natural Gas* (Gás Natural), *Oil* (Petróleo).

Por relacionar as preocupações da interferência do homem na dinâmica do meio ambiente e os aspectos de desenvolvimento econômicos das nações, o setor energético é considerado um ponto chave na discussão. Ao mesmo tempo em que o setor se apresenta como uma das maiores fontes de emissão de gases de efeito estufa devido às altas proporções de combustíveis fósseis e derivados em sua utilização, também é um setor que, em geral, está relacionado com o desenvolvimento do país, haja vista a notável causalidade bilateral entre consumo de energia e crescimento econômico a longo prazo (PAO; TSAI, 2010).

Na tentativa de estimular o encontro de soluções que alcancem o equilíbrio entre os setores econômico, social e ambiental para a aquisição de energia, o Conselho de Energia Mundial (WEC – *World Energy Council*) tem explorado em alguns de seus relatórios, desde 2008, os aspectos do trilema energético, isto é, segurança energética, sustentabilidade ambiental e equidade energética (WEC, 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2018; 2019). Nesse sentido, as medidas relacionadas ao trilema energético devem ser tomadas junto aos campos tecnológico-científico, poder público, sociedade civil e indústrias. Em relação ao poder público, os aspectos de sustentabilidade ambiental e social, eficiência e segurança energética⁵ são os três eixos principais das políticas públicas energéticas que devem ser balanceados conforme a realidade específica de cada localidade (MOCARQUER *et al.*, 2009).

A comunidade científica ou epistêmica também é um ator fundamental desse processo, promovendo discussões sobre as soluções para alcançar o equilíbrio no setor energético. Di Silvestre *et al.* (2018), por exemplo, propõem a integração de 3D's (descentralização, descarbonização e digitalização). Outros autores ainda acrescentam outros D's como democratização (CONNOR; FITCH-ROY, 2019), diminuição de consumo, regulamentação (*deregulation*) e ruptura (*disruption*) (SOUTAR, 2019). Por sua vez, os 3D's fazem parte de um contexto ainda maior, denominado de transição energética, que tem sido o principal sujeito das discussões das últimas duas décadas no setor energético. Ainda, reforça-se que a transição energética em larga escala dos combustíveis fósseis para as renováveis tem indicado a necessidade de integração entre todos esses D's (SMIL, 2010). Na presente dissertação, a relação entre a descarbonização e a transição energética é o alvo de investigação.

⁵ Em especial, dentre uma diversidade de designações, a segurança energética pode ser definida como a garantia da continuidade do fornecimento de energia, quer seja em termos da *commodity* (que é a fonte energética), o serviço que ela proporciona, e/ou aspectos econômicos (ANG; CHOONG; NG, 2015; WINZER, 2012). Para além disso, diferentes relatórios governamentais e artigos científicos tratam o tema como “questão chave” em políticas energéticas e apresentam vários desafios para o século atual (ESCAP, 2008; GUNNINGHAM, 2013; IEA, 2007; KRUYT *et al.*, 2009; MARKOVSKA *et al.*, 2016; WEC, 2014).

2.2 A transição energética rumo à descarbonização

A transição energética é um termo que tem sido conceituado e assimilado por diferentes abordagens e autores (FOUQUET; PEARSON, 2012; HIRSH; JONES, 2014; MILLER; RICHTER; O'LEARY, 2015; O'CONNOR, 2010; SMIL, 2016; SOVACOOOL, 2016). Na definição de Peter A. O'Connor (2010), a transição energética ocorre por meio de qualquer mudança relacionada às fontes de energia primária, transporte, conversores e serviços, os quais compõem as diferentes etapas da cadeia energética. Já para Fouquet e Pearson (2012), o termo, de uma maneira mais ampla, engloba a mudança de um sistema econômico predominante e dependente de um tipo de fonte de energia para outro, envolvendo questões históricas, econômicas, sociológicas, geográficas, além dos aspectos da engenharia. Por sua vez, Hirsh e Jones (2014) entendem a transição energética não apenas como um processo de mudança de um combustível para outro e suas novas tecnologias, mas também alterações mais pontuais, como a descentralização de geração elétrica, a construção de plantas geradoras de eletricidade mais eficientes e o acesso a fontes de energia por populações de menor renda. Contudo, para uma compreensão do processo de transição energética é necessário definir algumas premissas, por exemplo as etapas da cadeia energética que esse processo atingiu ou pode atingir, a sua magnitude geográfica (regional, nacional, mundial) e os setores/mercados da economia que são impactados (SOVACOOOL, 2016).

Além das definições supracitadas, um tema amplamente abordado na literatura são os “motores” que impulsionaram as transições energéticas no passado e que também influenciarão nas futuras transformações. Fouquet (2010) e O'Connor (2010) argumentam em suas publicações que as novas tecnologias são determinantes nesse processo de transição energética. Mas, para que essas tecnologias sejam largamente dispersadas, há um processo de amadurecimento desde a criação e início da produção unitária – uma etapa voltada a experiência, aprimoramentos e padronização, que nos últimos anos vem apresentando uma duração mais curta – até a escala industrial (GRUBLER, 2012; WILSON, 2012).

Vale ressaltar que o progresso acima mencionado refere-se especialmente às primeiras fases do desenvolvimento tecnológico, que por sua vez requer um contínuo investimento (FOUQUET, 2010; GRUBLER, 2012). Em dois de seus diversos artigos sobre o tema, Fouquet (2010; 2016) aponta que as novas tecnologias impulsionadoras, em geral, se mostravam capazes de realizar os mesmos serviços que suas antecessoras. No entanto, o que as diferenciavam das precursoras eram características superiores ou adicionais que fizeram com que pelo menos um

certo nicho de consumidores pagasse por isso. Indiretamente, isso auxilia no processo de diminuição dos preços e de ampliação da dispersão de tal tecnologia no mercado consumidor.

A solução tecnológica, porém, não é suficiente para compreender como e em quanto tempo as futuras transições energéticas irão ocorrer (GRUBLER; WILSON; NEMET, 2016). Além de tecnologias inovadoras, outros motores do processo de transição energética decisivos são elencados por alguns autores (FOUQUET; PEARSON, 2012; O'CONNOR, 2010), tais como: demanda e usos finais do mercado consumidor; fornecimento da fonte de energia; aspectos culturais dos consumidores; eficiência na performance; aspectos econômicos; decisões governamentais e políticas públicas. Destaca-se, ainda, a pré-existência de infraestrutura mínima necessária para o suprimento de energia, quer sejam dutos, fios de alta tensão ou outros. Isso é importante nos futuros caminhos da transição energética, pois esses são aspectos que podem apresentar desafios em relação à viabilidade e aos custos iniciais de capitalização e operação da infraestrutura para comportar fontes energéticas alternativas advindas de uma transição (FOUQUET; PEARSON, 2012; GILLESSEN *et al.*, 2019; O'CONNOR, 2010).

Assim como O'Connor (2010), autores como Miller, Iles e Jones (2013) e Modi *et al.* (2005) enfatizam a relevância dos aspectos sociais, uma vez que a população está conectada completamente ao contexto dos sistemas energéticos. Por um lado, na percepção do consumidor, o aspecto mais relevante é o serviço e não as emissões dos recursos energéticos (MODI *et al.*, 2005; O'CONNOR, 2010). Logo, pontua-se que as futuras ações devem considerar esses aspectos. Por outro lado, Miller, Iles e Jones (2013) defendem uma perspectiva em que os atores da sociedade se apresentam mais atentos aos impactos da construção de infraestruturas e das atividades de produção e da exploração de recursos energéticos.

Nesse sentido, o processo de transição energética não pode ser resumido apenas a um fator, mas a um conjunto deles, quer sejam de influência de uma nação ou de um contexto geopolítico internacional (SOVACOOL, 2016). O contexto e as características do sistema energético atual também são peças-chaves para o planejamento das transições energéticas futuras (GONZÁLEZ, 2018). Para exemplificar esses aspectos a nível internacional, pode-se considerar: (i) a depleção dos reservatórios de petróleo; (ii) as tecnologias associadas às fontes renováveis; (iii) a matriz energética dos países produtores de tecnologias renováveis, i.e., painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, e (iv) as características de intermitência das fontes renováveis que necessitam da complementação de tecnologias de armazenamento (ZERRAHN; SCHILL, 2017).

A duração das transições energéticas é um outro fator determinante para a sua compreensão. Em geral, e apesar de algumas discordâncias, as transições energéticas são vistas

como processos de longa duração (FOUQUET, 2010, 2016; GRUBLER; WILSON; NEMET, 2016; SMIL, 2014, 2016). De acordo com Smil (2014), o avanço no consumo do carvão em substituição à lenha demorou décadas para ocorrer, assim como ocorreu com o petróleo, substituído pelo carvão mineral, e como está ocorrendo com o gás natural e energias renováveis na tentativa de diminuir as emissões de gases de efeito estufa e garantir o fornecimento de energia. O carvão mineral, o petróleo e o gás natural demoraram cerca de 60 anos para evoluir de 5% para 50%, 40% e 25%, respectivamente, na composição da matriz energética global (SMIL, 2014). Diante desse histórico, compreende-se que ainda é lenta a ascensão das renováveis a nível global nos últimos anos, o que fez Smil (2014) considerar que as transições energéticas em âmbito mundial são processos longos e, até então, não há nenhuma clara razão técnica ou financeira que possa romper com essa inércia.

No entanto, essa visão única de durações longas foi questionada pelo próprio autor, que acrescentou, posteriormente, o aspecto geográfico nessa análise. Smil (2016) pontua que, apesar do tempo de uma transição energética mundial ser gradual e lenta, quando vista em nível nacional, a duração é reduzida e pode variar entre poucos anos até mais de um século. A existência de diversos períodos para alcançar níveis avançados de transição também é reiterada pelo ponto de vista de Benjamin Sovacool (2016). O autor menciona que as transições energéticas apresentam diferentes períodos de ocorrência, podendo ser curtas ou longas – por exemplo, ao citar, respectivamente, a ascensão do carro *flex* no Brasil, a qual durou 5 anos, e a mudança do recurso madeira para o carvão durante décadas (SOVACOOOL, 2016). Grubler, Wilson e Nemet (2016) admitem a importância da discussão de Sovacool (2016) sobre períodos mais curtos, mas também chamam atenção para a necessidade do redirecionamento do foco para o que é preciso, a fim de que ocorra a aceleração deste movimento a nível global, levando em consideração todas as complexidades anteriormente citadas.

Diante desse cenário, o atual debate sobre a transição energética decorre, principalmente, da urgência para a promoção da descarbonização e do desenvolvimento sustentável frente às mudanças climáticas, os quais apresentam-se como os dois grandes motivadores para a aceleração dessa transição. Os acordos mundiais realizados sobre as mudanças climáticas, as limitações de emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa devem estimular as escolhas dos combustíveis que detenham menor intensidade de CO₂, como o gás natural, por exemplo (O'CONNOR, 2010). No entanto, essa pulsante preocupação sobre a continuação do uso de combustível fóssil, mesmo que menos poluente, deve ser integrada a outros aspectos fundamentais de uma nação, como a sua segurança energética.

O investimento constante e a persistência do governo em políticas energéticas e ambientais a longo prazo se tornam fundamentais, sem que haja uma interferência nas escolhas, a partir do que Smil (2014) chama de “modismos” (GRUBLER, 2012; SMIL, 2014). A diminuição do consumo e a entrada de externalidades ambientais sobre os preços dos combustíveis podem auxiliar no processo de diminuição do uso de combustíveis fósseis, uma vez que impactam diretamente o mercado de energia (SMIL, 2014).

Para reforçar o que foi exposto até aqui, Pearson e Foxon (2012) explanam sobre lições aprendidas a partir das Revoluções Industriais que podem servir para uma transição energética focada na descarbonização. Os autores concluem que é necessário que os avanços de tecnologias de baixo carbono atinjam os benefícios econômicos para que haja a sua dispersão, da mesma forma que ocorreram nos eventos passados (PEARSON; FOXON, 2012). Ademais, algumas questões ainda a serem consideradas concentram-se nas características das inovações tecnológicas (ganhos no custo, produtividade, diversificação nos usos), o papel das políticas públicas para a aceleração desse processo, a interação entre mercados e instituições nesse complexo *framework* e estudos mais avançados que detalhem o contexto, os desafios e as oportunidades das Revoluções Industriais (PEARSON; FOXON, 2012).

Todavia, o processo de descarbonização das atividades não é algo simples, mas um dos grandes desafios do século XXI (MARKOVSKA *et al.*, 2016). Segundo Papadis e Tsatsaronis (2020), alguns dos pontos mais sensíveis para o alcance das metas de descarbonização são: (i) intensivo capital necessário para a construção da infraestrutura; (ii) as inconsistentes políticas ambientais; (iii) alta competitividade das opções já disponíveis para a redução de emissão de gases de efeito estufa, o que acaba interferindo na competitividade de novas tecnologias; (iv) problemas políticos (*lobbies*, populismo, exumação de impostos e corrupção) e (v) falta de incentivo na mudança de hábitos da humanidade.

Outro ponto de relevância trazido por Papadis e Tsatsaronis (2020) é a necessidade de se alcançar as possíveis ações de descarbonização do setor energético nos diferentes níveis da cadeia. Em primeiro lugar, pode-se citar a substituição de combustíveis na geração de fontes secundárias de energia. No caso da geração de eletricidade, tem ocorrido uma maior entrada de fontes renováveis nos últimos anos, e é nessa direção que os países que aderiram ao Acordo de Paris têm apostado: na redução de gases de efeito estufa e suas respectivas tentativas de cumprimento das metas. Além dessas, outras alternativas adotadas são a adoção de plantas termelétricas mais eficientes, a utilização de usinas nucleares e a implantação das tecnologias de baixo carbono, como *Carbon Capture and Storage* (CCS) ou *Carbon Capture and Utilization* (CCU) (QUARTON; SAMSATLI, 2020).

No caso da geração de energia térmica, seja para climatização de ambientes ou aquecimento de água, a utilização de cogeração por meio de gás natural, de biogás advindo de aterros sanitários ou de usinas biodigestoras é considerada, atualmente, uma solução palpável para o processo de descarbonização, principalmente na China e em alguns países da Europa (SCHÜTTE, 2017). Os aquecedores solares e elétricos também têm se tornado opções viáveis para a diminuição de emissões de CO₂, desde que a matriz seja composta de fontes limpas. Por fim, na categoria de geração de combustíveis sintéticos e derivados de petróleo, o processo de descarbonização pode ser realizado por meio da utilização de biomassa para produção de biocombustíveis e fontes renováveis para a produção de hidrogênio, que se torna um substituto para o carvão mineral ou gás natural (PAPADIS; TSATSARONIS, 2020). Em relação ao uso de combustíveis fósseis, Chen e Kim (2019) sugerem a ampliação da transição energética para os produtos não-energéticos – por exemplo, o uso de gás natural para produção de amônia ou nafta para indústria petroquímica -, uma vez que essa área não tem tanta atenção para medidas de eficiência, mas se destaca em relação à contribuição das emissões de gases de efeito estufa.

A partir da avaliação do final da cadeia energética, isto é, os usos finais de energia, destaca-se o potencial na promoção da descarbonização. Para tanto, alguns campos que devem ser explorados são a eficiência energética, aspectos de política pública (quer seja por regulação ou certificações) e mudanças no comportamento social. Como exemplos específicos, pode-se citar: as certificações de eficiência energética na climatização de construções; a eficiência, eletrificação e/ou substituição por células combustível em veículos de frota leve; a reavaliação sobre os comportamentos de alimentação e geração de lixo da sociedade; a utilização de bioquerosene em aviões e a utilização de plantas de cogeração eficientes (PAPADIS; TSATSARONIS, 2020).

Em meio às diversas frentes de ação para a descarbonização, Gürsan e Gooyert (2021) reforçam o papel do gás natural como um combustível que pode auxiliar e compor o processo de transição energética para fontes renováveis. Dentre as vantagens, os autores citam a complementação frente à intermitência de fontes renováveis, a garantia de confiabilidade na oferta de energia e a afirmação da acessibilidade em investimentos e preços ao consumidor (GÜRSAN; DE GOOYERT, 2021). No entanto, Gürsan e Gooyert (2021) também levantam a possibilidade de que os investimentos nesse insumo atrasarem a implementação de renováveis. Portanto, é de grande importância avaliar os sistemas energéticos para que haja o reconhecimento de oportunidades e desafios. Ressalta-se, ainda, a grande versatilidade de usos finais do gás natural, bem como a sua inserção nos diferentes setores da economia e a diversidade que ele atinge nas matrizes energéticas dos vários países.

Assim, toda a discussão aqui exposta acaba por refletir em um potencial maior ou menor de alcance das metas de descarbonização e de acordos, principalmente internacionais (TSAFOS, 2020). Nos próximos tópicos são abordados tanto os diversos usos e impactos do gás natural nos setores como o aumento da sua participação na matriz energética brasileira nas últimas décadas.

2.3 Gás natural, utilização e impactos

O gás natural é uma mistura de vários gases hidrocarbonetos, incluindo metano (entre 70% e 90%), etano, propano, butano e pentano, bem como CO₂, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio, podendo variar amplamente devido às condições de cada reservatório geológico e do seu processo de gênese (IEA, 2011). Esse tipo de composto tem origem na decomposição de matéria orgânica presente nas rochas geradoras e que, em certas condições, migram para outras formações, chamadas de rochas reservatório, nas quais o gás natural fica armazenado em poros pré-existentes e preso por outra rocha selante, isto é, que não permite a passagem dos gases para a superfície.

Em relação a sua aplicação, o gás natural apresenta uma série de usos nos diferentes setores econômicos – como industrial, residencial, comercial, de transporte –, podendo compor processos como matéria-prima ou até mesmo ser utilizado como fonte energética. Algumas vantagens associadas ao uso do gás natural são: (i) combustível fóssil com menor impacto ambiental, em especial pela emissão quase nula de materiais particulados e menores concentrações de CO₂ em relação aos outros combustíveis fósseis; (ii) vantagem econômica, pois não necessita de grandes locais de armazenamento nos locais de uso, já que seu transporte e distribuição são feitos por meio de redes, e (iii) apresenta uma maior segurança de operação, por exemplo, em relação ao gás liquefeito de petróleo (GLP), uma vez que o gás natural é menos denso que o ar e, em casos de vazamento, acaba dispersando-se de forma mais fácil do que aquele oriundo do craqueamento do petróleo, o qual acaba concentrando-se próximo ao solo (ABEGÁS, 2019).

O gás natural para geração de energia elétrica é analisado em alguns estudos de caso (GILLESSEN *et al.*, 2019; KERN; SMITH, 2008; VAN FOREEST, 2010), nos quais é possível notar que esse tipo de combustível fóssil reduz a quantidade de emissões de CO₂, quando comparadas à emissão por outros combustíveis fósseis e seus derivados, além de uma menor (ou quase nula) emissão de materiais particulados. Ademais, com o acréscimo da participação de renováveis na matriz elétrica, o sistema elétrico brasileiro apresenta uma menor

confiabilidade devido às crises hídricas e as complicações de preenchimento dos reservatórios ou às intermitências das fontes solares e eólicas, por exemplo, e a necessidade de um *backup*. No entanto, as termelétricas a gás natural apresentam certa flexibilidade no despacho e rapidez na ativação, permitindo que o ajuste entre essas fontes (renováveis e gás natural) atuem em complementariedade e permitam um sistema confiável, com custos adequados e que alcancem as necessidades na redução de emissões (LEE; ZINAMAN; LOGAN, 2012; VAHL; FILHO, 2015). Van Foreest (2010) nos lembra de um papel importante do gás natural, que é sua atuação conjunta em cenários como a instalação de usinas nucleares, termelétricas a carvão ou associadas a outras tecnologias, como o CCS (VAN FOREEST, 2010).

Ainda nessa linha, Najm e Matsumoto (2020) investigam o papel da ascensão do mercado de Gás Natural Liquefeito (GNL) em relação à contribuição das fontes renováveis no consumo do setor energético. Em outras palavras, os autores buscaram avaliar a competitividade entre o GNL e as renováveis. O GNL foi um marco importante e facilitador para a comercialização de gás natural, inclusive entre produtores e consumidores que possam estar separados por longas distâncias. Assim, os autores concluem que há uma diferença nos impactos em relação ao desenvolvimento do GNL de acordo com as particularidades e o momento de desenvolvimento de cada país (NAJM; MATSUMOTO, 2020). As nações pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), composta por EUA, Canadá e alguns países da Europa, apresentam um alto grau de substituição do GNL pelas fontes renováveis, indicando um esforço considerável para a redução das emissões. Já os países não pertencentes à OCDE não apresentam resultados suficientes para demonstrar a substituição para as renováveis, mas o contrário: o aumento de consumo de GNL. Os autores sugerem que isso ocorre devido à necessidade de suprir as demandas energéticas para o desenvolvimento econômico dos países emergentes (NAJM; MATSUMOTO, 2020).

Contudo, não é apenas no nicho de geração elétrica que o gás natural é utilizado. O setor industrial, junto ao elétrico, por exemplo, são as maiores âncoras de demanda de gás natural no Brasil (DELGADO; GAUTO, 2020). O relatório intitulado de Gás para Desenvolvimento, do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), evidencia principalmente o papel da demanda industrial de gás natural como a principal base para o consumo deste energético no país. Isso pode permitir uma importante via para a reindustrialização do país, assim como o fortalecimento da competitividade de setores da indústria (como a química, a siderúrgica, de fertilizantes e de cerâmicas) e dos investimentos necessários para produção de gás natural advindo do pré-sal e de outros reservatórios recentemente descobertos (BNDES, 2021). O setor industrial brasileiro tem um importante papel no processo de descarbonização devido à sua alta

demanda de energia e ao volume emitido de gases de efeitos estufa. Assim, a substituição de combustíveis com altos fatores de emissão (como óleo combustível, coque e carvão) pelo gás natural podem contribuir para a diminuição de emissões (HENRIQUES; DANTAS; SCHAEFFER, 2010).

O uso do gás natural como substituto de outros combustíveis fósseis no setor de transporte também é amplamente estudado. Por um lado, a análise feita por D'Agosto, Ribeiro e Souza (2013) pondera a comparação entre ônibus que utilizam motores à óleo diesel e a gás natural comprimido no estado do Rio de Janeiro. As conclusões foram que a tecnologia utilizada pelos motores exclusivamente a gás natural proporciona uma redução no custo do combustível, um aumento nos custos de operação e uma diminuição de emissão de CO₂ em relação aos motores a diesel. Por outro lado, Mouette *et al.* (2019) avaliaram a substituição do diesel por GNL em caminhões de carga. A conclusão trazida mostrou que, além das vantagens econômicas, há uma redução nas emissões de gases de efeito estufa em 5%, mesmo com o aumento nas emissões de metano e óxido nitroso (N₂O). Ademais, o ganho mais expressivo é observado nas emissões de outros poluidores, como óxidos nitrosos, materiais particulados e hidrocarbonetos (MOUETTE *et al.*, 2019).

Os setores residenciais e comerciais apresentam um baixo consumo de gás natural e não são caracterizados como âncoras da demanda de gás natural, por exemplo, no Brasil (DELGADO; GAUTO, 2020). No entanto, esses mercados consumidores podem ser interessantes para a indústria de gás natural, pois o aquecimento de água compõe uma importante parcela no gasto de energia, em especial do setor residencial, no qual o gás natural pode encontrar espaço para penetração (VAHL; FILHO, 2015). Vale mencionar, porém, algumas barreiras para esse avanço, tais como a volatilidade do preço do gás natural, seu suprimento limitado à algumas regiões e a falta de conhecimento da tecnologia e dos benefícios de eficiência energética (GONZÁLEZ-MAHECHA *et al.*, 2019). Por fim, pode-se citar também o consumo de gás natural para a geração distribuída em estabelecimentos comerciais (MOURA; MARTINS, 2020; SANTOS *et al.*, 2020).

Conforme abordado neste subcapítulo, o gás natural apresenta uma variedade de usos nos diversos setores da economia brasileira. Em algumas áreas, ele é avaliado como um insumo que pode contribuir para o alcance de metas para o desenvolvimento sustentável, enquanto em outras áreas ele é avaliado como um estimulante do aumento nas emissões sem muitos ganhos ambientais. No entanto, é necessária uma avaliação dos diferentes nichos e contextos para uma avaliação mais robusta do impacto do aumento da utilização do gás natural e até mesmo a substituição de outros insumos por este. No próximo tópico é apresentada a evolução da cadeia

logística do mercado de gás natural no Brasil ao longo da história, os eventos que constituem atualmente a oferta total, a infraestrutura e o avanço dos diferentes setores no consumo do gás natural.

2.4 O gás natural no Brasil: marcos históricos e atuais

A história do gás natural no Brasil se inicia com a inserção desse insumo na iluminação pública do Estado do Rio de Janeiro, em 1851, por meio da assinatura de um contrato pelo Barão de Mauá (Irineu Evangelista de Sousa, 28/12/1813 – 21/10/1889). No contrato, firmou-se a condição de construção de uma fábrica para produção de gás natural a partir do carvão e a construção de canalizações para sua passagem com destino ao consumidor final. Pouco tempo depois, em 1854, surgiu a primeira empresa do setor no estado do Rio de Janeiro, denominada Companhia de Iluminação a Gás (MORAES, 2003; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

Em 1865, ocorreu a compra da Companhia de Iluminação a Gás por uma empresa inglesa, alterou o nome para *Rio de Janeiro Gas Company Limited*. Em 1876, os serviços de distribuição de gás foram repassados para a empresa belga *Société Anonyme du Gaz* (SAG), até que, em 1910, a empresa *The Rio de Janeiro Traway Light and Power Company* passou a controlar o capital da distribuidora. Nesse período ocorreu uma importante troca na matéria-prima para produção de gás, quando produtos químicos como a nafta tomam o lugar do carvão mineral. Em 1974, a empresa foi estatizada e veio a se chamar Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG), que atualmente faz parte do grupo de distribuição de gás natural do estado, chamado Naturgy (NATURGY, 2001; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

No estado de São Paulo, o uso do gás natural esteve associado ao desenvolvimento, em especial da cidade de São Paulo, junto ao crescente comércio de café por volta do fim do século XIX e o início da industrialização por meio de iniciativas privadas. Nesse contexto, os serviços públicos também apresentaram uma demanda crescente incluindo os setores de iluminação, transporte e abastecimento de residências, nos quais o gás natural advindo da queima de matérias-primas foi considerado um dos candidatos ao suprimento (BARBOSA *et al.*, 2008; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

Em 1872, inaugurou-se a primeira usina de gás a partir de carvão na cidade de São Paulo, pela companhia londrina *The San Paulo Gas Company Ltda*, que ficou responsável pela iluminação pública da cidade. Basicamente, o carvão era queimado, a fração de vapor era liberada, purificada (retirada do alcatrão presente) e, por fim, o gás era enviado a uma estrutura chamada gasômetro, que auxiliava no gerenciamento da pressão constante nas linhas de

distribuição para a chegada do gás aos pontos de consumo (BARBOSA *et al.*, 2008; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

No entanto, em meio a essa conjuntura e devido às reivindicações populares, às decisões do governo, à falta de reservas de carvão mineral de alta qualidade no Brasil, ao aumento do preço do carvão mineral por decorrência da Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e à existência de um relevo que permitia a abundância de oferta de quedas d'água, a hidroeletricidade acabou sendo favorecida e liderou o mercado de iluminação pública. Nesse contexto, *The San Paulo Gas Company* direcionou sua estratégia de mercado para o setor residencial para consumo de gás (ABRAHÃO, 2009; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

Nas residências, o principal uso do gás natural concentrou-se em fogões. Abrahão (2009) cita o livro “Cozinha Modelo”, de João Luiz Máximo da Silva, no qual o autor descreve a mudança que ocorreu devido à entrada do gás (até então oriundo da queima do carvão) em fogões residenciais em substituição da lenha, que começou a ficar escassa nas proximidades da cidade de São Paulo devido ao processo de urbanização. Em 1912, a empresa *The São Paulo Tramway, Light & Power Company Limited (Light)* incorporou-se à distribuidora de gás e um grande número de propagandas sobre as novas tecnologias de fogão à gás foram divulgadas, sobretudo para as famílias de média e alta renda, visto que a lenha ainda encontrava-se bem competitiva economicamente (ABRAHÃO, 2009; BARBOSA *et al.*, 2008; SANTOS; PEYERL; NETO, 2020).

Destaca-se que, durante o início da distribuição do gás até o ano de 1988, a empresa *The San Paulo Gas Company* – a atual Comgás – distribuía um produto oriundo da nafta ou de outras matérias-primas (MORAES, 2003). Em 1988, o gás distribuído pela empresa era geologicamente oriundo da Bacia de Campos (Rio de Janeiro) e propriamente um combustível fóssil dos reservatórios, não mais um subproduto. Mas, é importante ressaltar que, apesar de o gás utilizado inicialmente não possuir uma procedência geológica, a construção de uma infraestrutura de distribuição foi fundamental para a criação da cultura do uso do gás natural no estado de São Paulo (MOUTINHO DOS SANTOS *et al.*, 2007).

Em relação à oferta, o gás natural foi encontrado pela primeira vez, em 1922, na cidade de Marechal Mallet, no Paraná, antes mesmo que o petróleo, descoberto apenas em 1939 (PEYERL, 2019). Essa cidade é historicamente associada à procura por petróleo no território brasileiro. No entanto, foi apenas com a descoberta e exploração de gás natural e petróleo no Recôncavo Baiano, por volta de 1940, que a introdução do uso do gás natural no Brasil foi estimulada. Apesar disso, o seu uso esteve restrito à produção de insumos e combustíveis para as regiões vizinhas, como Camaçari, que veio a se tornar um importante polo petroquímico do

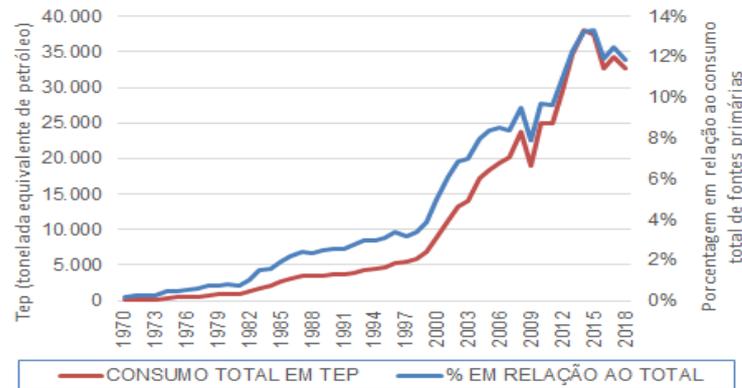
país (MORAES, 2003). Apenas em 1980 foi iniciada a exploração de gás natural na Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro, que em um primeiro momento supriu o mercado local e, aos poucos, se expandiu e se tornou uma fonte para o aumento de gás natural na matriz energética brasileira.

Outro marco importante para o fornecimento de gás natural no país, e que permitiu uma relevante inserção do gás natural na matriz energética, foi o acordo firmado entre o governo da Bolívia e do Brasil para a construção de um gasoduto e fornecimento do gás natural vindo da Bolívia, em 1996. Porém, a sua operação foi iniciada apenas em 1999. Alguns dos objetivos do acordo centraram-se (i) no estímulo a uma industrialização no interior do sudeste do Brasil, (ii) em questões ambientais, principalmente em relação à substituição de óleo combustível e outros combustíveis com altos índices de poluição pelo gás natural, (iii) no suprimento de futuras termelétricas a gás natural e (iv) em uma diversificação do mercado consumidor do gás boliviano, até então enviado apenas para a Argentina (GOSMANN, 2011; ROMITELLI, 2000).

Também em relação ao aumento do fornecimento de gás natural, vale mencionar o impacto da descoberta do pré-sal geológico, o qual apresenta grandes quantidades de gás natural e petróleo na costa sudeste do Brasil. A descoberta do campo de Lula, em 2006, foi um marco para incentivar e confirmar a existência de reservatórios de petróleo e gás natural no pré-sal (NUNES *et al.*, 2017). Por outro lado, a produção de gás natural nesse local apresenta ainda alguns desafios para a sua maior exploração, por conta de alguns aspectos como a distância da costa (e por consequência, a necessidade de altos investimentos para o escoamento), aspectos regulatórios e grandes concentrações de CO₂ associadas (NUNES *et al.*, 2017).

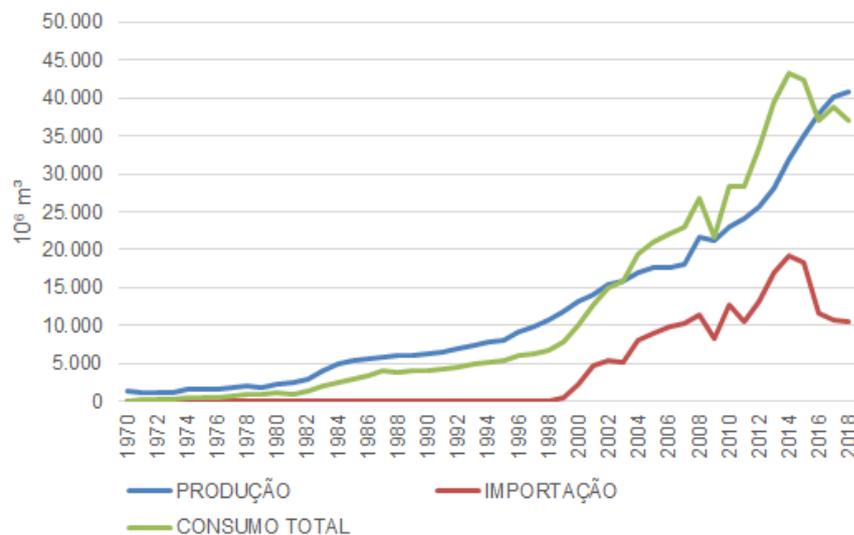
Segundo o Balanço Energético Nacional de 2019 (ano base 2018), o gás natural corresponde atualmente a 12,5% da oferta interna de energia total no Brasil (EPE, 2019a). Durante o período de 1970 a 2018, houve uma tendência crescente no consumo total de gás natural e a sua participação na matriz energética brasileira em relação ao consumo total de fontes primárias renováveis e não renováveis (ver Figura 4). A Figura 5 mostra que o aumento do consumo total de gás natural no mesmo período é sustentado por uma produção nacional, mas também pela importação do gás boliviano. A partir de 2004, quando a curva de consumo e produção nacional se cruzam – isto é, a produção nacional não supre a totalidade do consumo –, a quantia importada torna-se fundamental para o suprimento da demanda de gás natural.

Figura 4: Consumo total de gás natural em toneladas equivalentes de petróleo (Tep) (linha vermelha) com o fator de conversão de m³ para tep de 2018 para gás natural seco.



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados retirados da “Tabela VIII.10 – Fatores de Conversão para tep médio” do Balanço energético nacional entre os anos de 1970 e 2018, disponíveis no acervo digital da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019b).

Figura 5: Consumo total, produção nacional e importação via gasodutos e gás natural liquefeito de gás natural entre os anos de 1970 e 2018.



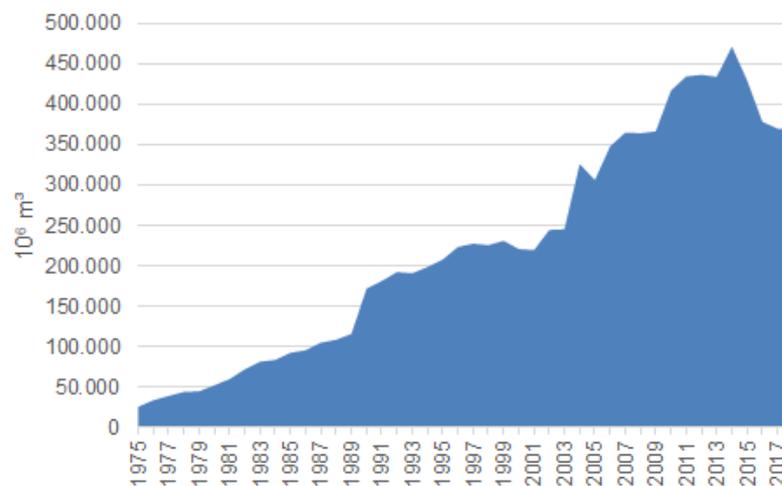
Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados históricos do balanço energético nacional entre os anos de 1970 e 2018 disponíveis em EPE (2019b).

Nas Figura 4 e Figura 5, destaca-se três períodos importantes no crescimento do consumo de gás natural no Brasil. O primeiro momento é o começo dos anos 1980, quando o gás natural da Bacia de Campos começa a ser explorado. O segundo momento ocorre com o início da importação de gás natural por meio do gasoduto Bolívia-Brasil. Por fim, há o marco de crescimento do consumo gás natural e sua participação na matriz energética brasileira em

2011, ou seja, quando se inicia a exploração de gás natural no pré-sal geológico brasileiro e os gasodutos de escoamento entram em operação.

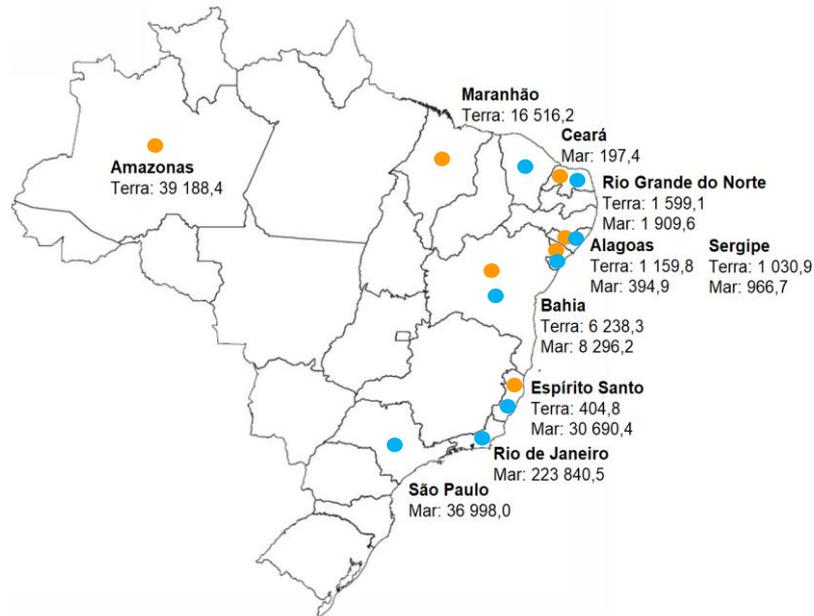
A Figura 6 demonstra o aumento do número de reservas provadas durante o período de 1975 a 2018, o que corrobora com os avanços da produção nacional e os períodos de expansão. Os estados brasileiros que apresentaram as maiores reservas provadas e de produção, em 2017, foram: Rio de Janeiro (*offshore*), São Paulo (*offshore*), Amazonas (*onshore*), Espírito Santo (*offshore*) e Maranhão (*onshore*) (ANP, 2018) (ver Figura 7 e Figura 8). Além disso, destaca-se que, em junho de 2019, foi anunciada a descoberta da Petrobras de grandes reservatórios de gás natural entre os estados de Sergipe e Alagoas, com uma produção estimada de 20 milhões de metros cúbicos diários (FAFÁ, 2019).

Figura 6: Reservas provadas de gás natural entre o período de 1975 e 2018 em milhões de metros cúbicos.



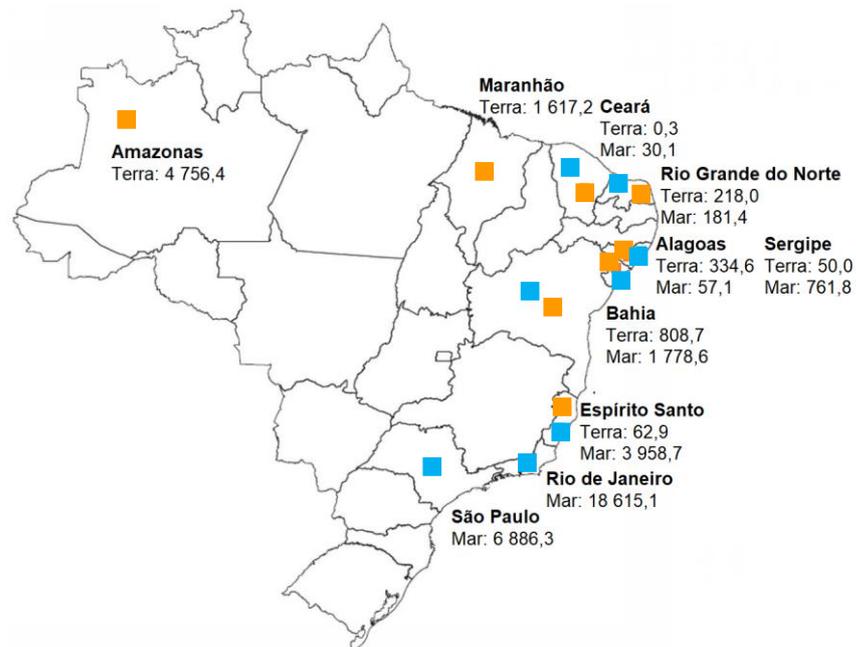
Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do histórico do Balanço Energético Nacional disponíveis no acervo digital da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019b).

Figura 7: Reservas provadas de gás natural no ano de 2017 por estado no Brasil. Os indicadores em azul indicam as reservas provadas em mar e os indicadores laranjas representam as reservas provadas em terra. Os valores representam as quantidades de gás natural por estado e ambiente (*onshore* ou *offshore*) e está na unidade de milhões de m³.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do Anuário Estatístico de 2018 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (ANP, 2018).

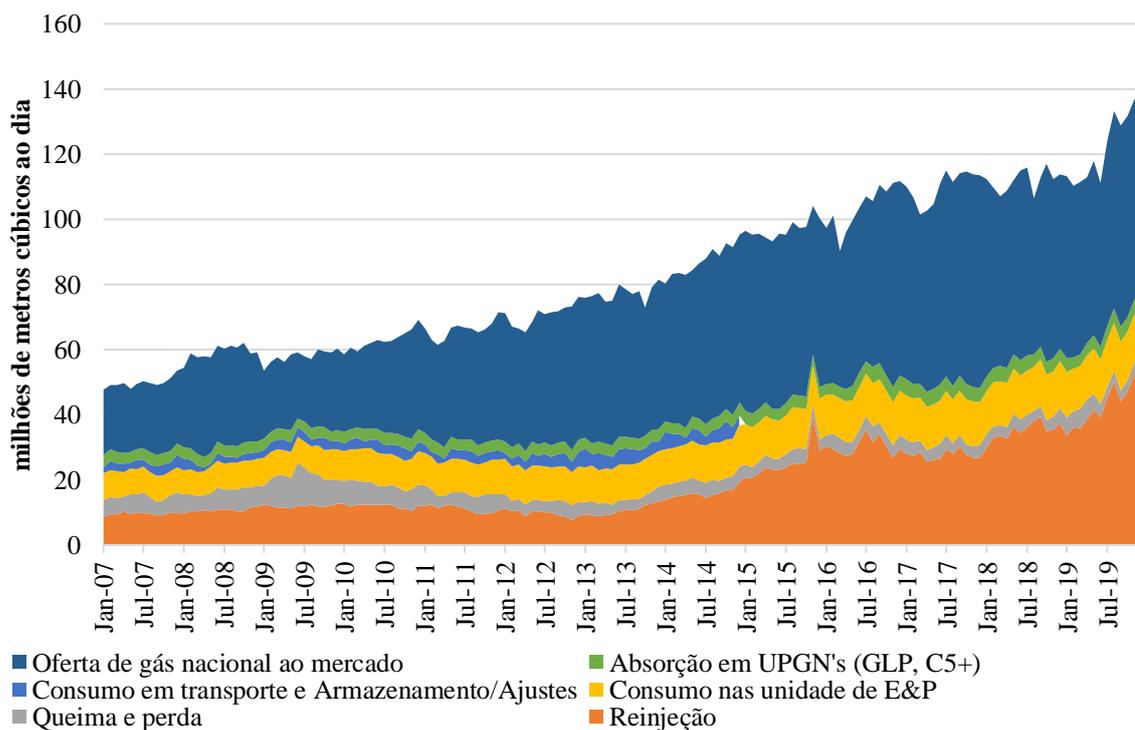
Figura 8: Produção de gás natural no ano de 2017 por estado no Brasil. Os indicadores em azul indicam produção offshore e os indicadores laranjas representam produção *onshore*. A unidade é milhões de m³.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do Anuário Estatístico de 2018 da ANP (ANP, 2018).

Na Figura 9, a produção nacional é sintetizada desde os primeiros meses de 2007 até o fim de 2019. A oferta de gás natural nacional apresenta alguns destinos como: o mercado consumidor, reinjeção nos próprios reservatórios⁶, consumo em armazenamento e transporte⁷, queima e perdas, absorção em Unidades de Processamento de Gás Natural (moléculas de GLP ou moléculas de hidrocarboneto 5+) e absorção em Unidades de Produção e Exploração. Logo, pode-se inferir que a oferta nacional apresentou um grande crescimento durante o período analisado, sendo composta, sobretudo, pelos valores que são destinados à oferta ao mercado do Brasil e pelo valor de reinjeção. O montante de gás natural reinjetado correspondeu a quase 40% do total produzido, sendo equivalente a 63% do valor ofertado (produção nacional + importação), de acordo com os valores do mês de dezembro de 2019.

Figura 9: Caracterização da oferta total nacional e seus destinos durante o período de 2007 a 2019 no Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos Boletins Mensais da Indústria de Gás Natural elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2019a).

A indústria do gás natural é altamente dependente do aporte de uma infraestrutura adequada. Em nível nacional, ela é constituída por Unidade de Processamento de Gás Natural

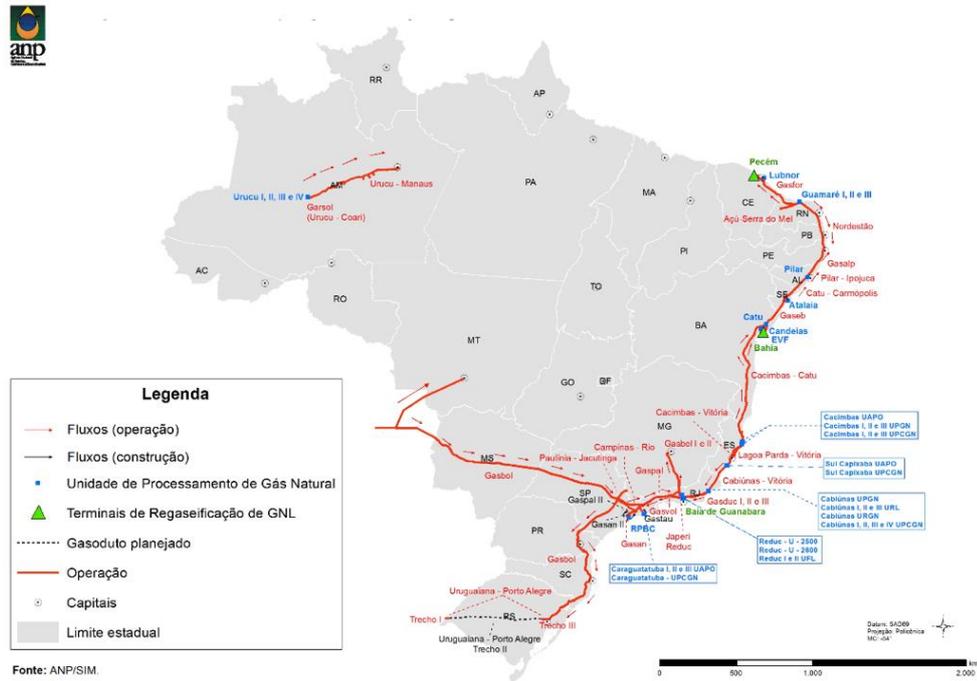
⁶ Nos últimos anos o montante cresceu, sobretudo em reservatórios *offshore*.

⁷ A partir do Boletim Mensal da Indústria do Gás Natural de 2015, esse valor foi agregado em outra categoria que não consta no gráfico da Figura 9.

(UPGN's), unidades de regaseificação e gasodutos de escoamento e transporte. De acordo com o Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural (2020), atualmente há 16 UPGN's em operação no país, que possuem a capacidade nominal total de processamento de 116,01 milhões de m³ ao dia. Elas estão distribuídas nos estados do Amazonas, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Maranhão. Já em relação aos terminais de regaseificação, atualmente há quatro em operação nos estados do Rio de Janeiro, Bahia, Ceará, e mais recentemente, Sergipe. A capacidade de regaseificação atinge quase 80 milhões de m³ ao dia. Ademais, recentemente a EPE publicou um plano indicativo para a construção de novos terminais de GNL (EPE, 2021).

A malha de gasodutos de transporte (Figura 10) é reduzida em comparação ao grande potencial que se poderia atingir. Segundo Moraes (2003), o fato de o Brasil não ter desenvolvido uma malha de gás natural robusta, assim como outros países, é explicado pela falta de planejamento do processo de industrialização em conjunto com a expansão da rede de dutos, a qual ocorreu em outros países também em desenvolvimento. Além disso, ocorrera um pequeno interesse público na questão e uma grande competitividade de preços desse energético com outros, em especial a hidreletricidade (MORAES, 2003). Desde 2010, não houve um aumento considerável da malha de gasodutos de transporte no país, mantendo-se desde então com uma extensão total de aproximadamente 9400km. Recentemente, a EPE apresentou dois estudos chamados de “Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte”, datados de 2019 e 2020, nos quais expõe o detalhamento de projetos já autorizados ou que estão em fase de estudos e análise para a construção de novos gasodutos (EPE, 2019b; 2020).

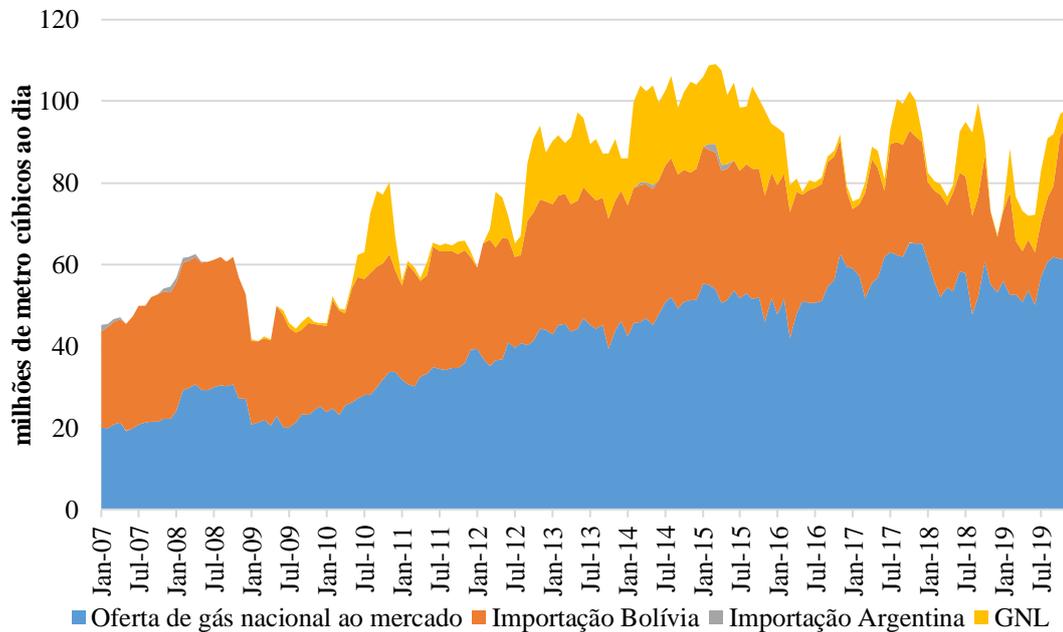
Figura 10: Infraestrutura de transporte de gás natural no Brasil em 2018. Nesta figura observa-se os gasodutos de transporte tanto em operação, construção e em planejamento. Também são observados as unidades de processamento de gás natural e os terminais de regaseificação de GNL.



Fonte: Cartograma 2.3 - Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural (ANP, 2019).

Com isso, uma aposta relevante para o fornecimento de gás natural e auxílio no transporte dentro do país está associada ao uso do GNL em pequena e média escala. Isso seria uma maneira de utilizá-lo sem altos custos amortizados, apesar de essa alternativa ser associada a maiores custos de operação quando comparados aos de gasodutos. Esse transporte pode ser feito por embarcações de diferentes portes, como caminhões, navios e trens (SANTOS; PEYERL; NETO, 2020). A Figura 11 demonstra uma sólida participação do GNL em relação à oferta total de gás natural do país. A partir de 2011, o GNL tornou-se uma parcela fundamental para o suprimento da demanda nacional.

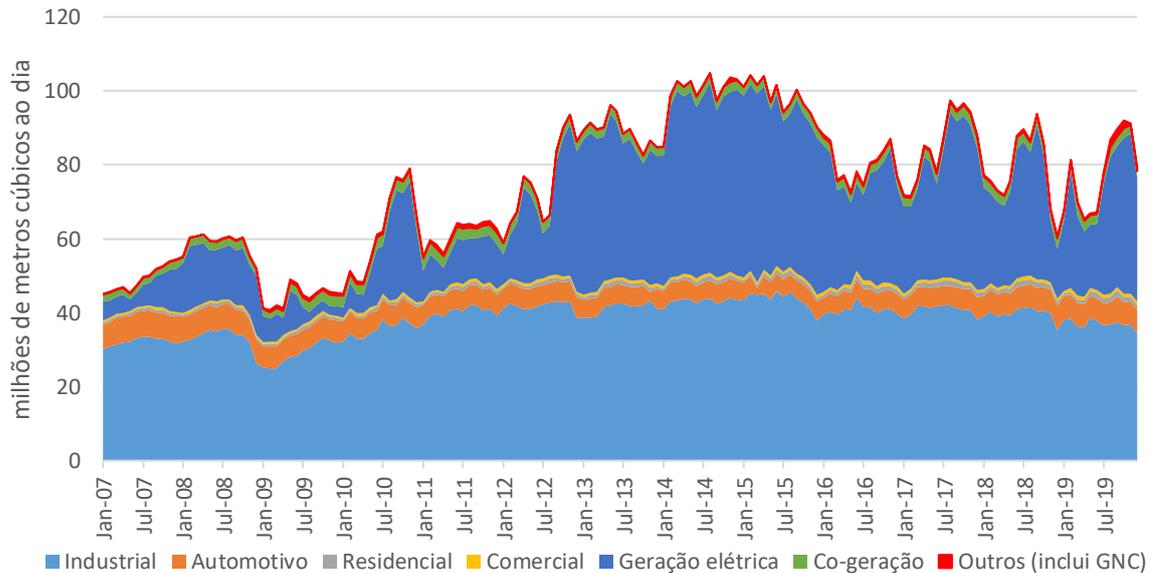
Figura 11: Importância do GNL importado (amarelo) para o suprimento nacional total durante o período de 2007 a 2018. As outras fontes de oferta nacional são: produção nacional (azul), importação pelo gasoduto Bolívia-Brasil (laranja) e importação da Argentina (cinza).



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados dos Boletins Mensais da Indústria de Gás Natural do Ministério de Minas e Energia (MME, 2019a).

É importante também pontuar a demanda de gás natural no Brasil (Figura 12). A demanda industrial permanece relativamente constante durante o período estudado, isto é, de 2007 a 2019. Os demais mercados, como automotivo, residencial, comercial, cogeração, entre outros, apresentam-se com uma pequena contribuição na demanda. O setor de energia elétrica, por sua vez, sofreu uma grande oscilação no período avaliado. Com o passar dos anos, e principalmente a partir dos grandes despachos de usinas termelétricas a gás natural após a crise hídrica ocorrida em 2014-2016 no estado de São Paulo, esse consumo adquire uma certa robustez e uma carga mínima de 20MM³/dia, em média.

Figura 12: Demanda de gás natural no Brasil por setor durante os anos de 2007 e 2019.



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados dos Boletins Mensais da Indústria de Gás Natural do Ministério de Minas e Energia (MME, 2019a).

No entanto, o fomento à indústria do gás natural também passa pelos aspectos regulatórios a nível federal. Estes apresentam algumas barreiras, como o monopólio estatal e o ambiente pouco incentivador da competitividade, que vem sendo ultrapassadas nas últimas décadas, ainda que a passos lentos. Até a Lei do Petróleo, não houvera nenhuma flexibilização em relação ao monopólio da União sobre as atividades de pesquisa, lavra e refino no território nacional, que foram estabilizadas desde a criação da Petrobras. Porém, quando ela foi firmada, em 1997, deu-se início à flexibilização por meio da concessão para que qualquer empresa, inclusive a Petrobras, firmasse consórcios para a exploração e produção de petróleo e gás natural no Brasil, de acordo com licitações reguladas. A Petrobras, porém, continuou como agente dominante no restante da cadeia de gás natural, sem grande desenvolvimento nesse sentido (LEAL; REGO; DE OLIVEIRA RIBEIRO, 2019).

Posteriormente, em 2009, foi criada a Lei do Gás, na tentativa de atrair novos agentes para o mercado nacional (PERDIZ; SOUSA; FLOR, 2008). Entretanto, as infraestruturas de escoamento, processamento e transporte, fundamentais à cadeia do gás natural, continuavam monopolizadas pela Petrobras. Apenas em 2016 foi lançada a iniciativa Gás para Crescer, visando a formação de um mercado líquido, competitivo e que contribuísse para o desenvolvimento do país (MME, 2019b). Algumas das recomendações associadas à iniciativa Gás para Crescer e ao seu grupo de trabalho foram posteriormente incorporadas no Substitutivo

ao Projeto de Lei nº 6.407/2013, apresentado em dezembro de 2017, e que foi aprovado recentemente.

Em julho de 2019, o programa Novo Mercado de Gás (Decreto nº 9934) foi lançado na tentativa de implementar as ações para o desenho do novo mercado de gás natural, que se baseia em quatro pilares: promoção da concorrência; harmonização das regulações estaduais e Federal; integração do setor de gás com setores elétrico e industrial e remoção de barreiras tributárias (MME, 2019b). Em meio a esse movimento, a Petrobras e o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) elaboraram termos de compromissos para estimular a competição, por meio da venda de ativos e o acesso à terceiros ao transporte (venda das transportadoras até 2021), ao escoamento, ao processamento e aos terminais de GNL (CADE, 2019a; 2019b).

3 O ESTADO DE SÃO PAULO: REGIONALIZAÇÃO E RECURSOS ENERGÉTICOS

3.1 Panorama energético do estado de São Paulo

São Paulo é um dos 26 estados da federação brasileira, localizado na região sudeste. Possui uma área de 248 219,94 km², o que representa 2,9% do território nacional. Em 2020, a população alcançou um total de 44 542 773 habitantes, com uma densidade populacional de 179,45 habitantes por quilômetro quadrado (SEADE, 2020). Em 2018, o estado apresentou a maior renda *per capita* do país (R\$ 50 230,08) e 32,8% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (ADVFN, [s.d.]; SEADE, 2020).

Em relação à composição do PIB paulista, a maior contribuição advém do setor terciário, ou seja, aquele relacionado às atividades de serviços. Em 2018, esse setor representou 77,17% do Valor Adicionado⁸ no estado de São Paulo, e alguns dos subsetores de serviços de destaque foram: (i) comércio, manutenção e reparação de veículos automotores e motocicletas, (ii) atividades financeiras, de seguros e serviços relacionados e (iii) atividades imobiliárias. As parcelas dos setores da indústria (majoritariamente associado às indústrias de transformação) e agropecuária (com destaque para a agricultura) no VAB paulista foram de 21,12% e 1,71%, respectivamente (SEADE, 2018).

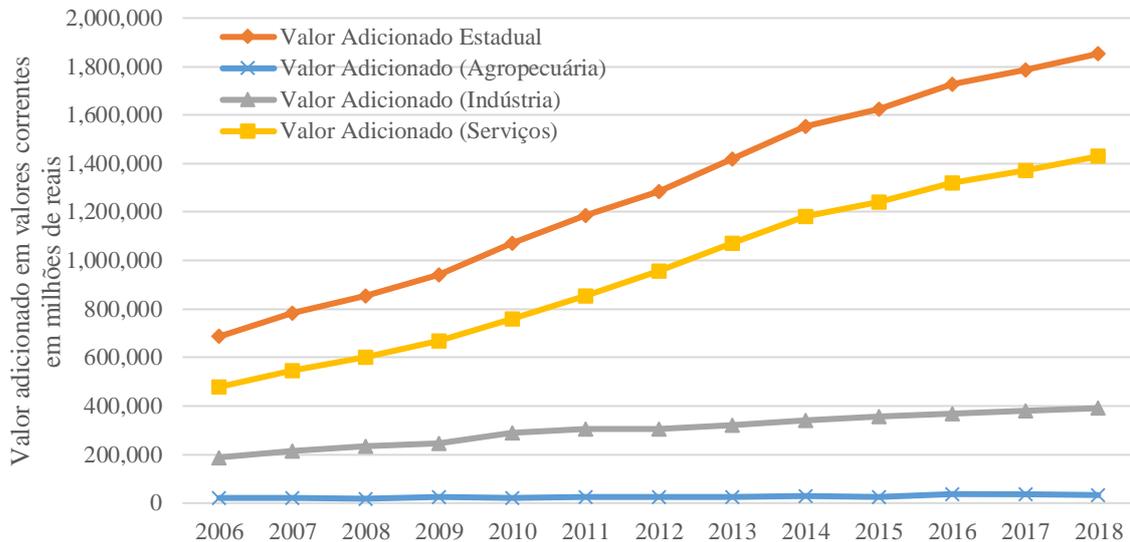
Segundo a Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE), em comparação entre o final dos anos de 2017 e 2018, ocorreu um crescimento de 2,5% no PIB do estado de São Paulo, sobretudo motivado pelo setor terciário (aumento de 3,4%), principalmente em alguns segmentos como veículos, material de construção, comércio varejista e cosméticos. Por sua vez, o setor primário retraiu em 2,9%, fomentada pela fraca safra de cana de açúcar e redução no abastecimento de alimentos ocasionada pela greve dos caminhoneiros. O setor secundário subiu 0,8% nesse mesmo período, motivado pelos segmentos automobilísticos, farmacêutico e de máquinas.

A Figura 13 ilustra o curso do Valor Adicionado total dos diferentes setores da economia (primário, secundário e terciário) no estado, entre 2006 e 2018. Vale notar a relação positiva

⁸ O Valor Adicionado Bruto (VAB) é a diferença entre o Valor Bruto da Produção (Receita Operacional Líquida + Receita com aluguéis + Outras receitas + Estoque final - Estoque inicial - Custos de mercadorias revendidas) e o Consumo Intermediário (relativo a matéria-prima, materiais de consumo ou outros de reposição, combustível, serviços e qualquer outro gasto intermediário). O PIB, quando analisado pela ótica da oferta, além do VAB dos três setores, leva em consideração os impostos e subsídios.

entre o Valor Adicional Bruto estadual e o Valor Adicional do setor terciário que tem fomentado a economia do estado de São Paulo (SIMA, 2019a).

Figura 13: Histórico da progressão do Valor Adicionado Bruto ao PIB por cada setor econômico no estado de São Paulo (2006 – 2018) em valores correntes.

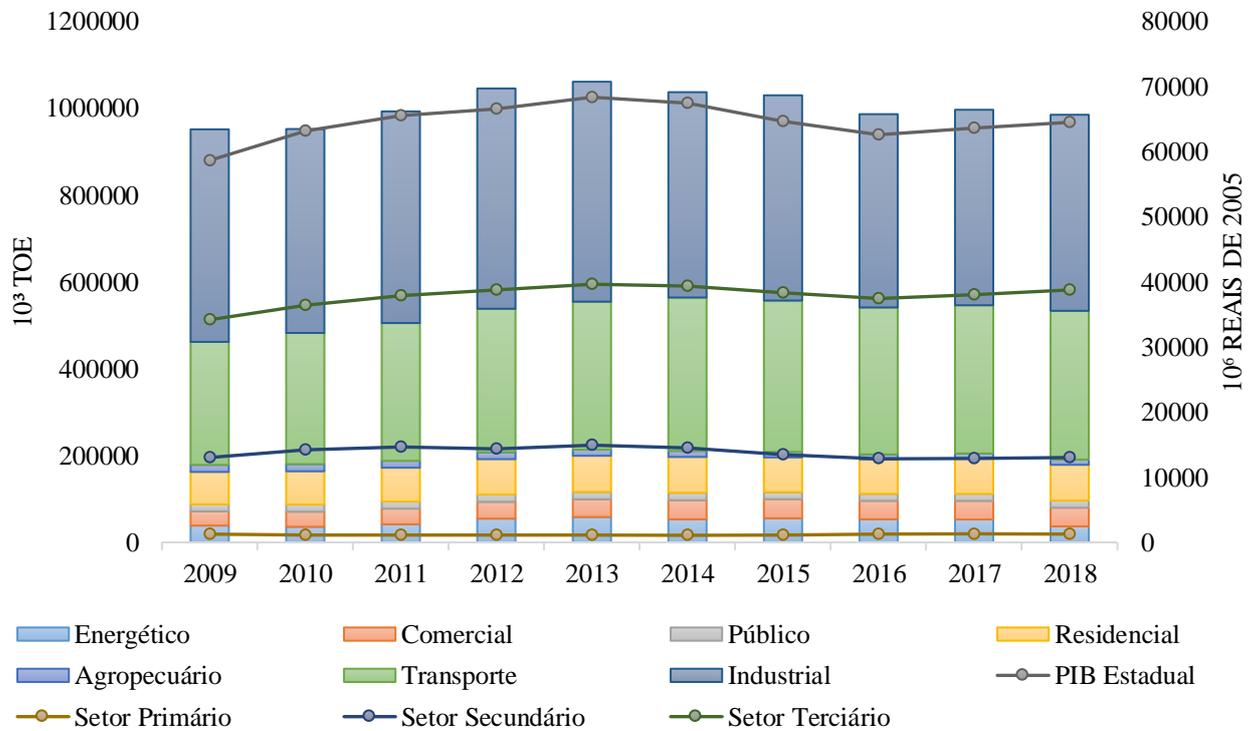


Fonte: Elaborado pela autora com base em SEADE (2018).

A Figura 14 apresenta a relação dos dados do PIB⁹ de São Paulo (e dos setores econômicos) com os dados energéticos dos diversos setores consumidores (residencial, comercial, público, energético, industrial e transporte) no período entre 2009 e 2018, de acordo com a disponibilidade de dados. Pela observação do gráfico, infere-se que o PIB estadual e o consumo energético apresentaram uma alta correlação durante o período. Entre 2009 e 2013 houve uma ascensão econômica refletida na elevação do PIB (motivada especialmente pelo setor secundário e terciário) e do consumo energético (fortemente motivado pelo setor transporte). No entanto, entre 2013 e 2016, houve certa redução tanto do PIB estadual como do consumo energético, ambos impulsionados pela retração do setor industrial, o qual gradativamente se recuperou nos anos seguintes. Enquanto isso, entre os anos de 2017 e 2018, houve uma variação negativa no consumo energético de um ano para o outro.

⁹ Valor de PIB equalizado a valores de mercado em reais de 2005.

Figura 14: Relação entre o progresso do PIB estadual e de cada setor econômico (em milhões de reais de 2005) e o consumo energético por cada setor (em milhões de toneladas de óleo equivalente) entre 2009 e 2018. As linhas com indicadores mostram os dados de PIB, enquanto as colunas empilhadas expõem o consumo por setor em cada ano.

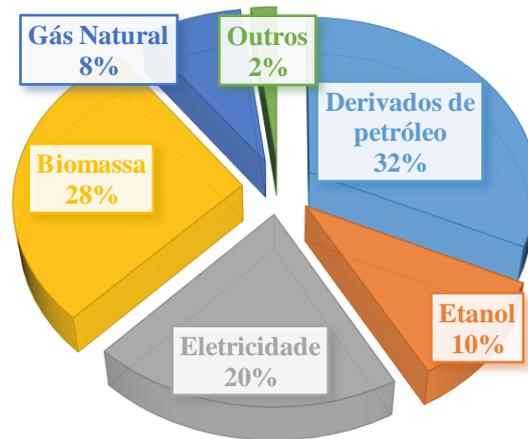


Fonte: Elaborado pela autora com base em SIMA-SP (2019a).

Em relação à composição dos setores no consumo energético paulistano, o industrial destaca-se como o maior consumidor, apesar da estagnação nos últimos anos, notória tanto em termos do PIB do setor secundário como do aumento do consumo energético. O setor de transportes também apresentou uma grande contribuição, sendo responsável por mais de 30% do consumo nos últimos anos, enquanto os setores energético, comercial, público, residencial e agropecuário somaram cerca de 20%.

Em termos da matriz energética de consumo do estado de São Paulo no ano de 2018, há uma maior participação de fontes renováveis (etanol, eletricidade, biomassa e outros) em relação às não renováveis, aproximadamente de 59,5% (Ver Figura 15). Nesse mesmo ano, a Oferta Total de Energia ($93\,816 \times 10^3 \text{toe}$) foi composta majoritariamente de petróleo e seus derivados (38,3%) e de cana-de-açúcar (29,8%), totalizando mais da metade da oferta (SIMA-SP, 2019a).

Figura 15: Matriz energética do estado de São Paulo.



Fonte: Elaborada pela autora com base em SIMA-SP (2019a).

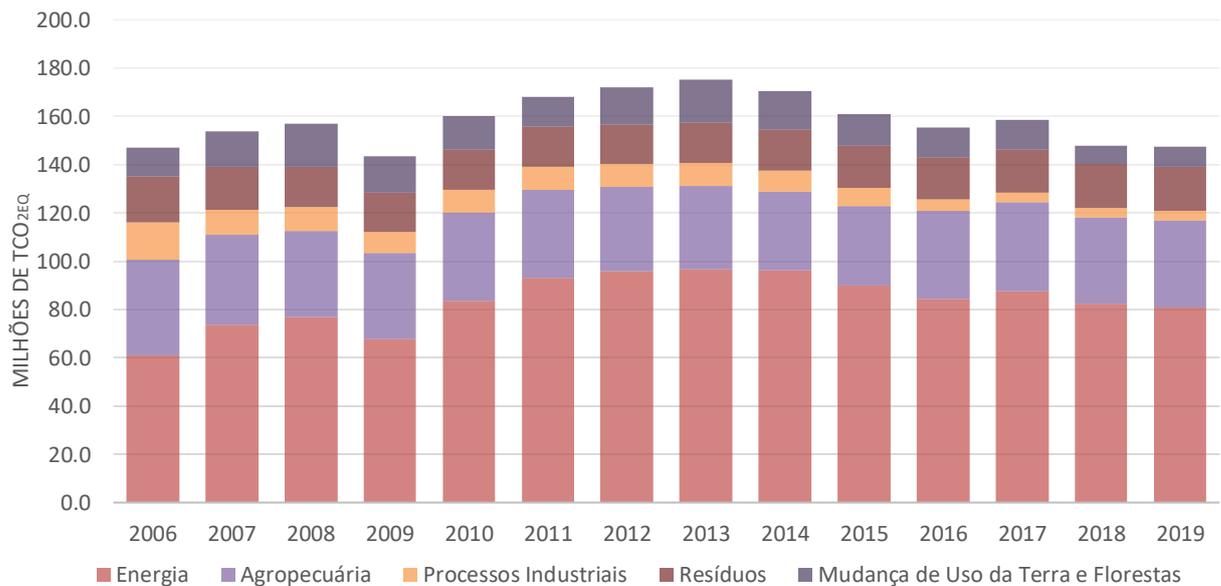
Segundo os últimos dados (referentes ao segundo bimestre de 2021) do Resumo Executivo de Petróleo e Gás Natural da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo, o gás natural, foco deste estudo, possui o estado de São Paulo como um dos maiores consumidores no Brasil. A variação média da participação paulista no consumo nacional desse combustível permanece entre 23,0 e 29,0% (SIMA-SP, 2021). Ainda de acordo com a Secretaria, São Paulo possui mais de 18.694 mil quilômetros de gasodutos que garantem a distribuição de 5,5 bilhões de m³ anuais para todo o mercado consumidor, incluindo a produção termelétrica. O Resumo Executivo ainda descreve a produção de gás natural pelo estado de São Paulo, a qual possui uma variação entre 12,9 e 15,3% do total produzido no Brasil, impulsionado principalmente pela produção das grandes reservas descobertas no Pré-Sal geológico na Bacia de Santos (SIMA-SP, 2021).

Em termos ambientais, em 2019, São Paulo ficou em quarto lugar em relação à emissão bruta de gases de efeito estufa (147 MtCO_{2eq}) em todo o Brasil, correspondendo a 6,8%. No entanto, diferentemente das emissões totais do Brasil – no qual 44% das emissões são oriundas de mudanças de uso da terra e florestas –, a maior fonte de emissão do estado foi o setor de energia, totalizando 55%. A contribuição majoritária advinda do setor de energia é composta pelos subsetores de transporte (52%), indústria (17%) e produção de combustíveis fósseis (12%). Juntos, esses três subsetores do setor de energia correspondem à 44,5% do total de gases de efeito estufa emitidos pelo estado (SEEG, 2021).

A Figura 16 retrata os diferentes níveis de emissões de CO₂ equivalente entre 2006 e 2019. No período assinalado, as emissões provenientes do item Energia apresentaram um

aumento entre 2009 e 2013 e, a partir de então, um decréscimo nas emissões brutas. Ainda assim, a maior participação é verificada nesse setor. A fim de oferecer uma compreensão sobre os *drivers* que resultaram este comportamento, esta dissertação desenvolve análises a partir de indicadores que serão analisados nos próximos capítulos.

Figura 16: Evolução histórica das emissões de CO₂ equivalente de acordo com as categorias emissoras.



Fonte: Elaboração própria com base em SEEG (2021).

3.1. Contextualização das regiões administrativas

As regiões administrativas do estado de São Paulo podem ser definidas como uma divisão regional que realiza a agregação supramunicipal dos seus 645 municípios, com a finalidade de facilitar a organização de planejamento, serviços públicos e gestão de políticas públicas em diversas áreas, incluindo os âmbitos energéticos e ambientais (SEADE, 2019). Essa divisão é dinâmica, isto é, por vezes ela já foi modificada e ainda pode ser, conforme as alterações dos aspectos avaliados (sociais, econômicos e demográficos) de cada município ou região (SEADE, 2018). Ademais, as regiões administrativas atuais e que servem como base para uma análise regional do estado de São Paulo são: Araçatuba, Barretos, Bauru, Campinas, Central, Franca, Itapeva, Marília, Presidente Prudente, Registro, Ribeirão Preto, Santos, São José dos Campos, São José do Rio Preto, São Paulo e Sorocaba (ver Figura 17).

Figura 17: Mapa das regiões administrativas do estado de São Paulo.

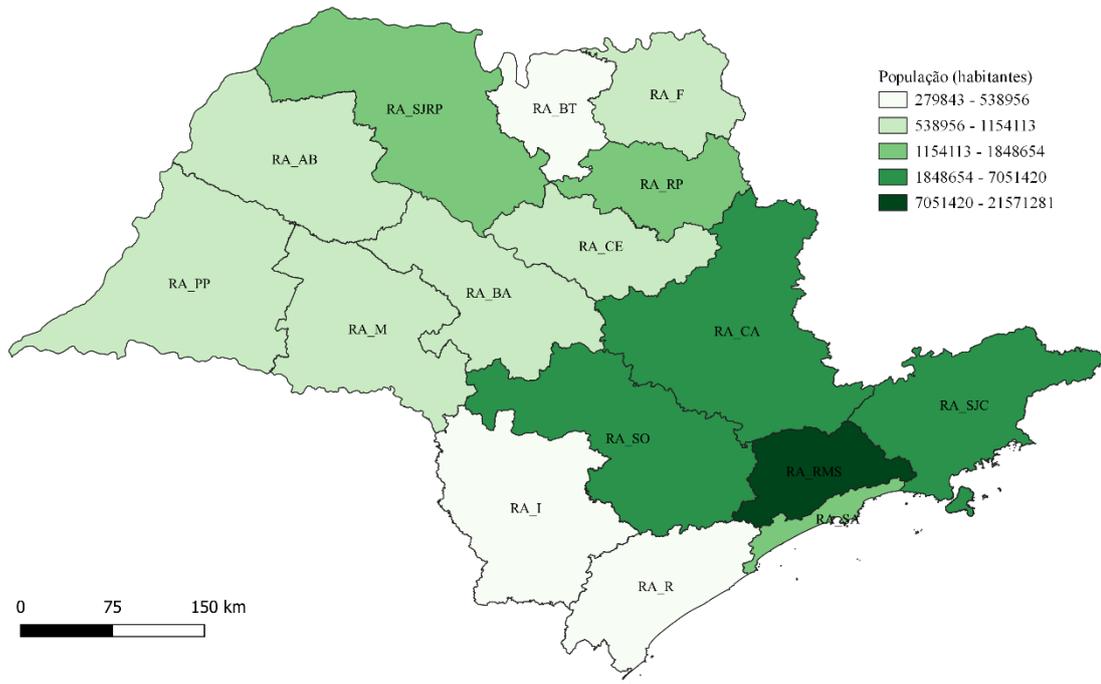


Fonte: Elaborado pela autora.

Para adentrar nas particularidades de cada região e trazer uma breve comparação entre elas, a seguir são apresentados mapas temáticos que permitem a observação dos diferentes aspectos demográficos, econômicos, energéticos e de emissões referentes ao ano de 2018. Também serão destacados os principais pontos de interesse para o desenvolvimento de cada região, conforme a descrição e análise SWOT – uma técnica de planejamento de projetos que ressalta as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças – realizada e disponibilizada pelo DesenvolveSP, uma instituição financeira do governo de São Paulo, para cada região administrativa.

A Figura 18 ilustra a concentração da população no estado de São Paulo em 2018. Nota-se que a Região Metropolitana de São Paulo apresenta uma maior concentração, assim como as regiões ao seu redor, como é o caso de Sorocaba, Campinas e São José dos Campos. Em conjunto, essas quatro regiões somam quase 75% de toda a população do estado. Destaca-se, também, as regiões de Ribeirão Preto e São José do Rio Preto. Salvo as exceções de Bauru, Franca, Itapeva e as quatro primeiras citadas, as outras regiões apresentam uma população menor, além de taxas migratórias negativas ou com crescimento anual abaixo do estado.

Figura 18: População absoluta de cada região administrativa do Estado de São Paulo em 2018. Quanto mais intensa a cor verde, maior o número de pessoas naquela região. Os códigos usados para cada região foram: RA_AB (Araçatuba), RA_BA (Bauru), RA_BT (Barretos), RA_CA (Campinas), RA_CE (Central), RA_F Franca), RA_I (Itapeva), RA_M (Marília), RA_PP (Presidente Prudente), RA_R (Registro), RA_RMS (Região Metropolitana de São Paulo), RA_RP (Ribeirão Preto), RA_SA (Santos), RA_SJC (São José dos Campos), RA_SJRP (São José do Rio Preto), RA_SO (Sorocaba).



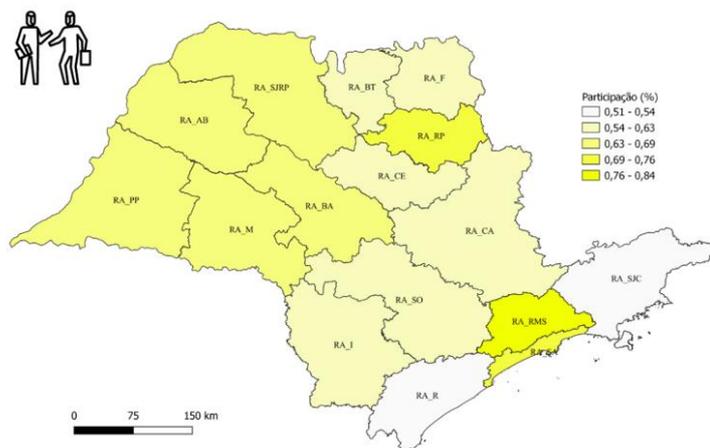
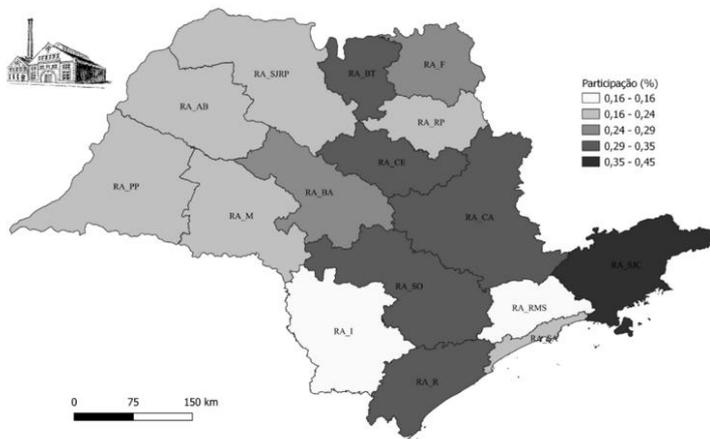
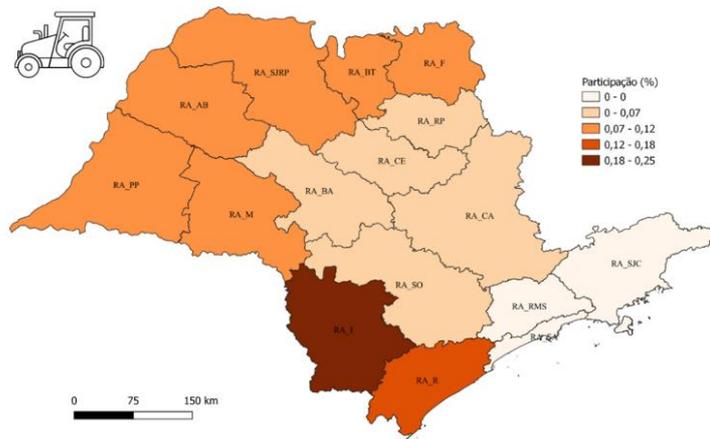
Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2020a).

A Figura 19 refere-se à participação relativa dos três setores da economia (primário, secundário e terciário) para com o valor total do PIB de cada região administrativa. As tonalidades de laranja representam a participação do Valor Adicionado Bruto referente ao setor primário, que varia entre nulo e 25% do Valor Adicionado Bruto Total. Destaca-se as regiões de Registro e Itapeva (mais ao sul do mapa) e outras regiões que preenchem a borda Noroeste do estado (Marília, Presidente Prudente, Araçatuba, São José do Rio Preto, Barretos e Franca). Dentre essas, as localidades mais à oeste, em geral, apresentam uma agroindústria forte, especialmente voltada à produção de cana-de-açúcar (açúcar e álcool), carnes e laranja. Outros produtos a serem citados são café (Franca) e látex (São José do Rio Preto). A produção de biocombustíveis já faz parte da economia de algumas dessas regiões (e de outras, como Bauru). Mas, em geral, se vê uma grande oportunidade de desenvolvimento. Itapeva e Registro apresentam uma alta contribuição do agronegócio.

A contribuição do setor secundário varia entre 16% e 45% do VAB total. A região de São José dos Campos destaca-se, inclusive, por possuir um dos polos aeronáuticos reconhecidos mundialmente. Outras atividades industriais são o refino do petróleo, a produção de automóveis e equipamentos de transporte etc. As regiões de Sorocaba, Campinas, Registro e Barretos, mostradas na figura a seguir, apresentam uma alta contribuição do setor secundário no VAB total. Registro possui uma estrutura industrial bem próxima à exploração do Pré-sal. Já Sorocaba apresenta uma grande valia para fabricação associada às telecomunicações, assim como as áreas de eletroeletrônicos, equipamentos, automobilístico e químico. As regiões Central e de Campinas apresentam uma variedade de indústrias mais tradicionais de alto valor agregado, mas também contam com instituições de produção de conhecimento científico e tecnológico, quer seja em Campinas ou em São Carlos. Barretos, por sua vez, destaca-se pelos segmentos de alimentos, químico, plástico, de máquinas e equipamentos.

Finalmente, o setor de serviços, principal pilar da economia estadual, varia regionalmente entre 51% e 84% da composição da economia das regiões administrativas. As regiões mais à Oeste (São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília, Bauru e Araçatuba) destacam-se, em geral, pela venda típica de couro, calçados, vestuário e móveis. Ribeirão Preto se sobressai nos segmentos de saúde e educação, inclusive por também apresentar um polo de inovação e tecnologia junto às universidades. Apesar de Santos ser uma região altamente voltada à produção do Pré-sal e dispor do Porto de Santos, também aparece com destaque pelo setor de serviços. São Paulo, por sua vez, é renomada pelo mercado financeiro e imobiliário, o que permite o grande avanço do setor de serviços nessa região.

Figura 19: Participação do Valor Adicionado de cada setor da economia (primário, secundário e terciário) no ano de 2018 em relação à cada região administrativa. Em laranja está representado o setor primário, em cinza o setor secundário e em amarelo, o setor terciário. Os códigos usados para cada região foram: RA_AB (Araçatuba), RA_BA (Bauru), RA_BT (Barretos), RA_CA (Campinas), RA_CE (Central), RA_F Franca), RA_I (Itapeva), RA_M (Marília), RA_PP (Presidente Prudente), RA_R (Registro), RA_RMS (Região Metropolitana de São Paulo), RA_RP (Ribeirão Preto), RA_SA (Santos), RA_SJC (São José dos Campos), RA_SJRP (São José do Rio Preto), RA_SO (Sorocaba).



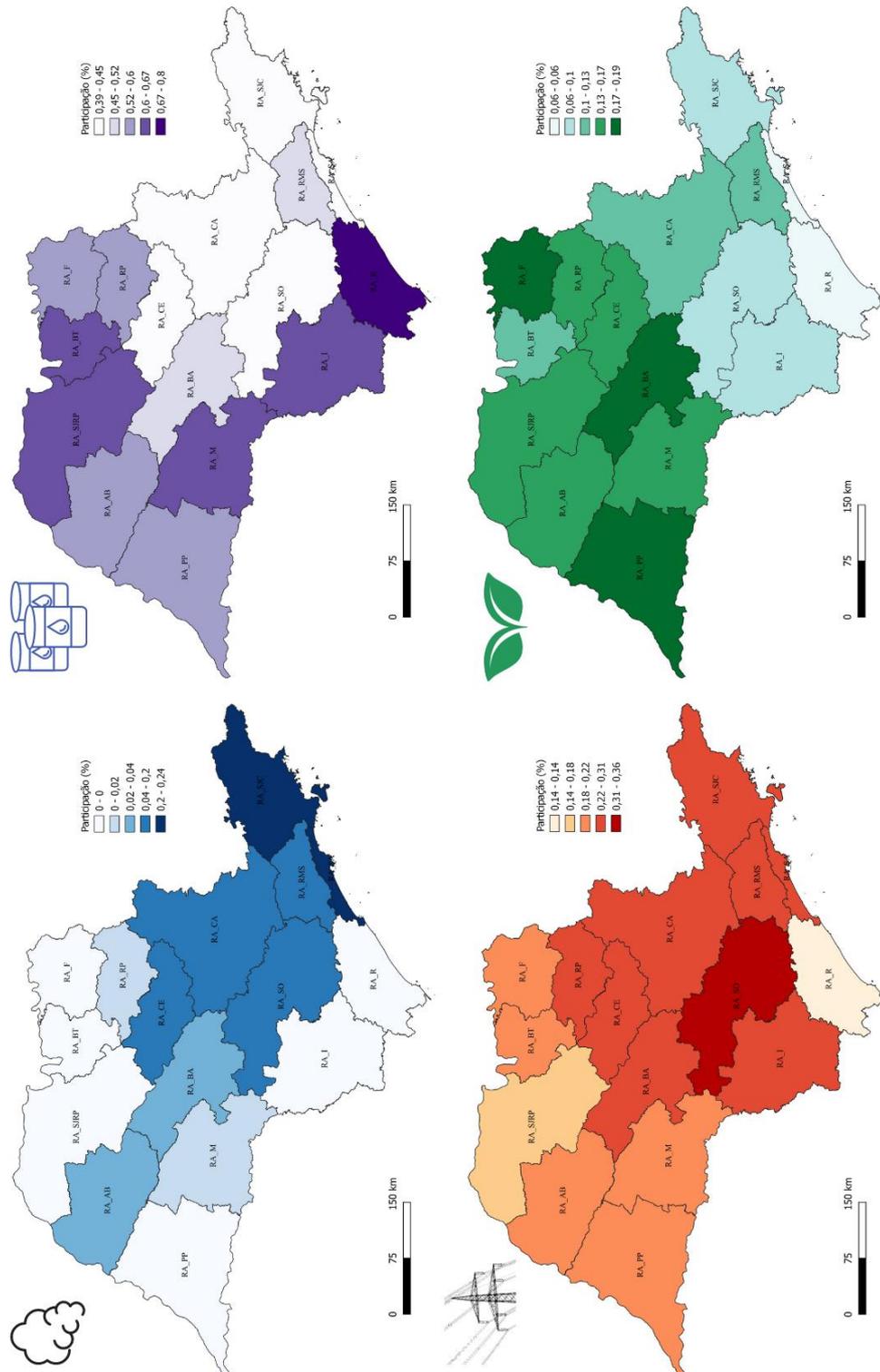
Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBGE (2020b).

A Figura 20 apresenta a participação relativa de cada uma das fontes energéticas (gás natural, derivados de petróleo, eletricidade e etanol) na matriz energética de consumo de acordo com a região administrativa. Em relação ao gás natural, a variação abrange localidades de participação nula até 24%, como é o caso de São José dos Campos e Santos. Merecem destaque as regiões de Campinas, São Paulo, Sorocaba e Central, as quais apresentam ao menos a participação de 12% de consumo de gás natural em sua matriz, como é o caso da região metropolitana de São Paulo. Em compensação, é evidente que a RMSP possui uma baixa participação relativa no consumo de derivado de petróleo quando comparada às demais regiões. Dentre essas seis regiões supracitadas, São Paulo possui uma participação de 50% de derivados de petróleo em sua matriz. As outras cinco variam entre 52% e 80%, como é o caso de Itapevi, com a maior participação desse insumo.

A região de Bauru também apresenta uma baixa participação de derivados, mas, por outro lado, possui uma alta participação de etanol em sua matriz (19%) em comparação com as demais regiões. Outras duas regiões que dispõem de produção e uso desse combustível são Franca (18%) e Presidente Prudente (19%). Como esperado, as taxas de maior participação acabam concentrando-se mais a noroeste do estado, com ao menos 13% da participação de etanol.

A eletricidade, por fim, apresenta a variação de composição da matriz energética de consumo entre 14% e 36%. As maiores participações estão na parte leste do estado (acima de 18%), com destaque para a região de Sorocaba. Itapeva, por sua vez, é a região com menor contribuição relativa do consumo de eletricidade.

Figura 20: Participação relativa de cada fonte energética na matriz energética de consumo no ano de 2018. As fontes são gás natural (em azul), derivados de petróleo (em roxo), eletricidade (em vermelho) e etanol (em verde). Os códigos usados para cada região foram: RA_AB (Araçatuba), RA_BA (Bauru), RA_BT (Barretos), RA_CA (Campinas), RA_CE (Central), RA_F Franca), RA_I (Itapeva), RA_M (Marília), RA_PP (Presidente Prudente), RA_R (Registro), RA_RMS (Região Metropolitana de São Paulo), RA_RP (Ribeirão Preto), RA_SA (Santos), RA_SJC (São José dos Campos), RA_SJRP (São José do Rio Preto), RA_SO (Sorocaba).

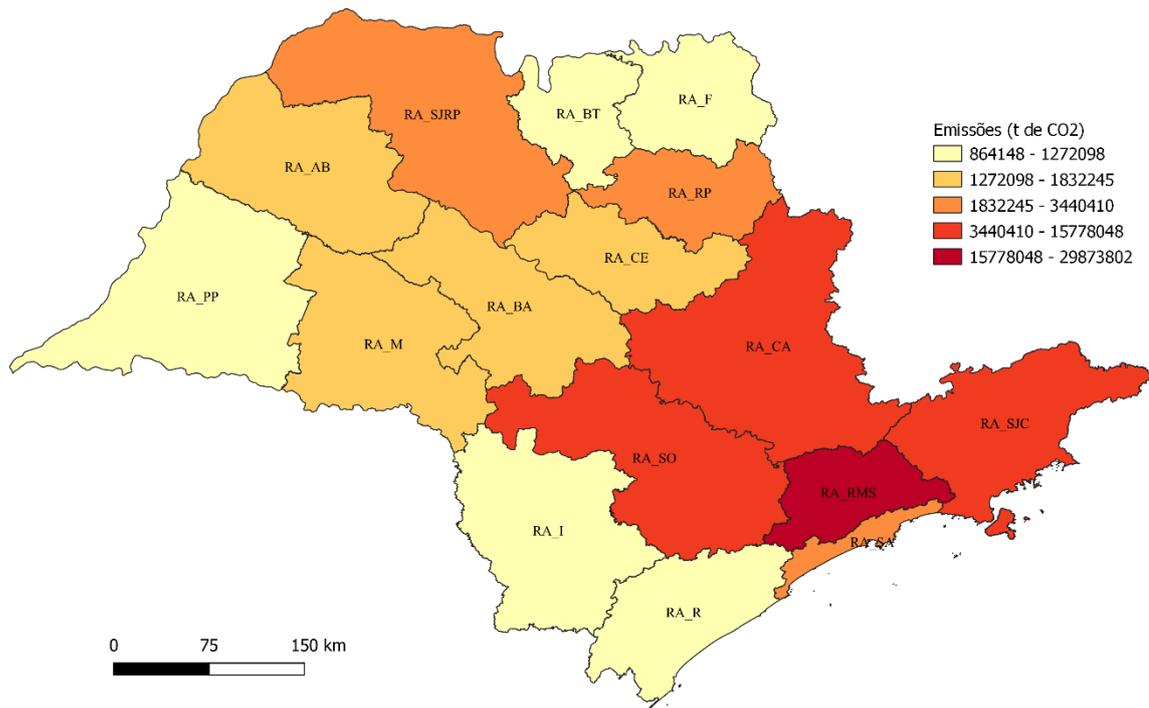


Fonte: Elaboração própria com base em dados da Secretaria de Energia (2010; 2011; 2012a; 2013; 2014; 2015), Secretaria de Energia e Mineração (2016; 2017; 2018), Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (2019) e Secretaria de Saneamento e Energia (2007, 2008, 2009).

Por meio da Figura 21, é possível observar a distribuição das emissões de CO₂ oriundas do consumo energético em cada uma das regiões administrativas, no ano de 2018. A região de

Campinas, Sorocaba, São José dos Campos e São Paulo apresentam as maiores contribuições de emissão, mesmo que a participação de derivados de petróleo não ultrapasse os 50%. Porém, ressalta-se que a RMSP é a mais populosa e contribui com mais de 80% do PIB paulista. Já as regiões de Franca, Barretos, Presidente Prudente, Itapeva e Registro apresentam as menores contribuições de emissão de CO₂. As outras regiões mais à oeste do estado e Santos apresentam uma contribuição intermediária.

Figura 21: Emissões de CO₂ (t de CO₂) absolutas a partir do setor energético por região administrativa do estado de São Paulo em 2018. Cores mais intensas representam maiores quantidades emitidas. Os códigos usados para cada região foram: RA_AB (Araçatuba), RA_BA (Bauru), RA_BT (Barretos), RA_CA (Campinas), RA_CE (Central), RA_F Franca), RA_I (Itapeva), RA_M (Marília), RA_PP (Presidente Prudente), RA_R (Registro), RA_RMS (Região Metropolitana de São Paulo), RA_RP (Ribeirão Preto), RA_SA (Santos), RA_SJC (São José dos Campos), RA_SJRP (São José do Rio Preto), RA_SO (Sorocaba).



Fonte: Elaborado pela autora com base nos Anuários Municipais e SIMA (2019).

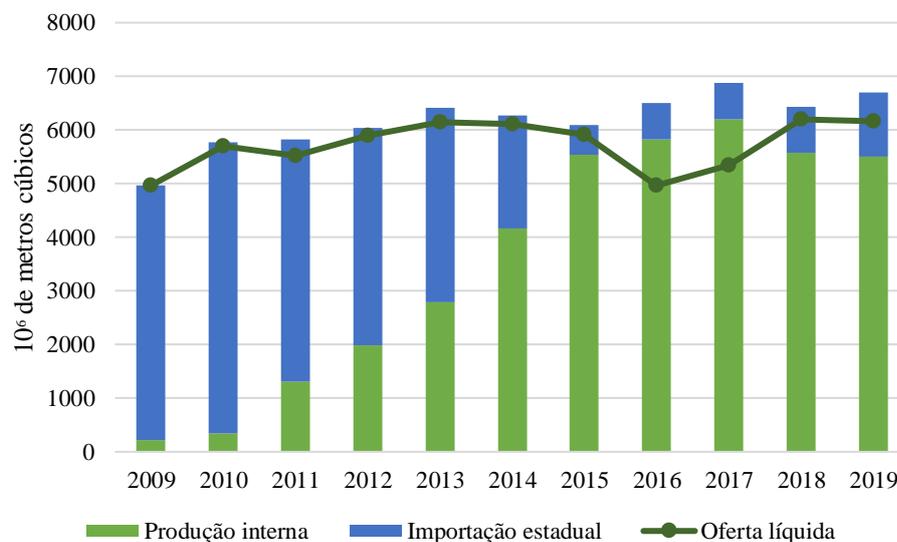
3.2 Exploração, infraestrutura e consumo de gás natural

3.2.1 Oferta de gás natural no estado de São Paulo (*offshore*): produção e importação estadual

O abastecimento de gás natural no estado de São Paulo é realizado principalmente pela produção interna, por meio da extração da Bacia de Santos, localizada na porção *offshore* do estado, e pela importação do gás natural proveniente da Bolívia por meio do gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL). Na Bacia de Santos desenvolve-se a produção em três campos, os quais pertencem aos 20 maiores produtores de gás natural no Brasil, a saber: Lapa (Pré-sal), Mexilhão (Pós-sal) e Sapinhoá (Pré-sal).

A Figura 22 demonstra a composição da oferta de gás natural por meio da produção interna e importação estadual entre os anos de 2009 e 2019, período de disponibilidade de dados (SIMA, 2019). Durante esse período, a oferta (tanto bruta como líquida) não apresentou fortes tendências, e sim uma estagnação, com exceção do biênio 2015-2016, quando apresentou a redução na oferta líquida. No entanto, a composição da oferta alterou-se bruscamente, ocorrendo um crescimento acentuado da produção interna e uma redução da dependência da importação estadual. Inclusive, no biênio de 2016-2017, a produção interna do estado foi superior à oferta líquida.

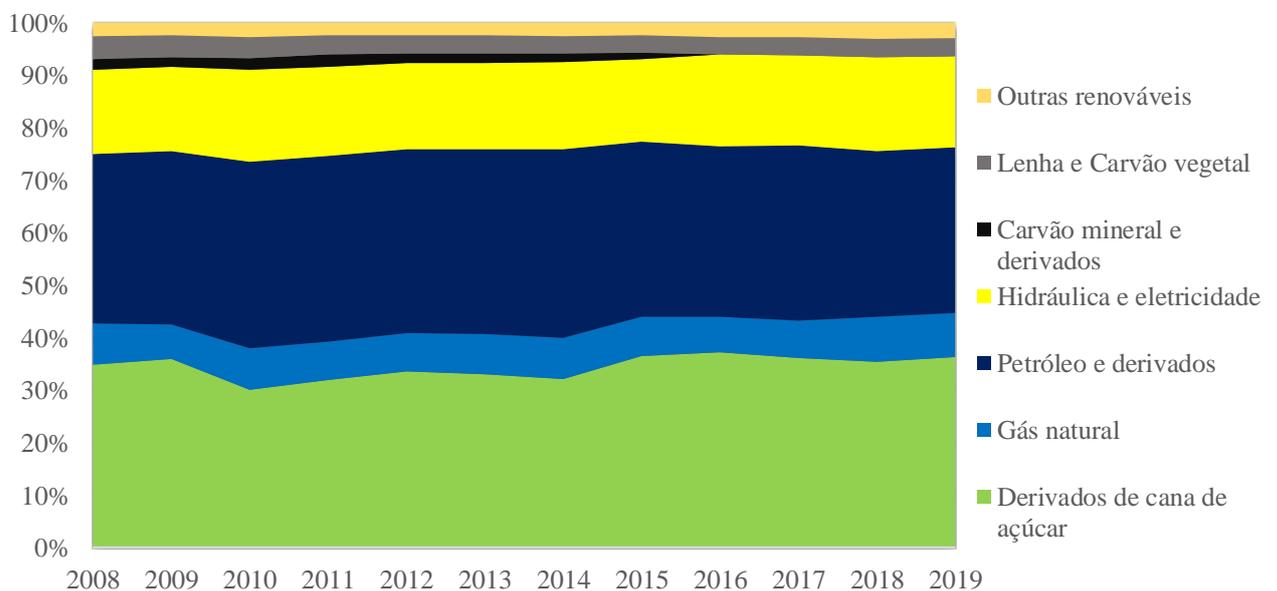
Figura 22: Composição da oferta bruta de gás natural em relação à produção interna e à importação estadual durante os anos de 2009-2019 em 10^6 de metros cúbicos.



Fonte: Elaborado pela autora com base em SIMA-SP (2019a).

Quando comparamos a participação do gás natural na oferta interna estadual de energia durante os últimos anos com as outras fontes, percebe-se que o insumo apresentou uma proporção constante durante o período. A Figura 23 demonstra a oferta doméstica das diferentes fontes de energia primária do estado de São Paulo, entre 2008 e 2019. Contudo, vale ressaltar que outra fonte apresentou um crescimento maior: a cana-de-açúcar. Destaca-se, ainda, que o estado possui uma forte indústria de biocombustível a partir da cana-de-açúcar, além de ser uma área propícia a futuros investimentos (SIMA-SP, 2019a).

Figura 23: Oferta doméstica bruta de fontes energéticas (%) em São Paulo.



Fonte: Elaborada pela autora com base em SIMA-SP (2019a).

3.2.2 Malha de transporte e distribuição presente no estado de São Paulo

O GASBOL, principal gasoduto de importação de gás natural, passa pelo estado de São Paulo em dois trechos. O primeiro é um traçado que atravessa o estado no sentido oeste-leste, sendo sua origem a cidade de Corumbá (MS) e chegando à cidade de Guararema (SP). O segundo braço, chamado de trecho Sul, tem origem na cidade de Paulínia e destino para o estado do Rio Grande do Sul. Os dois trechos encontram-se em operação desde 1999 e 2000, respectivamente.

Além disso, há outros trechos que ligam cidades de São Paulo ao Rio de Janeiro, que são: a) GASPAL I, Piraí (RJ) à Mauá (SP); b) GASCAR, Paulínia (SP) à Japeri (RJ). Ainda há o trecho Paulínia – Jacutinga, que liga o estado de São Paulo a Minas Gerais. Os trechos que

ligam cidades dentro do estado de São Paulo são: a) GASAN I, UPGN de Cubatão até São Bernardo do Campo; b) RBPC-Comgás, o qual leva o gás para Cubatão até o ponto de entrega da Comgás; c) GASTAU, entre Caraguatatuba e Taubaté; d) GASPAL II, entre as cidades de Guararema e São Paulo; e) GASAN II, entre as cidades de São Paulo e São Bernardo do Campo. No que se refere ao estado de São Paulo junto aos Planos Indicativos de Gasodutos de Transporte mencionados no capítulo anterior, há apenas um projeto autorizado de um gasoduto que se origina na cidade de São Carlos com destino em Brasília (DF), e um projeto de interligação de uma nova oferta de Cubatão no GASAN I (EPE, 2019b, 2020).

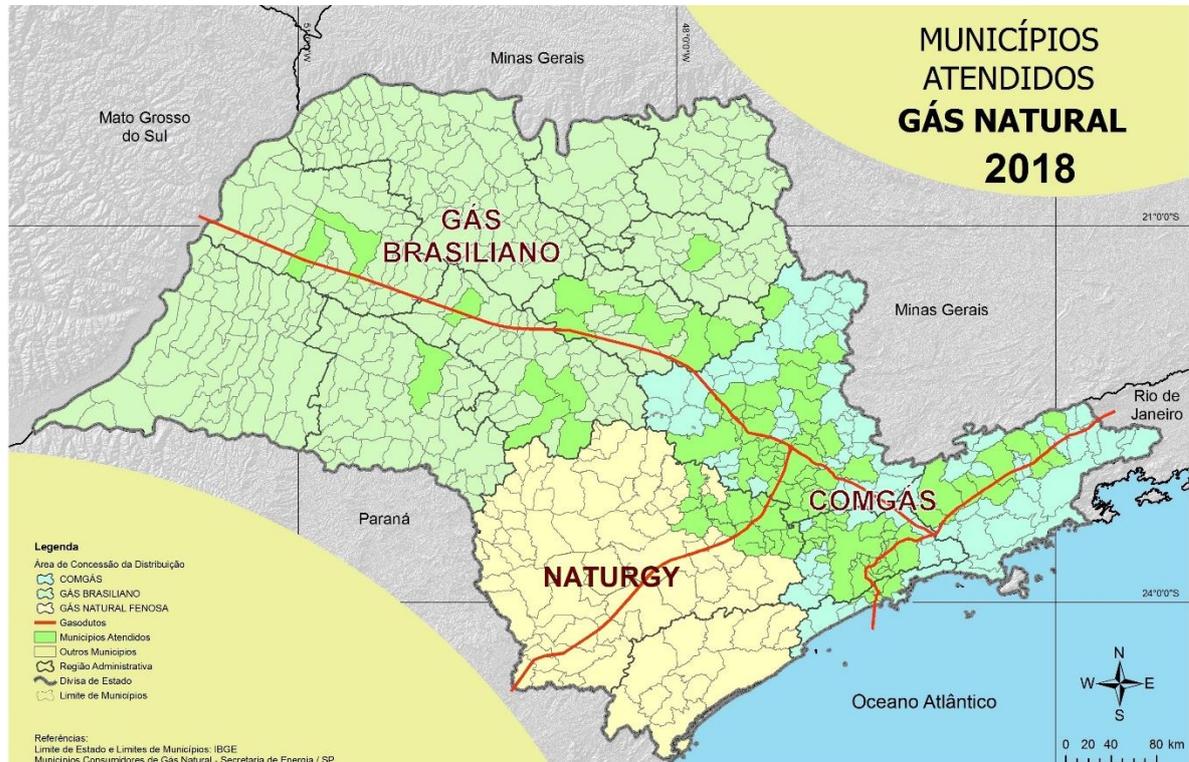
A distribuição do gás natural é realizada pela concessão de três empresas: Comgás, Gás Brasileiro e Naturgy. As áreas abrangidas por cada área de concessão podem ser relacionadas com as regiões administrativas já mencionadas (ver Tabela 1) e observadas no mapa abaixo (ver Figura 24).

Tabela 1: Relação entre a distribuição geográfica das áreas administrativas do estado de São Paulo e as áreas que correspondem à concessão estabelecida para as empresas distribuidoras de gás natural do estado de São Paulo.

Concessionárias	Regiões administrativas
Comgás	Campinas
	Metropolitana de São Paulo
	Santos
	São José dos Campos
Gás brasileiro	Araçatuba
	Bauru
	Barretos
	Central
	Franca
	Marília
	Presidente Prudente
	Ribeirão Preto
	São José do Rio Preto
Naturgy	Itapeva
	Registro
	Sorocaba

Fonte: Elaboração própria.

Figura 24: Áreas concessionárias de cada empresa de distribuição de gás natural e as cidades atendidas em 2018. A linha vermelha representa os gasodutos de transporte.



Fonte: Modificado pela autora com base em SIMA (2018).

A Comgás é a distribuidora de gás natural da região nordeste do estado de São Paulo. A empresa é responsável pelo fornecimento deste combustível para a região que concentra cerca de 30% do PIB nacional. Atualmente, 94 municípios são atendidos, dos 177 pertencentes à sua área de concessão, o que resulta em cerca de 19000 km de extensão de malha de distribuição. No entanto, até 2024, a empresa busca expandir a sua rede para 22000 km (COMPASS, 2020).

Já a empresa Naturgy, antiga Gás Natural Fenosa, é responsável pela distribuição de gás natural na parte sul do estado. A área compreende cerca de 93 municípios, dos quais 20 são atendidos pela empresa (pertencentes às regiões administrativas de Sorocaba e Registro). A sua rede conta com mais de 1800 km de extensão, sendo a terceira maior do país. A estratégia disposta pela empresa compreende o aumento de clientes no setor residencial e comercial, além da ampliação do fornecimento de gás para indústrias e postos de gás natural veicular (GNV) já atendidos (NATURGY, 2020).

A GasBrasiliano é uma empresa integrante da Petrobras, que realiza a distribuição de gás natural nos municípios a oeste do estado. A área totaliza o número de 375 municípios, dos quais 38 são atendidos pela malha e quatro por gás natural comprimido (GNC). Atualmente, a sua rede conta com mais de 1160 km de extensão. Um ponto estratégico da empresa é a

utilização de biometano produzido na região, culminando no “Projeto Cidades Sustentáveis”, no qual pretende-se que Presidente Prudente seja abastecida integralmente por biometano nos próximos anos (GASBRASILIANO, 2020).

Sendo assim, a malha de distribuição total no estado de São Paulo totaliza quase 22000 km de extensão construídos por meio das três empresas distribuidoras juntas à Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP). A seguir, a Figura 25 ilustra o crescimento da demanda de gás natural por setor em cada uma dessas empresas. O período analisado concentrou-se entre os anos de 2006 e 2019. Nota-se um aumento no número de consumidores de todas as empresas, embora a única empresa que apresenta uma maior entrada no mercado além do setor industrial seja a Comgás. Também são notáveis as flutuações na demanda no âmbito estadual, assunto tratado no próximo tópico.

Figura 25: Consumo de gás natural por setor das empresas Comgás (A), GasBrasiliano (B) e Naturgy (C) (2006-2019).



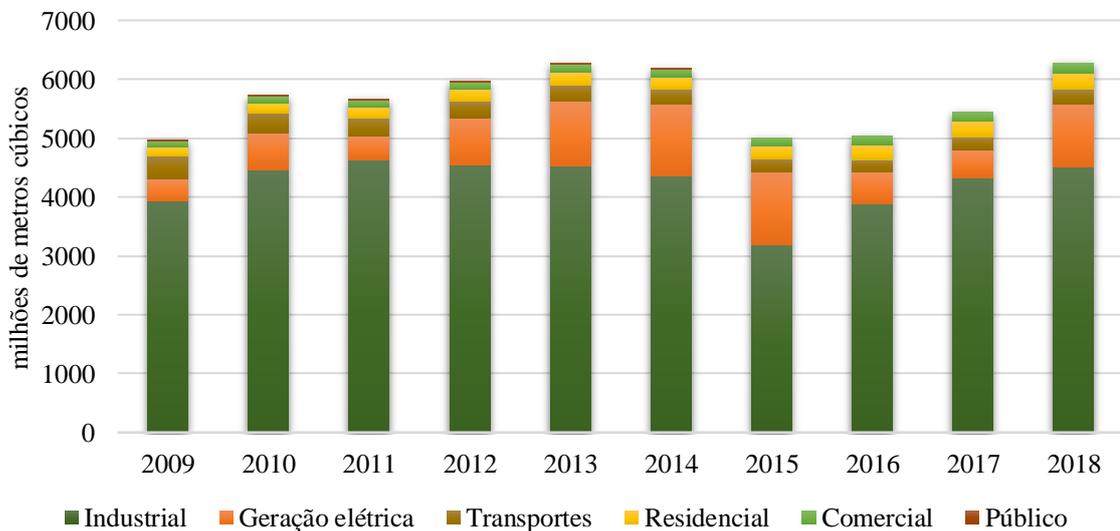
Fonte: Elaborado pela autora com base em SIMA-SP (2020).

3.2.3 Consumo de gás natural por setor

O consumo total de gás natural no estado de São Paulo apresentou um crescimento significativo nas últimas décadas, de um total de $369,39 \times 10^3$ toe, em 1992, para um total de $5253,04 \times 10^3$ toe, em 2018. Além disso, a participação do gás natural na matriz energética de consumo total do estado de São Paulo ganhou espaço em relação às outras fontes. Durante o mesmo período, cresceu de 1% para 8%.

O gás natural tem sido utilizado em diversos setores no estado de São Paulo, com destaque para o industrial e de geração de energia elétrica. No entanto, por mais que os setores residencial, comercial e público apresentem um pequeno consumo, eles também são estratégicos para a ampliação da utilização do gás (ver Figura 26). Esse tópico tem como finalidade apresentar e descrever cada setor de consumo do estado de São Paulo que se relaciona com o gás natural. Mapear esses dados é importante porque eles foram inseridos nas análises e discussões desta dissertação, no decorrer dos outros capítulos.

Figura 26: Consumo de gás natural (em milhões de metros cúbicos) por setores no estado de São Paulo (2008 a 2018).



Fonte: Elaboração própria com base em SIMA (2019a).

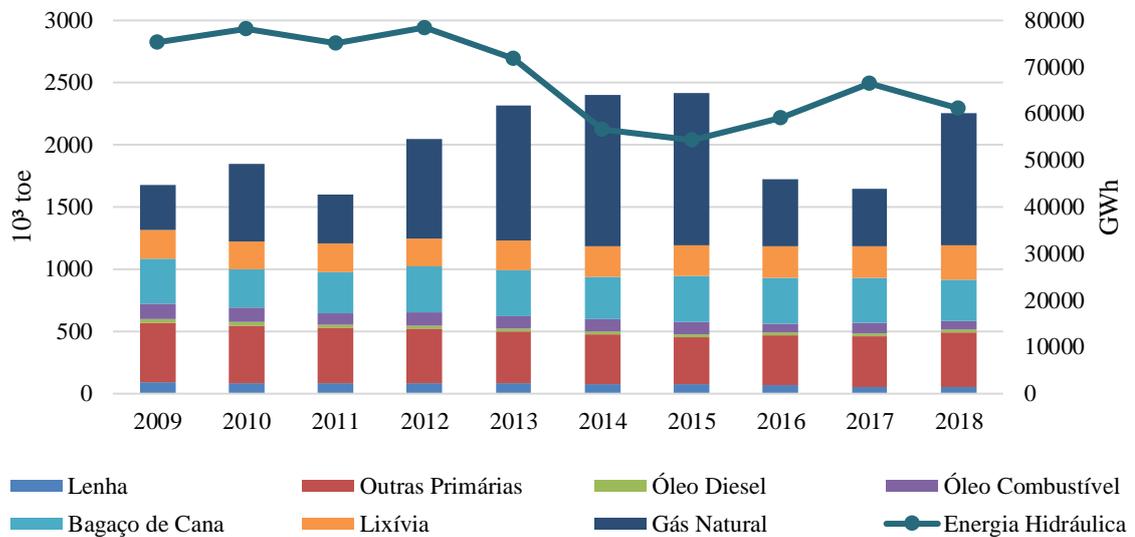
3.2.3.1 Setor elétrico

O campo produtor de energia elétrica a partir de termelétricas a gás natural no estado de São Paulo conta com alguns empreendimentos registrados como centrais geradoras. Esses centros podem ser classificados como autoprodutores de energia elétrica (APE), produtores independentes de energia elétrica (PIE) ou ainda pequenas centrais geradoras com uma capacidade instalada de 5MW ou menos (REG), as quais não necessitam de outorga do registrado para operar. No total, 47 empreendimentos estão dispostos geograficamente junto aos principais gasodutos do estado de São Paulo (IBGE, 2015; SIGEL, 2020).

Além do gás natural, a geração de eletricidade é oriunda da hidráulica e de outras fontes térmicas, como é o caso da lenha, óleo combustível, bagaço da cana, lixo e outros. Na Figura 27 é exposto o consumo de combustíveis para a geração de energia elétrica e a geração hidráulica durante os anos de 2009 a 2018. Essa contagem engloba Centrais Elétricas de serventia pública e autoprodutores.

Durante o período observado, dois momentos foram fundamentais para explicar o progresso histórico das curvas. A partir de 2011, houve o início da produção de gás natural no Pré-Sal e a operação da Rota 1, que liga os campos de Lula (atual Tupi) e Sapinhoá até a Unidade de Tratamento de Gás Monteiro Lobato (UTCGA) de Caraguatatuba, o que sugere uma relação com o crescimento do uso do gás natural no estado de São Paulo. O segundo momento refere-se ao crescimento que ocorreu ainda devido à crise hídrica entre os anos de 2014 e 2016. Este evento impulsionou a necessidade de outra fonte de energia, o que também contribuiu para o aumento do uso do gás natural. O período de crise hídrica também influenciou nas tarifas de energia elétrica no país, resultando em cobranças mais altas devido à necessidade de acionamento das termelétricas (inclusive aquelas alimentadas a gás natural) (GALVÃO; BERMANN, 2015).

Figura 27: Progresso da geração elétrica por meio de centrais térmicas (10^3 toe, colunas) e hidráulica (GWh, linha com marcadores) entre os anos de 2009 e 2018 no estado de São Paulo.

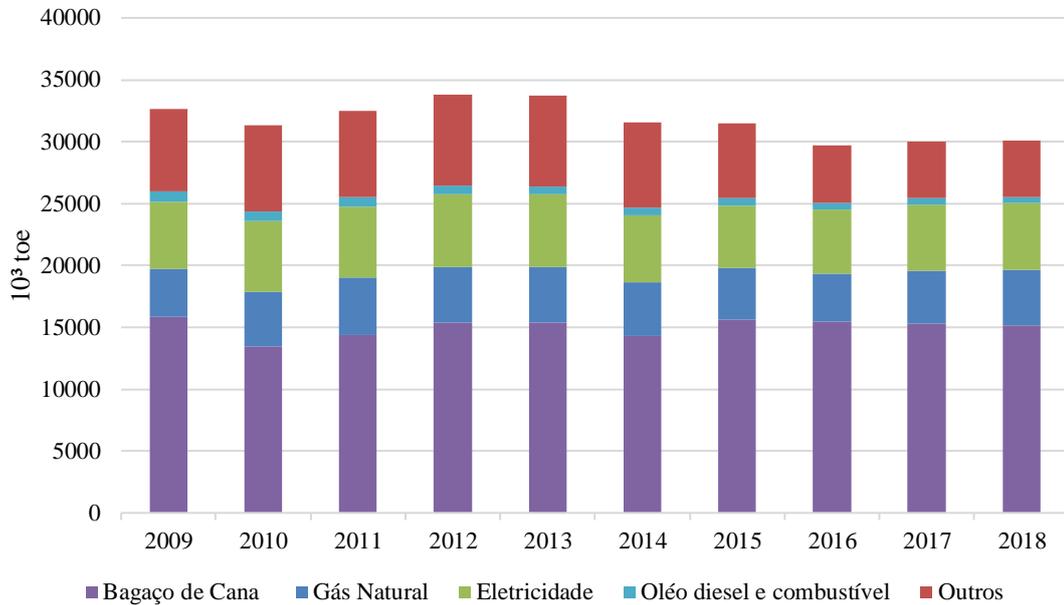


Fonte: Elaboração própria com base em SIMA-SP (2019a).

3.2.3.2 Setor industrial

O parque industrial no estado de São Paulo apresenta uma grande variedade de subsetores, desde aqueles caracterizados por baixo uso da tecnologia (32,8%) até alta tecnologia (12,5%). A curva de demanda de recursos energéticos no setor industrial é apresentada na Figura 28. Infere-se que as tendências moderadas de ascensão no consumo até o ano de 2013, seguida de uma estagnação/descida, são condizentes com a curva do PIB do setor secundário até 2018. Sugere-se que esta queda é relativa à recessão econômica que afetou o país (COSTAS, 2015). Portanto, essa diminuição no consumo não se deve ao aumento da eficiência energética, mas às oscilações do mercado industrial.

Figura 28: Consumo de combustíveis no setor durante os anos de 2009 e 2018. A categoria “outros” engloba: Carvão Vapor, Lenha, GLP, Carvão Vegetal, Gás de Refinaria e Coqueria, Coque Carvão Mineral, outras primárias e outras secundárias do petróleo.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados disponíveis em SIMA-SP (2019a).

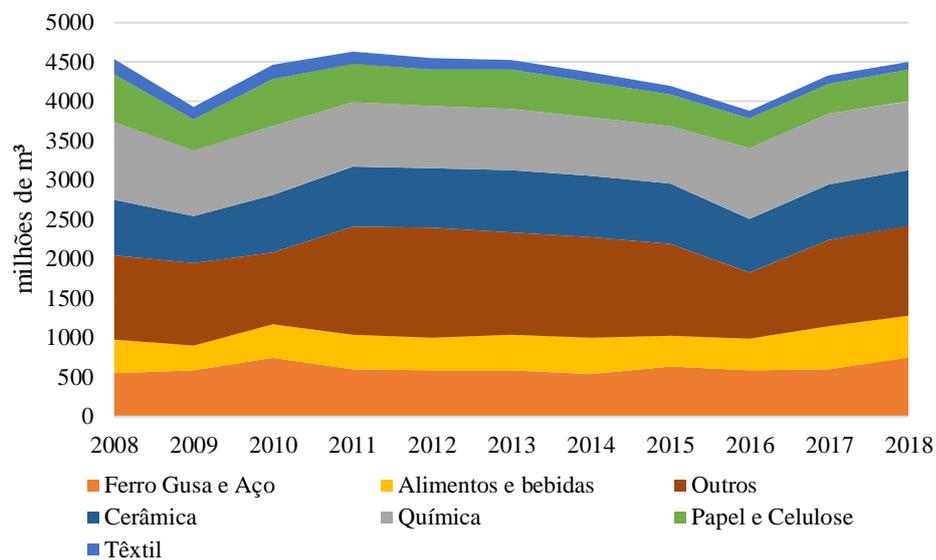
Na Figura 28, é evidente a relevância do bagaço de cana no setor industrial para a substituição de outros derivados de combustíveis fósseis no geral. Tanto este insumo como o gás natural permitem que a utilização de óleo diesel e óleo combustível e outros derivados de petróleo mais poluentes seja reduzida. Dessa forma, uma vantagem do gás natural é o fato de ser uma fonte que não depende das oscilações das safras, uma vez que seu fornecimento não tem interferência por este tipo de variável.

Segundo Strapasson (2004), o setor industrial foi aquele que apresentou maior potencial da entrada de energia química, sobretudo associado ao gás natural, em substituição à eletricidade. De acordo com os resultados, muitas categorias industriais têm potencial de economia na utilização de energia primária para fins térmicos, inclusive ao levar em consideração o rendimento térmico¹⁰ das usinas termelétricas (STRAPASSON, 2004). Posteriormente, Gallo (2018) demonstrou os potenciais de penetração do gás natural para substituir, além da eletricidade, o óleo combustível e óleo diesel nos diferentes subsectores industriais.

¹⁰ O rendimento térmico (η) é o quociente entre o trabalho mecânico gerado nas turbinas de uma usina termelétrica e a quantidade de energia, na forma de calor, fornecida.

Os processos térmicos de cada setor variam conforme o uso final, podendo gerar aquecimento direto ou calor no processo. Alguns exemplos de utilização são em fornos, estufas de secagem, aceleração na fermentação ou outros tratamentos. A Figura 29 retrata o consumo de gás nas diferentes atividades do setor industrial do estado de São Paulo. As áreas que aumentaram em valores absolutos o consumo de gás natural no período de 2008 e 2018 concentram-se na indústria de ferro gusa e aço, alimentícia (mesmo com o grande predomínio de bagaço de cana nesse setor) e outros, como vidros e centrais elétricas.

Figura 29: Consumo de gás natural nas atividades industriais do estado de São Paulo em milhões de m³.



Fonte: Elaboração própria com base em SIMA-SP (2019a).

3.2.3.3 Setor residencial

Neste setor, o gás natural pode auxiliar no suprimento de, principalmente, dois usos finais: aquecimento e cocção. Em relação ao aquecimento, o uso predominante é em chuveiros. A principal fonte energética utilizada para suprir tal demanda é a eletricidade e, mais recentemente, a energia gerada a partir de coletores solares acoplado a um *backup* (elétrico ou a gás natural). Outros exemplos que utilizam de energia térmica são ferros de passar roupa e aquecimento de piscinas. Em relação à cocção, o gás natural ainda compete com outros combustíveis, como GLP e lenha.

Nos últimos anos, o setor residencial tem apresentado um aumento do uso de gás natural, sobretudo impulsionado pelos investimentos das empresas de distribuição no estado de São

Paulo (COMPASS, 2020). A Figura 30 demonstra a demanda do setor residencial no estado de São Paulo por combustível durante o período de 2009 e 2018. O carvão vegetal e querosene constam no relatório da SIMA-SP, mas não correspondem a mais de 0,2% no período observado. A partir do gráfico, determina-se que a taxa de consumo de gás natural, em média, aumentou 6,6% ao ano. Assinala-se que, apesar do crescimento do uso do gás natural no setor, a sua participação dentre as outras fontes primárias é a menor. Mesmo assim, este insumo apresenta um alto potencial de substituinte de outros energéticos nos usos finais citados. Evidentemente, o uso da eletricidade vai muito além daquele que o gás natural poderia substituir, como para a iluminação ou utilização de aparelhos eletrônicos. Contudo, salienta-se que o aquecimento de água para banho, que é um dos maiores consumidores de energia no setor residencial, é um dos principais alvos.

Figura 30: Uso das diferentes fontes primárias no setor residencial em 10^3 toe.



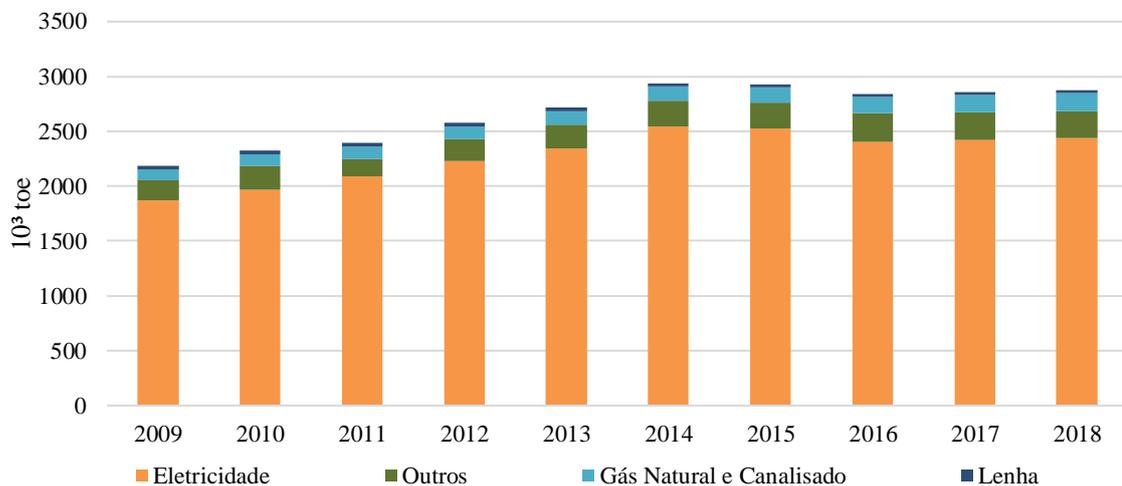
Fonte: Elaboração própria com base em SIMA-SP (2019a).

3.2.3.4 Setor comercial

O setor comercial abrange uma grande diversidade de subsetores, assim como os usos finais de energia: iluminação, climatização, aquecimento de água, equipamentos, dentre muitos outros. O consumo energético apresentou um crescimento até o ano de 2014, a partir de quando houve a estagnação (ver Figura 31). Em relação aos combustíveis utilizados, é notória a dominância da eletricidade, inclusive devido ao aquecimento resistivo. Dessa forma, para aquecimento e cocção, o gás natural também encontra espaço para substituição da eletricidade e, quando possível, de outros combustíveis como lenha, GLP, óleo diesel e óleo combustível (esses três últimos incluídos na categoria “Outros”, na Figura 31).

De acordo com os dados fornecidos pelas empresas distribuidoras de gás natural, este setor apresentou um crescimento no número de clientes e acentuado nos últimos anos, junto ao aumento da malha de distribuição. Segundo a Comgás (2014), o foco da captação de clientes está na difusão da ideia do uso do gás natural em sistemas de climatização, em fornos, geração de energia, entre outros. A partir de 2009, verifica-se um crescimento do uso do gás natural, enquanto há a tendência de decréscimo da lenha e óleo diesel. Devido às estratégias das distribuidoras e às vantagens da substituição pelo gás natural, a taxa média de crescimento nesse setor durante o período de 2009 a 2018 atingiu de 5,1% ao ano. Dessa forma, em 2018, o gás natural atingiu 6% do total energético consumido no setor.

Figura 31: Uso das diferentes fontes primárias no setor comercial.



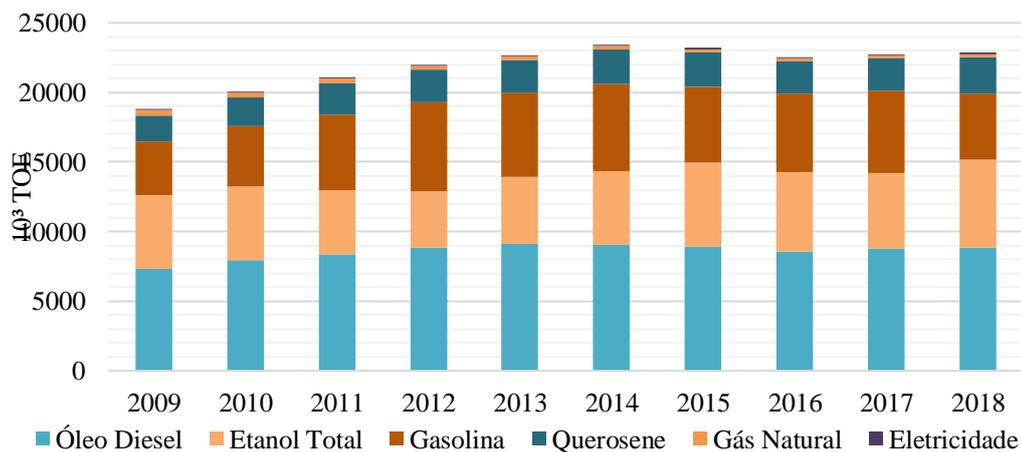
Fonte: Elaborado pela autora com dados de SIMA-SP (2019a).

3.2.3.5 Setor de transporte

No caso do setor de transporte, o gás natural tem destaque no setor rodoviário como um potencial consumidor. Em relação aos combustíveis utilizados, o óleo diesel, etanol e gasolina são os mais consolidados no setor (ver Figura 32). O gás natural, por sua vez, durante o período estudado, apresentou uma queda no valor consumido e, em 2018, representou menos de 1% do consumo total. Ademais, este setor, dentre todos os analisados neste trabalho, é o único que não apresentou um crescimento no número de clientes, isto é, nos postos que fornecem GNV, concomitante ao aumento das malhas de distribuição. No entanto, a Comgás, em seu relatório anual, assinala o alto custo-benefício do gás natural, além de um menor impacto ambiental quando comparado com outros combustíveis fósseis (COMGÁS, 2017).

A Figura 32 ilustra que a curva de consumo energético do setor de transporte apresentou um formato bem similar ao setor comercial: até o ano de 2014, houve um aumento acentuado e posterior estagnação. Em relação ao GNV, a queda no consumo foi atenuada a partir do ano de 2016, seguido por um pequeno aumento devido ao grande número de carros que foram convertidos para GNV, impulsionados pela maior competitividade de preço em relação ao etanol e à gasolina. Por fim, em 2018, houve a greve nacional dos caminhoneiros, na qual o abastecimento de combustíveis via rodovias foi comprometido durante alguns dias. Durante esse período, e após a greve, observou-se um crescimento do consumo de GNV em alguns estados, incluindo São Paulo.

Figura 32: Consumo energético do setor de transportes por combustível durante o período de 2009 a 2018 em 10^3 toe.



Fonte: Elaborado pela autora com dados de SIMA (2019).

3.3 Políticas públicas voltadas a área de energia no estado de São Paulo

No âmbito do estado de São Paulo, a discussão e preocupação em relação às mudanças climáticas é iniciada em 1995, a partir do Programa Estadual de Mudanças Climáticas (PROCLIMA) organizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a fim de divulgar e promover fóruns de discussão, colaborar com iniciativas federais e coordenar o 1º Inventário de Gases de Efeito Estufa do Estado de São Paulo. Essa discussão, porém, só é enfatizada no ano de 2005, com a criação do Fórum Paulista de Mudanças Climáticas Globais e de Biodiversidade (FPMCB). Este fórum teve como objetivo conscientizar e mobilizar as diferentes esferas do estado sobre o tema de mudanças climáticas e políticas públicas para mitigá-las.

Em consonância com medidas federais, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a Política Estadual de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo (PEMC) é definida e regulada em 2009 e 2010, respectivamente. Nela, definiu-se os objetivos estaduais frente à mitigação e adaptação das mudanças do clima. O escopo desta política vai além do setor energético, alcançando atividades de uso do solo, consumo consciente, divulgação de informações (inventários de emissões), entre outros. Contudo, em relação ao setor energético, evidencia-se uma busca por aumento de fontes renováveis de energia na matriz elétrica, eficiência na utilização dos insumos energéticos – inclusive em edifícios públicos – e utilização de combustíveis menos poluidores. Novamente, ressalta-se o importante papel dos biocombustíveis, em especial na seção de transporte sustentável, uma vez que este setor é um dos grandes responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo. Por fim, a meta de redução nas emissões estipulada é de 20% até o ano de 2020, quando comparado ao ano de 2005 (ALESP, 2009).

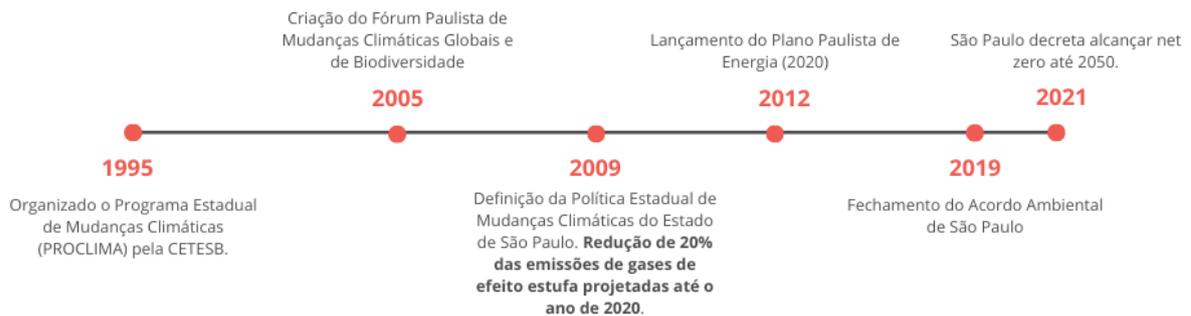
Como um dos resultados da PEMC, pode-se citar a realização de inventários das emissões de gases de efeito estufa para que haja avaliação, monitoramento e inserção de políticas públicas. Os critérios e a produção destes inventários anuais são de responsabilidade do PROCLIMA, ligado à CETESB e à atual Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Posteriormente, no ano de 2019, a CETESB promove o Acordo Ambiental de São Paulo para fomentar o compromisso da diminuição de gases de efeito estufa por parte de empresas associadas, até 2030, além de responsabilizá-las pelo fornecimento de informações sobre suas emissões (CETESB, 2021). Merece destaque outra ferramenta de planejamento, totalmente voltada ao setor energético, intitulada de Plano Paulista de Energia – 2020 (PPE/2020). O Plano foi produzido pela Secretaria de Energia e publicado em 2012. Em forma de um relatório, ele descreve os potenciais energéticos do estado e busca integrá-los de forma a produzir projeções para as próximas décadas e políticas públicas que atinjam uma maior sustentabilidade no setor e ao mesmo tempo promovam o desenvolvimento sócio-econômico (SECRETARIA DE ENERGIA, 2012b).

Dentre os capítulos do PPE/2020, ressalta-se aquele que tratou sobre o uso do gás natural no estado. Segundo exposto no plano, houve oportunidades de consolidar a indústria de gás natural no estado devido ao aumento da oferta pelo Pré-sal. Além disso, foi proposto o estímulo da entrada do gás na matriz paulista em setores que agregariam valor e competitividade econômica, diminuiriam os impactos ambientais ou melhorariam nos índices de eficiência energética. Essas projeções fomentam um dos objetivos colocados no Programa Paulista de

Petróleo e Gás Natural (PPPG)¹¹, que é o de estímulo ao gás natural com destaque para cogeração, transporte coletivo e usinas termelétricas de ciclo combinado com baixo impacto – este ainda podendo ancorar a construção de gasodutos.

O PPE acrescenta, ainda, a substituição de derivados de petróleo e outros energéticos mais poluidores no setor industrial. Por fim, o capítulo se encerra com algumas conclusões sobre a substituição parcial do potencial verificado no setor industrial e propostas de ações nesse sentido. Também foi mencionada a relevância de incentivo de pesquisas e desenvolvimento para reconhecimento de outras oportunidades do gás natural que permitam atingir o objetivo da PEMC de redução de emissões e alto percentual de renováveis na matriz (SECRETARIA DE ENERGIA, 2012b). A seguir, mostra-se uma figura que demonstra as ações descritas acima (ver Figura 33)

Figura 33: Ações realizadas pelo poder público de São Paulo que se relacionam ao processo de descarbonização do setor energético no estado de São Paulo (1995-2021).



Fonte: Elaborado pela autora.

¹¹ Instituído em agosto de 2010, pelo decreto estadual nº 56.074.

4 IDENTIDADE DE KAYA E DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES NO ESTADO DE SÃO PAULO

4.1 Índices e indicadores ambientais

4.1.1 Revisão conceitual e abordagens utilizadas

Durante a Conferência Rio-92 criou-se a Agenda 21, um instrumento que descreve bases de ações e propósitos para a implementação de programas conforme os aspectos de cada região. O objetivo da Agenda 21 estava relacionado a guiar a sociedade como um todo para o desenvolvimento sustentável integrado e equilibrado. Dentre os vários temas abordados neste documento, o último capítulo dedica-se à obtenção de informações e à aplicação de métodos adequados que permitiriam uma avaliação apropriada dos avanços no desenvolvimento sustentável para concomitante tomada de decisões dentro dos diversos contextos dos países (ONU, 1992).

O monitoramento desses avanços conta com a etapa de coleta de dados brutos de diversas áreas que englobam o desenvolvimento sustentável, como aspectos ambientais, demográficos, sociais e econômicos. Ademais, esses dados devem atingir alguns critérios de mensurabilidade, auditabilidade, confiabilidade e economicidade (FERREIRA; CASSIOLATO; GONZALEZ, 2009; FGV, 2015). Após essa fase, ainda há agregação e tratamento para a geração dos chamados indicadores ambientais e de sustentabilidade. Esses indicadores efetivamente permitem a ponderação das mudanças de fenômenos ocorridas dentro do contexto global, regional ou até mesmo local. Assim, a partir do uso apropriado de métodos de coleta, análise e interpretação dos dados, é possível fundamentar decisões e políticas públicas que estimulem a sustentabilidade em âmbitos nacionais e internacionais (MARZALL; ALMEIDA, 2000; ONU, 1992).

Dessa forma, um passo inicial neste estudo é verificar o significado dos indicadores, suas funções e vantagens. Na literatura é identificada uma vasta amplitude de definições e nomenclaturas, as quais são discutidas por Gallopín (1996). Segundo o autor, os indicadores são associados aos sinais de certos tributos relevantes ao entendimento de um recorte de interesse do sistema, a partir da agregação de dados numerosos e complexos, os quais proporcionam o conhecimento e análise de um contexto, além de evidenciarem as modificações ocorridas também por meio de ações antrópicas (GALLOPÍN, 1996).

Por sua vez, Siche *et al.* (2007) dissertam sobre um equívoco frequente à utilização dos termos indicadores e índices devido à grande quantidade de definições e utilização encontrada na literatura. Os autores ainda relacionam dados primários e agregados, sub-indicadores, indicadores, sub-índices e índices como uma relação hierárquica conforme o nível de agregação (SICHE *et al.*, 2007). De acordo com essa categorização, os dados brutos embasam a definição dos outros níveis, inclusive dos índices. Porém, por não apresentarem tratamento e análises, acabam não evidenciando o significado inerente aos indicadores e índices.

Portanto, os indicadores revelam certas condições de um sistema a partir de um pré-tratamento dos dados brutos com operações estatísticas simples. Já a figura de maior junção de informações é o índice, um agrupamento de indicadores (ou até mesmo outros índices) que representa uma interpretação acurada da realidade de um sistema. Assim, a grande quantidade de dados, quando condensados e analisados – formando o topo dessa classificação hierárquica –, constituem informações relevantes para os tomadores de decisão, formuladores de políticas públicas e público em geral (SHIELDS; ŠOLAR; MARTIN, 2002).

Dessa forma, as vantagens associadas à utilização dos índices e indicadores podem ser resumidas em: a) sintetizar informações de caráter técnico científico para transmiti-las facilmente conforme o público alvo (cientistas, criadores de políticas públicas, público em geral); b) reconhecimento dos pontos chave para a descrição de condições e do sistema analisado e, assim, avaliá-lo de acordo com seu avanço para alcance de objetivos pré-definidos; c) entendimento das tendências existentes, e d) instrumento para embasamento de decisões e gestão ambiental. Por outro lado, existem algumas possíveis limitações, a depender do caso, como a falta de dados brutos, dificuldades na criação de expressões matemáticas que consigam representar as condições descritas pelos indicadores, falta de critérios apropriados para a escolha dos indicadores e camuflagem de situações mais específicas no sistema devido ao agrupamento de informações (DGA, 2000).

4.1.2 Abordagens teóricas

Apesar de a importância sobre os índices de sustentabilidade ter sido ressaltada na Conferência Eco-92, outros estudos teóricos também demonstraram a relação entre indicadores econômicos e o impacto ambiental. Um exemplo notório é o desenvolvimento da hipótese da Curva de Kuznets na esfera ambiental (ou EKC, *Environmental Kuznets Curve*). No trabalho original, Kuznets afirmou que a ascensão do crescimento econômico aumentava a desigualdade de renda até certo ponto, quando, então, ela iniciava seu decréscimo, formando uma curva em

formato de “U invertido” (KUZNETS, 1955). Posteriormente, outros autores relacionaram o crescimento econômico com a degradação ambiental, também em formato de “U invertido”, demonstrando que ao observar o crescimento econômico, a partir de um ponto, o impacto ambiental é reduzido com o aumento da atividade econômica (DAVID I; MICHAEL; EDWARD, 1996; PANAYOTOU, 1994).

Segundo Panayotou (1994), a degradação ambiental apresenta uma ascensão devido às mudanças estruturais, como o avanço da agropecuária, o desflorestamento e a industrialização. Ao mesmo tempo em que essas modificações geram um aumento dos níveis de renda *per capita* em um primeiro momento, elas também acentuam a degradação ambiental, problemas que podem ser agravados por algumas distorções causadas por subsídios, proteção à indústria e à falta de precificação ou subprecificação de recursos naturais. No entanto, ao atingir certo nível de renda, há uma mudança que avança na direção da redução da degradação ambiental por meio de uma maior preocupação com questões ambientais, assim como induções por meio de ações regulatórias, tecnológicas e de investimentos. Panayotou (1994) reforça ainda a necessidade das políticas, as quais devem ser voltadas para o achatamento da curva, em vez de políticas que, exclusivamente, sejam voltadas à aceleração do desenvolvimento econômico para fins de sanar a degradação ambiental. Isso é mencionado porque o *turning point* pode demorar décadas para ser atingido, além do fato de que alguns tipos de degradação podem ter seus abatimentos mais custosos ou inviáveis no futuro, ou até mesmo restringir o crescimento econômico de uma nação. Dessa forma, além da taxa de desenvolvimento, é fundamental a verificação de sua fonte de procedência (PANAYOTOU, 1994).

Nesse sentido, a EKC se destaca por demonstrar como indicadores ambientais poderiam estar relacionados a indicadores econômicos. Contudo, as críticas sobre esse modelo hipotético mencionam que a queda da curva é relacionada à transferência de indústrias mais poluentes dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento, não à sua renda *per capita*. Portanto, os países em desenvolvimento, quando atingirem altos níveis econômicos, terão uma dificuldade maior em aplicar essa transferência e reduzir a degradação ambiental. Outras deficiências no modelo sugeridas estão relacionadas à possível heterogeneidade dos indicadores econômicos dentro de um mesmo país, simultaneidade, e algumas variáveis que são omitidas e que podem enviesar a curva de Kuznets. Além disso, quando o indicador de degradação ambiental possui como foco as emissões de CO₂, a curva observada em alguns casos não se adequa ao que é proposto pela EKC (STERN, 2004).

Essas e outras avaliações permitem o reconhecimento do contexto ambiental, o seu contínuo monitoramento e o desenho para os planos de limitação, redução e/ou mitigação de

emissões de gases de efeito estufa para o futuro. Porém, é fundamental a escolha dos indicadores a serem utilizados, assim como a sua interpretação em relação ao total do impacto ambiental a ser investigado. Sendo assim, a emissão de CO₂ o foco desse estudo.

Vale ressaltar que houve vários avanços na definição de métodos de reconhecimento de indicadores determinantes para as emissões de CO₂ nas últimas décadas a fim de estabelecer uma alternativa para melhor entendimento entre a degradação ambiental, sobretudo voltada à utilização de energia e às emissões de gases de efeito estufa, e os efeitos relacionados ao desenvolvimento econômico. Assim, os próximos tópicos tratam brevemente da Identidade de IPAT, Identidade de Kaya e Identidade de Kaya Estendida.

4.1.2.1 Identidade IPAT

Antes mesmo de se obter a curva de Kuznets ambiental, outros autores já haviam decomposto o resultado de degradação ambiental em alguns efeitos econômicos, sociais e tecnológicos. As ações antrópicas de fato alteram o meio ambiente, mas para quantificar mais precisamente as diferentes forças que agem e para que ocorra uma avaliação desse impacto, algumas abordagens foram desenvolvidas e aperfeiçoadas com o tempo. Um dos modelos de grande influência ficou conhecido como Identidade IPAT. A primeira vez em que essa representação algébrica surgiu foi na década de 1970, quando os autores Ehrlich e Holdren apresentaram essa alternativa para substituir equações anteriores que relacionavam população, produção e poluição, sem levar em consideração o que eles julgavam necessário (HOLDREN, 2018).

A Identidade de IPAT busca relacionar o aumento do número da população humana, a taxa de crescimento e efeitos de afluência, isto é, níveis de renda e tecnologia utilizados nos padrões de consumo vigentes associados aos níveis de interferências ambientais. Na fórmula $I = P * A * T$

(Equação 1), as forças de População (P), Afluência (A) e Tecnologia (T) multiplicam-se e seu produto é resultante da contribuição para o Impacto Ambiental (I). Dessa forma, é possível identificar a relação que há entre os indicadores e o impacto ambiental, além do reconhecimento que nenhum dos fatores atua individualmente, uma vez que todos são multiplicados entre si, mesmo que permaneçam inalterados em um dado intervalo de tempo.

$$I = P * A * T$$

(Equação 1)

Basicamente, os efeitos de impacto ambiental variam conforme o escopo do estudo, podendo atingir contaminação de água, desflorestamento ou emissões de gases de efeito estufa. O efeito demográfico é medido de acordo com a taxa de crescimento da população e a pressão ocasionada devido à maior necessidade de recursos naturais para suprir essa demanda. Já o efeito da afluência pode ser definido a partir do consumo ou produção *per capita*. E, por fim, o efeito tecnologia é descrito como o impacto ambiental por unidade de consumo ou produção (YORK; ROSA; DIETZ, 2003).

Posteriormente, outros autores ainda propuseram uma modificação desse modelo chamada de ImPACT (WAGGONER; AUSUBEL, 2002), no qual o fator de tecnologia se desagregou em outros dois fatores (consumo ou produção por PIB e impacto ambiental por unidade de consumo/produção), ou STIRPAT, no qual os efeitos são alterados conforme os coeficientes de cada país (DIETZ; ROSA, 1994). Na segunda modificação, os autores buscaram reverter algumas das limitações dos modelos anteriores, ou seja, a não permissão de englobar hipóteses com efeitos que não fossem proporcionais ou monolíticas em um modelo estocástico (YORK; ROSA; DIETZ, 2003). Assim, na (Equação 2) pode-se observar a constante de escala a e o exponenciais b , c e d , que representam as particularidades das hipóteses estudadas e observadas nos dados. Além disso, há o ε , que representa um fator de erro, conforme a equação a seguir:

$$I = aP^bA^cT^d\varepsilon$$

(Equação 2)

4.1.2.2 Identidade de Kaya

Um outro desdobramento da Identidade IPAT é a Identidade de Kaya. Em geral, a proposição dessa Identidade, realizada por Kaya, em 1997, relaciona fatores demográficos, econômicos, energéticos e de fatores de emissão com as emissões totais de CO₂ (KAYA; YOKOBORI, 1997). Assim, tal abordagem permite o olhar para o passado, para compreender os maiores impulsionadores das emissões e, de acordo com isso, realizar projeções futuras para avaliar as possíveis decisões a serem tomadas. A seguir, a equação base (Equação 3) é apresentada:

$$EM_{tot} = \frac{EM_{tot}}{E_{cons}} \times \frac{E_{cons}}{PIB} \times \frac{GDP}{Pop} \times Pop$$

(Equação 3)

O EM_{tot} é a quantidade da emissão total de CO_2 , E_{cons} é a energia consumida total, PIB é a expressão do Produto Interno Bruto e Pop é a população. Dessa maneira, a Identidade de Kaya associa a emissão de carbono com um conjunto de quatro efeitos: a intensidade de CO_2 por unidade de energia consumida (fator de emissão), a intensidade energética por cada unidade do PIB (intensidade energética), o produto interno bruto *per capita* e influência da população. Em particular, os primeiros dois efeitos são totalmente relacionados às fontes de energia utilizadas. Assim, de acordo com os efeitos, a identidade de Kaya pode ser reescrita da seguinte forma (Equação 4):

$$Emiss\tilde{a}o_{CO_2} = P * E * I_E * I_C \quad (\text{Equa\~{c}o\~{a}o 4})$$

Na equação, P (Pop) e E ($\frac{PIB}{Pop}$) são efeitos do crescimento da população e do PIB *per capita*, chamados de escala. Por sua vez, I_E ($\frac{E_{cons}}{PIB}$) e I_C ($\frac{EM_{tot}}{E_{cons}}$) são efeitos de intensidade, sendo o primeiro intensidade energética e o segundo intensidade de carbono. Logo, para que ocorra a verificação de cada efeito, são utilizadas as variações desses indicadores durante o período observado, os quais são representados por: ΔP , ΔE , ΔI_E e ΔI_C .

Um exemplo da utilização dessa abordagem é realizado por Medeiros (2007), na qual ele também busca visualizar o efeito da entrada de gás natural nos diversos setores da economia brasileira entre o período de 1970 a 2007, subdividindo esse período em cinco partes. Outro exemplo é a utilização da Identidade de Kaya para comparar os diferentes efeitos nos dez países que comportam os maiores níveis de emissão de CO_2 no mundo durante as últimas décadas (TAVAKOLI, 2018).

4.1.2.3 Identidade de Kaya Estendida

Com a evolução dos estudos na identificação e monitoramento dos *drivers* acima mencionados e que alteram as emissões de CO_2 , a Identidade de Kaya tem sido utilizada por outros autores para verificar com mais detalhe a substituição de fontes energéticas dentro da matriz de um certo país ou região (HENRIQUES; BOROWIECKI, 2014; O'MAHONY, 2013). É nesse ponto que o efeito de intensidade energética é decomposto em mais fatores para que a entrada ou não de alguma fonte de energia seja analisada mais detalhadamente. Portanto, essa modificação gera outros efeitos que começam a ser observados, sendo eles: substituição de combustíveis fósseis por outro combustível fator de emissão dos combustíveis fósseis e participação de combustíveis emissores de carbono dentro da matriz. A seguir, apresenta-se a

equação utilizada (Equação 5) em alguns estudos, assim como a aplicada por Henriques e Borowiecki (2014) para a verificação do efeito da transição dos combustíveis fósseis para a biomassa:

$$EM_{tot} = \frac{EM_{tot}}{Cons_{CF}} \times \frac{Cons_{CF}}{Cons_C} \times \frac{Cons_C}{Econs} \times \frac{Econs}{PIB} \times \frac{PIB}{Pop} \times Pop$$

(Equação 5)

Nela, EM_{tot} corresponde às emissões totais do setor energético, $Cons_{CF}$ é o consumo total de combustíveis fósseis (derivados de petróleo + gás natural), $Cons_C$ é o consumo de combustíveis com carbono na composição (combustíveis fósseis + etanol), $Econs$ é resultado do consumo total de energia, PIB é o Produto Interno Bruto e Pop é relativo à população. Reescrevendo tal fórmula para ressaltar os diversos efeitos, temos (Equação 6):

$$Emiss\tilde{a}o_{CO_2} = I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P$$

(Equação 6)

Nesta equação, P (Pop) e E ($\frac{PIB}{Pop}$) são os efeitos da população e PIB *per capita*; I_E ($\frac{Econs}{PIB}$) e I_{CF} ($\frac{EM_{tot}}{Econs}$) são efeitos de intensidade energética e intensidade de emissões dos combustíveis fósseis; S_{CF} ($\frac{Cons_{CF}}{Cons_C}$) e S_{CE} ($\frac{Cons_C}{Econs}$) são os efeitos associados à participação dos combustíveis fósseis dentre os combustíveis com composição de carbono e à participação de combustíveis compostos por carbono dentro da matriz energética total. Da mesma forma, como mencionado no item anterior, para que ocorra a verificação de cada efeito, utilizou-se as variações desses indicadores durante o período observado, os quais são representados por: ΔI_{CF} , ΔS_{CF} , ΔS_{CE} , ΔI_E , ΔE e ΔP .

Por sua vez, esses efeitos podem ser divididos em tipos de escala, intensidade e estruturais. Os efeitos de escala são aqueles que demonstram a afluência e o total da população, isto é, indicados por E e P na fórmula. Os efeitos de intensidade são aqueles que demonstram o quanto de CO_2 é emitido por unidade de energia dos combustíveis fósseis, ou o quanto de energia é necessário para compor uma unidade de PIB, e são representados por I_{CF} e I_E . Por fim, os efeitos estruturais são aqueles que demonstram a composição dos combustíveis fósseis dentre aqueles que emitem CO_2 e a participação de combustíveis na composição da matriz energética, sendo representados por S_{CF} e S_{CE} , respectivamente. A Tabela 2 lista um compilado dos efeitos que compõem a Identidade de Kaya Estendida, assim como a classificação do tipo de efeito, o indicador (apresentação das variáveis) e a descrição.

Tabela 2: Efeitos da Identidade de Kaya Estendida.

Efeito	Tipo de efeito	Indicador	Descrição
<i>P</i>	Escala	Pop	Mudança no número total de habitantes.
<i>E</i>	Escala	$\frac{PIB}{Pop}$	Mudança na renda <i>per capita</i> média.
<i>I_{CF}</i>	Intensidade	$\frac{EM_{tot}}{Cons_{CF}}$	Mudança na quantidade de emissão de CO ₂ por unidade de combustível fóssil consumido. Ou seja, verifica-se a alteração na qualidade do combustível e das tecnologias que podem abater essas emissões.
<i>I_E</i>	Intensidade	$\frac{Econs}{PIB}$	Mudança na quantidade de energia necessária para a produção de uma unidade de PIB. Ou seja, é um efeito que observa as alterações na eficiência energética e/ou eficiência econômica no sistema energético, além da escolha de novas tecnologias e o comportamento de consumo.
<i>S_{CF}</i>	Estrutural	$\frac{Cons_{CF}}{Cons_C}$	Mudança na quantidade de combustíveis fósseis em relação aos combustíveis emissores de CO ₂ . Ou seja, verifica-se a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis, como etanol.
<i>S_{CE}</i>	Estrutural	$\frac{Cons_C}{Econs}$	Mudança na contribuição de combustíveis fósseis e biocombustíveis dentro da matriz energética.
<i>Emissões</i>	Agregado	$Emissão_{CO_2}$	As mudanças totais nas emissões

Fonte: Elaborado pela autora.

Outros estudos também utilizaram a Identidade de Kaya Estendida como principal foco de observação para os efeitos da entrada de alguns combustíveis ou do melhoramento em algum dos outros efeitos. No entanto, a sua decomposição pode variar de acordo com o objetivo de cada estudo. Como exemplo, tem-se a observação da diminuição de emissões no setor comercial da China (MA; CAI; CAI, 2018), a verificação do comportamento dos efeitos na Índia

(ORTEGA-RUIZ; MENA-NIETO; GARCÍA-RAMOS, 2020), a resposta trazida com a incorporação de fontes renováveis na Irlanda (O'MAHONY, 2013) ou a influência da entrada da fonte nuclear em uma análise entre diferentes países, como Brasil, China, Portugal e Reino Unido (LIMA *et al.*, 2016).

Diante do exposto, a Identidade de Kaya Estendida é considerada uma importante ferramenta para o desdobramento mais detalhado sobre os fatores que influenciam as emissões de CO₂. Conforme é decomposta, ela pode auxiliar em uma verificação mais detalhada na incorporação de certas fontes energéticas, como no caso do objeto deste trabalho, o gás natural.

4.2 Análise de decomposição de índices

Para o cálculo dos efeitos propriamente ditos nas equações acima, uma das técnicas que pode ser utilizada é a Análise de Decomposição por Índices (ADI), que utiliza dados agregados de uma nação para avaliação da influência dos contextos econômicos, demográficos e energéticos em relação aos aspectos ambientais. Mas, além disso, esse método pode avaliar, em uma dada conjuntura, as influências do crescimento econômico, alteração dos setores, incorporação de políticas públicas, avanço na tecnologia, entre outros aspectos.

A análise, acima descrita, baseia-se em dados históricos para definir a contribuição das mudanças nos determinantes e efeitos que influenciam o indicador alvo deste estudo, ou seja, as emissões de CO₂. Uma de suas vantagens é a necessidade de uma menor quantidade de dados específicos quando comparado com outras ferramentas de análise – por exemplo, a Análise de Composição Estrutural (SDA, ou *structural decomposition analysis*), que leva em consideração dados de insumo-produto –, gerando resultados mais qualitativos e com uma aplicação mais simples. No entanto, para o reconhecimento da estrutura interna de um setor, além da distinção de efeitos diretos e indiretos de forma mais acurada e quantitativa, é necessária a utilização de outra técnica, como a SDA (MEDEIROS, 2007).

A agregação dos efeitos pode seguir um padrão aditivo ou multiplicativo conforme a adequação em cada ocasião. No caso do modelo aditivo, os efeitos são diferenciados e adicionados para resultar a mudança total. Já no multiplicativo, os diversos efeitos são multiplicados entre si, destacando uma não individualidade de cada um deles. Em outras palavras, o aumento proporcionado por um efeito também impacta os outros, mesmo que esses permaneçam constantes.

A seguir são demonstrados os conceitos matemáticos utilizados em dois dos métodos de ADI para fins de verificação dos efeitos relacionados às emissões de CO₂. Uma questão

fundamental para a escolha das técnicas aqui apresentadas está relacionada à imperfeição dos métodos e valor residual, isto é, o resultado da diferença entre as emissões reais de CO₂ e o somatório dos diversos efeitos pré-definidos (quando os fatores são somados entre si) ou entre o quociente das emissões e a multiplicação dos fatores (quando os fatores são multiplicados entre si). Algumas soluções encontradas para esse impasse são omitir o valor residual ou explicá-lo por meio da interação entre todos os efeitos. No entanto, ambas as propostas apresentam problemas para garantir a acurácia do modelo, possibilitando valores superestimados ou subestimados ou ainda dúvidas ao leitor quanto à “solução”.

Para sanar esse impasse, propõe-se utilizar os métodos de decomposição completa para que os modelos consigam transmitir o que ocorre no contexto de uma localidade com precisão e, assim, seja garantida a sua confiabilidade. Essa solução torna-se fundamental, especialmente quando utilizada para a comparação entre regiões, uma vez que as diferenças entre os países, como o PIB e o consumo de energia, elevam os valores residuais (SUN, 1998; ZHANG; ANG, 2001). Para tanto, a solução destacada por Sun (1998) é o Método de Laspeyres Refinado (MLR ou RLM, em inglês, *Refined Lespeyres Method*), no qual utiliza-se o princípio desenvolvido em seu trabalho de 1996, denominado “*jointly created and equally distributed*”. Isto é, o termo residual criado conjuntamente por todos os efeitos e igualmente distribuídos entre eles (SUN, 1998). Mas, além desse, outro método com valor residual nulo é vastamente utilizado na literatura, sendo conhecido como Método de Divisa de Índices com Peso Médio Logarítmico (MDL ou LMDI, em inglês, *Logarithmic mean weight Divisa Index method*). Nos próximos tópicos, cada um desses métodos é abordado com mais detalhes.

4.2.1 Método de Laypeyeres Refinado

Neste tópico é abordada a demonstração do MLR. Para isso, apresenta-se uma suposta situação em que o indicador w pode ser decomposto em dois fatores nomeados de x e y , como é demonstrado na ((Equação 7):

$$w = x \cdot y$$

(Equação 7)

Assim, para avaliar as variações ocorridas no indicador w (Δw), a partir das oscilações dos fatores (Δx e Δy) entre um intervalo de tempo que inicia-se em 0 e alcança t , pode-se calculá-la por (Equação 8):

$$\Delta w = w^t - w^0 = x^t y^t - x^0 y^0 = (x^0 + \Delta x)(y^0 + \Delta y) - x^0 y^0 = \Delta x y^0 + \Delta y x^0 + \Delta x \Delta y$$

(Equação 8)

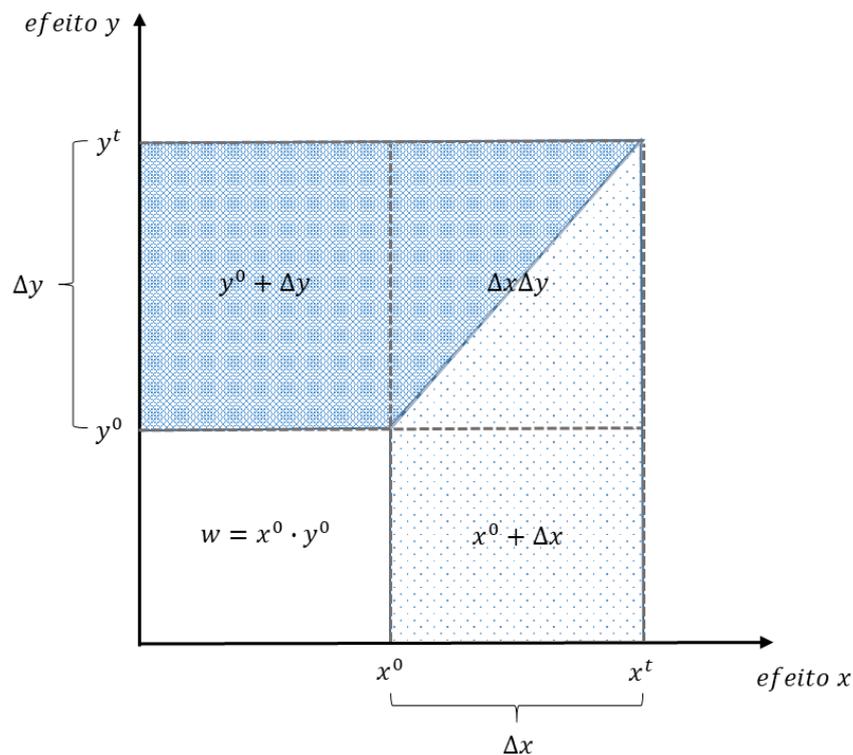
Assim, com o indicador w no tempo t , apresenta-se o seguinte cálculo (Equação 9):

$$w^t = x^0 y^0 + \Delta x y^0 + \Delta y x^0 + \Delta x \Delta y = w^0 + \Delta x y^0 + \Delta y x^0 + \Delta x \Delta y$$

(Equação 9)

A decomposição completa da agregação aditiva também pode ser o via gráfico (Ver Figura 34).

Figura 34: Demonstração gráfica da decomposição completa a partir do Método de Laspeyeres Refinado. Neste exemplo, apenas dois efeitos fazem parte da decomposição. A parcela preenchida mais clara é associada ao efeito de x e a parcela de preenchimento mais escura é associada ao efeito de y .



Fonte: Elaborada pela autora e modificada de Sun (1998).

Como pode ser observado, tanto na Figura 34 como na (Equação 10), o último termo é dividido igualmente para totalizar o efeito de x (Equação 11) e de y (Equação 12). Dessa forma, em uma situação hipotética, os dois efeitos teriam as seguintes composições:

$$\Delta w = E(x) + E(y),$$

(Equação 10)

onde:

$$E(x) = \Delta x y^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y$$

(Equação 11)

$$E(y) = \Delta y x^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y$$

(Equação 12)

Por fim, em seu artigo, Sun (1998) ainda generaliza a utilização desse método para decomposições geradas a partir de um número n de efeitos, como por exemplo, em $w = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$. Para o cálculo de Δw , temos que é o somatório de:

n termos com o formato de $\Delta(\Delta x_i, i = 1, 2, \dots, n) + \frac{n(n-1)}{2}$ termos com o formato de $\Delta(\Delta x_i \Delta x_j, i \neq j) + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}$ termos com o formato de $\Delta(\Delta x_i \Delta x_j \Delta x_k, i \neq j \neq k) + \dots + \frac{n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1}{n!}$ termos com o formato de $\Delta(\Delta x_i \Delta x_j \Delta x_k \dots \Delta x_n)$.

Portanto, ao utilizarmos tal método de composição juntos à Identidade de Kaya Estendida (Equação 13), há o somatório de seis diferentes efeitos, que são apresentados na (Equação 14)

$$Emiss\tilde{a}o_{CO_2} = I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P$$

(Equação 13)

$$\Delta Emiss\tilde{a}o_{CO_2} = E(I_{CF}) + E(S_{CF}) + E(S_{CE}) + E(I_E) + E(E) + E(P)$$

(Equação 14)

Tendo cada efeito escrito pelos seguintes termos ((Equação 15)(Equação 16)(Equação 17) (Equação 18) (Equação 19) (Equação 20)):

$$\begin{aligned}
E(I_{CF}) = & \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P \\
& + \frac{1}{2} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + \Delta I_{CF} \\
& * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} \\
& * S_{CE} * I_E * E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{4} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (\Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 15)

$$\begin{aligned}
E(S_{CF}) = & I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P \\
& + \frac{1}{2} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + I_{CF} \\
& * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} \\
& * S_{CE} * I_E * E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} \\
& * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{4} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 16)

$$\begin{aligned}
E(S_{CE}) = & I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P \\
& + \frac{1}{2} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P) \\
& + \frac{1}{4} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (\Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 17)

$$\begin{aligned}
E(I_E) = & I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P \\
& + \frac{1}{2} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} \\
& * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{4} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (\Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 18)

$$\begin{aligned}
E(E) = & I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P \\
& + \frac{1}{2} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} \\
& * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{4} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P \\
& + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (\Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 19)

$$\begin{aligned}
E(P) = & I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * \Delta P \\
& + \frac{1}{2} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} \\
& * S_{CE} * I_E * E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{3} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} \\
& * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} \\
& * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} \\
& * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{4} (I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P \\
& + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P) \\
& + \frac{1}{5} (\Delta I_{CF} * S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E \\
& * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * I_E * \Delta E * \Delta P + \Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * E \\
& * \Delta P + I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E * \Delta E * \Delta P) + \frac{1}{6} (\Delta I_{CF} * \Delta S_{CF} * \Delta S_{CE} * \Delta I_E \\
& * \Delta E * \Delta P)
\end{aligned}$$

(Equação 20)

4.2.2 LMDI

Outro método para o cálculo desses efeitos e que também se apresenta como uma decomposição completa é o Método de Divisa de Índices com Peso Médio Logarítmico (LMDI). De acordo com o guia prático da utilização deste método realizado por Ang (2005) e com a Identidade de Kaya já explorada anteriormente, as expressões a seguir calculam matematicamente os efeitos no indicador de acordo com o tipo de agregação escolhido, sendo i cada fonte energética analisada.

- Agregação multiplicativa

$$Emissões = \frac{Emissões_t}{Emissões_0} = E(I_{CF}) \cdot E(S_{CF}) \cdot E(S_{CE}) \cdot E(I_E) \cdot E(E) \cdot E(P)$$

(Equação 21)

$$E(I_{CF}) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{I_{CFi}^t}{I_{CFi}^0}\right)$$

(Equação 22)

$$E(S_{CF}) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{S_{CFi}^t}{S_{CFi}^0}\right)$$

(Equação 23)

$$E(S_{CE}) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{S_{CEi}^t}{S_{CEi}^0}\right)$$

(Equação 24)

$$E(I_E) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{I_{Ei}^t}{I_{Ei}^0}\right)$$

(Equação 25)

$$E(E) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{E_i^t}{E_i^0}\right)$$

(Equação 26)

$$E(P) = \exp \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)/(lnS_i^0 - lnS_i^t)}{(S^0 - S^t)/(lnS^0 - lnS^t)} \ln\left(\frac{P_i^t}{P_i^0}\right)$$

(Equação 27)

- Agregação aditiva

$$\begin{aligned} Emissões &= Emissões_t - Emissões_0 \\ &= E(I_{CF}) + E(S_{CF}) + E(S_{CE}) + E(I_E) + E(E) + E(P) \end{aligned}$$

(Equação 28)

$$E(I_{CF}) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(lnS_i^0 - lnS_i^t)} \ln\left(\frac{I_{CFi}^t}{I_{CFi}^0}\right)$$

(Equação 29)

$$E(S_{CF}) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(lnS_i^0 - lnS_i^t)} \ln\left(\frac{S_{CFi}^t}{S_{CFi}^0}\right)$$

(Equação 30)

$$E(S_{CE}) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(\ln S_i^0 - \ln S_i^t)} \ln\left(\frac{S_{CE_i}^t}{S_{CE_i}^0}\right)$$

(Equação 31)

$$E(I_E) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(\ln S_i^0 - \ln S_i^t)} \ln\left(\frac{I_{E_i}^t}{I_{E_i}^0}\right)$$

(Equação 32)

$$E(E) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(\ln S_i^0 - \ln S_i^t)} \ln\left(\frac{E_i^t}{E_i^0}\right)$$

(Equação 33)

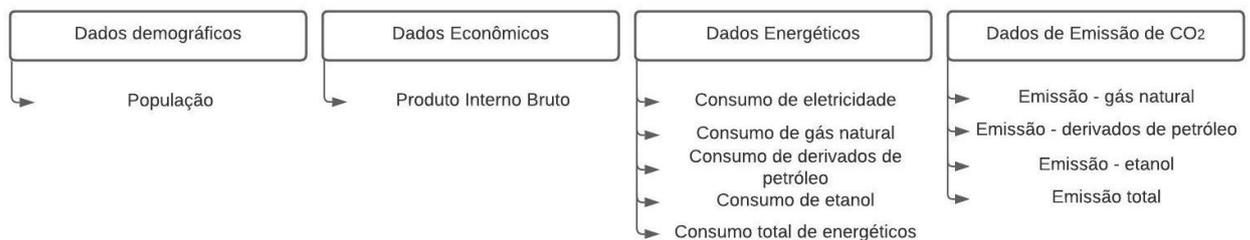
$$E(P) = \sum_i \frac{(S_i^0 - S_i^t)}{(\ln S_i^0 - \ln S_i^t)} \ln\left(\frac{P_i^t}{P_i^0}\right)$$

(Equação 34)

4.3 Obtenção de dados

Os dados coletados referentes ao período entre 2006 e 2018 foram divididos em quatro categorias: demográficos, econômicos, energéticos e ambientais (Ver Figura 35). A coleta desses dados foi feita por meio de informações municipais de cada uma das categorias supracitadas. No entanto, a investigação proposta nesse trabalho propõe a agregação dos dados, seja a nível estadual ou nas regiões administrativas (Registro, Santos, São José dos Campos, Sorocaba, Campinas, Ribeirão Preto, Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba, Presidente Prudente, Marília, Central, Barretos, Franca, Itapeva e Metropolitana de São Paulo).

Figura 35: Categorias de dados brutos coletados.



Fonte: Elaboração própria.

4.3.1 Dados demográficos

Os dados relacionados à população compõem dois dos efeitos de escala constituintes da avaliação a partir da Identidade de Kaya Estendida, sendo eles: afluência (relativo às mudanças do PIB *per capita*) e de população (relativo às alterações no número total da população).

As informações sobre as populações de cada município entre 2006 e 2018 foram coletadas a partir do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2020a). Essas informações são referentes à estimativa da população de cada ano. Ressalta-se que os dados do ano de 2007 são provenientes de uma contagem da população propriamente dita e, de 2010, da realização do Censo Demográfico. Ambos possuem informações coletadas por meio de contagens reais, não de estimativas populacionais, as quais são realizadas para os anos entre os censos demográficos.

Segundo as notas metodológicas publicadas pelo próprio IBGE (2020c), as estimativas são calculadas a partir da tendência de crescimento populacional observada na cidade entre os últimos dois censos demográficos realizados e da tendência de crescimento da unidade federativa (isto é, a área geográfica hierarquicamente superior) (MADEIRA; SIMÕES, 1972).

A seguir apresenta-se um compilado das informações sobre a população (em milhões de habitantes) do estado de São Paulo e dentre as respectivas divisões administrativas (Tabela 3), bem como uma análise da flutuação do número absoluto durante o período estudado (Figura 36).

Tabela 3: Número de habitantes (em milhões) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo.

As divisões existentes também agrupam os números conforme as regiões administrativas.

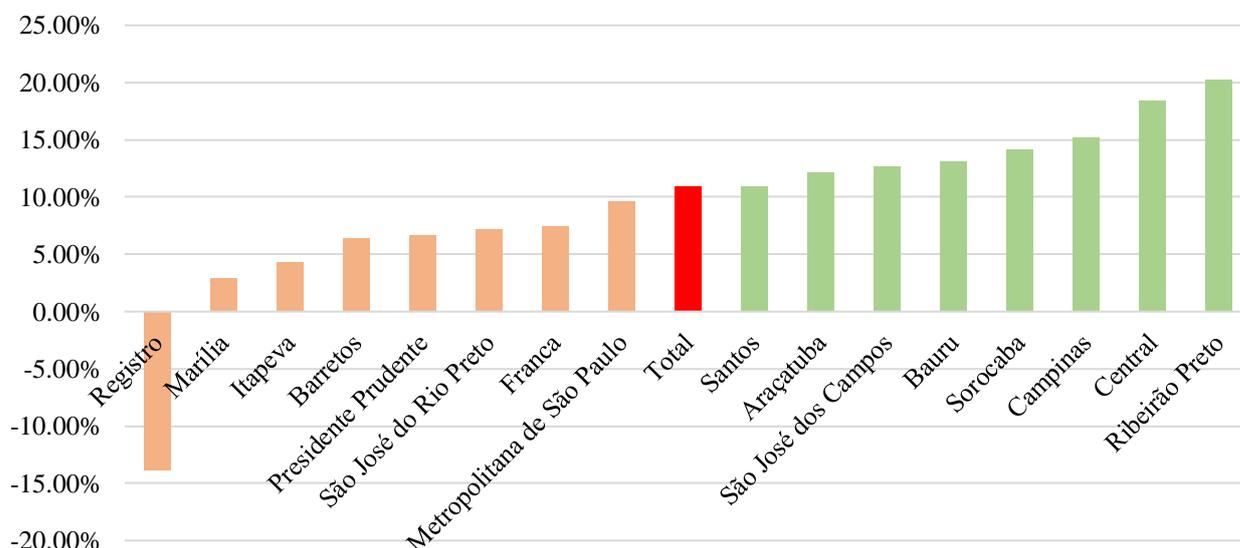
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Bauru	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
Barretos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Campinas	6,1	5,9	6,1	6,2	6,2	6,3	6,4	6,7	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1
Central	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Franca	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Itapeva	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Marília	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Presidente Prudente	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Registro	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Metropolitana de São Paulo	19,7	19,2	19,6	19,8	19,7	19,8	20,0	20,8	20,9	21,1	21,2	21,4	21,6
Ribeirão Preto	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Santos	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
São José dos Campos	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5
São José do Rio Preto	1,5	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
Sorocaba	2,3	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6
Estado de São Paulo													
Total	41,1	39,8	41,0	41,4	41,3	41,6	41,9	43,7	44,0	44,4	44,7	45,1	45,5

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2020a).

Pela Figura 36, verifica-se que a taxa de crescimento geral no estado de São Paulo durante o período estudado foi de aproximadamente 10,9%. Já os dados subdivididos nas regiões administrativas apresentam uma diversidade nos resultados, incluindo resultado negativo, como em Registro (-13,9%), e a maior variação, em Ribeirão Preto (20,3%).

Figura 36: Variação da população entre os anos de 2006 e 2018. A coluna em vermelho representa a variação na população total do Estado de São Paulo. As colunas em laranja representam as variações menores em relação ao estado. As colunas em verde representam as variações acima do valor total do estado.



Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Dados econômicos

O dado econômico bruto utilizado para a análise envolvendo a Identidade de Kaya é o PIB. Este compõe dois dos efeitos analisados: o primeiro, já mencionado anteriormente, de escala, que verifica a evolução do PIB *per capita*, e o segundo, o efeito de intensidade, que permite examinar a transformação durante o período estudado da intensidade energética, ou seja, a quantidade de energia necessária para gerar uma unidade do PIB.

As informações foram coletadas do IBGE (2020b) e são referentes ao PIB a preços correntes, eliminando o efeito da inflação. O PIB representa a quantidade de fluxo de produtos finais e bens de serviço durante um período, não a riqueza total existente em um país. Esse indicador é fundamental para a função de comparação do uso de energia em diferentes contextos econômicos, seja na linha de tempo ou geográfica.

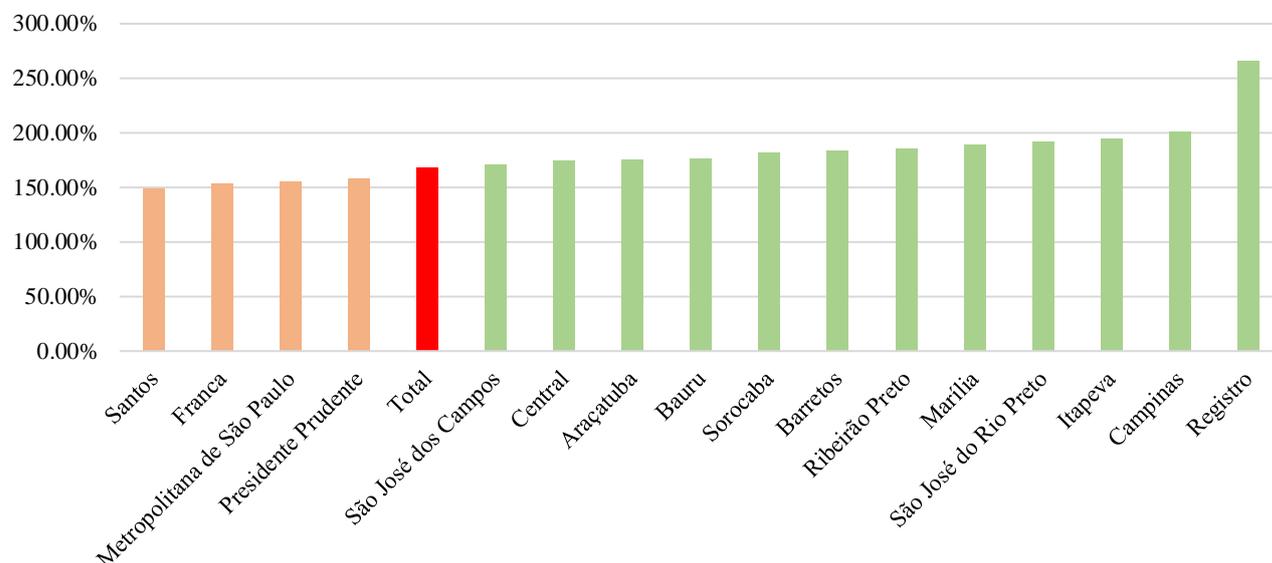
A Tabela 4 apresenta os dados de PIB anual por regiões administrativas, áreas concessionadas e o total do estado de São Paulo, em bilhões de reais a preços correntes, assim como uma breve avaliação da variação dessas subdivisões durante o período de 2006 a 2018 (Figura 37).

Tabela 4: Valores do Produto Interno Bruto à preços correntes (em bilhões de reais) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo. As divisões existentes também agrupam os números conforme as regiões.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	8,6	9,7	10,4	12,1	13,6	15,5	17,2	18,9	19,8	23,2	22,6	23,9	23,8
Bauru	14,9	16,5	18,4	21,0	24,4	27,3	29,0	31,9	34,1	38,7	38,0	39,6	41,2
Barretos	6,3	6,4	6,9	7,7	8,6	9,5	10,5	11,6	13,2	15,6	16,8	17,7	17,8
Campinas	134,2	155,3	174,1	185,3	216,5	239,1	267,2	293,6	325,5	338,3	367,9	386,8	404,1
Central	14,3	15,7	16,9	18,8	21,7	24,4	27,2	29,9	31,7	33,5	36,3	38,3	39,2
Franca	9,7	9,9	10,2	11,6	13,3	15,2	17,1	18,3	19,9	21,5	23,1	24,5	24,7
Itapeva	4,3	5,0	5,3	6,2	6,4	7,2	7,8	9,2	11,0	11,6	12,8	12,4	12,6
Marília	11,2	12,3	13,8	15,4	17,4	19,5	22,0	24,6	26,3	27,6	29,4	31,7	32,3
Presidente Prudente	9,4	10,2	11,2	12,9	14,2	15,6	17,5	19,6	20,6	24,0	24,1	24,1	24,3
Registro	2,5	2,6	3,0	3,2	4,3	5,4	7,1	8,4	11,1	8,2	7,4	8,4	9,2
Metropolitana de São Paulo	463,3	526,5	586,4	634,6	732,9	815,3	873,7	953,6	1022,9	1057,9	1106,5	1141,2	1181,5
Ribeirão Preto	20,2	22,8	25,1	27,3	31,7	34,9	38,0	42,3	46,1	47,2	52,3	55,7	57,6
Santos	25,3	28,4	31,9	33,6	37,1	39,1	40,9	46,3	52,5	59,3	59,5	60,2	62,9
São José dos Campos	46,0	52,5	59,8	62,2	68,0	72,2	77,0	86,6	95,8	97,9	104,2	109,3	124,4
São José do Rio Preto	17,9	19,8	22,0	24,9	28,2	31,6	35,3	39,8	42,0	45,8	47,0	51,4	52,2
Sorocaba	36,4	42,2	47,0	50,3	56,3	64,8	71,6	80,6	85,7	89,6	90,8	95,7	102,9
Estado de São Paulo													
Total	824,5	935,7	1042,5	1127,1	1294,7	1436,7	1559,0	1715,2	1858,2	1939,9	2038,8	2120,8	2210,6

Fonte: Elaboração própria com base em (IBGE, 2020b).

Figura 37: Variação do PIB a preços correntes entre os anos de 2006 e 2018. A coluna em vermelho representa a variação total do estado de São Paulo. As colunas em laranja representam as variações menores em relação ao estado. As colunas em verde claro representam as variações acima do valor total do estado.



Fonte: Elaboração própria.

Sendo assim, a variação total no estado de São Paulo foi de aproximadamente 168% durante o período estudado. Em relação às regiões administrativas, Santos apresentou o menor crescimento do PIB (149%), enquanto Registro apresentou o maior aumento durante o período estudado (266%). Ambos os resultados se espelham no PIB associado ao setor secundário e terciário. Santos apresentou o menor índice de crescimento entre as regiões administrativas no setor terciário (184%) e a segunda menor taxa no setor secundário (80%). Já Registro apresentou as maiores taxas em ambos os setores, 438% no setor secundário e 315% no setor terciário.

4.3.3 Dados energéticos

Os dados energéticos compõem parte dos efeitos definidos na Identidade de Kaya Estendida. Esses efeitos podem ser observados entre as categorias estrutural e intensidade. Em relação ao indicador de intensidade, há a intensidade energética que utiliza as informações de energia consumida para gerar uma unidade de PIB por meio de mudanças na eficiência econômica ou avanços tecnológicos. O outro efeito de intensidade é relativo à intensidade de

emissões de CO₂, o qual utiliza os dados energéticos para revelar as mudanças nas emissões de CO₂ por unidade de consumo de combustível fóssil. Em relação ao tipo estrutural, os efeitos que são construídos por dados energéticos são a substituição dos combustíveis fósseis por etanol e a participação de combustíveis constituídos a base de carbono (combustíveis fósseis + etanol) na matriz energética.

As informações de consumo de energia foram retiradas dos Relatórios de Anuários Municipais produzidos entre 2006 e 2018 (SECRETARIA DE ENERGIA, 2010; 2011; 2012a; 2013; 2014; 2015; SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO, 2016; 2017; 2018; SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2019; SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA, 2007; 2008; 2009), os quais consideram os dados obtidos por meio das Concessionárias e Agências Reguladoras (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)). Os dados coletados são provenientes da CETESB e da SIMA-SP. Os dados municipais mostram o consumo dos principais energéticos de cada um dos 645 municípios do estado de São Paulo em toneladas de óleo equivalente (toe)¹². As fontes de energia são eletricidade, derivados de petróleo, gás natural (e gás natural comprimido) e etanol hidratado.

Vale ressaltar que os derivados de petróleo consideram os seguintes insumos energéticos: gasolina automotiva, gasolina de aviação, óleo diesel, óleo combustível, querosene de aviação, querosene iluminante, GLP (gás liquefeito de petróleo), coque de petróleo e asfalto. Insumos como graxa, óleo lubrificante, solvente e parafina foram excluídos desse conjunto por serem caracterizados como não energéticos. Ademais, a contabilização do etanol anidro não conta com a porção adicionada na gasolina automotiva, segundo as indicações destes relatórios.

A Tabela 5 apresenta dados de consumo total de energéticos em 10⁶ toe no estado e nas subdivisões referentes às regiões administrativas. Em seguida, também se apresenta um gráfico que demonstra a variação do consumo total (Ver Figura 38). Para mais detalhes, os dados específicos de cada insumo energético encontram-se nos Apêndices A, B, C e D.

¹² Até o ano de 2009, os dados foram disponibilizados em kcal. Para tanto, a conversão para toe foi necessária, segundo informações disponíveis em SIMA (2019). Posteriormente, houve a padronização do fornecimento dos dados em toe.

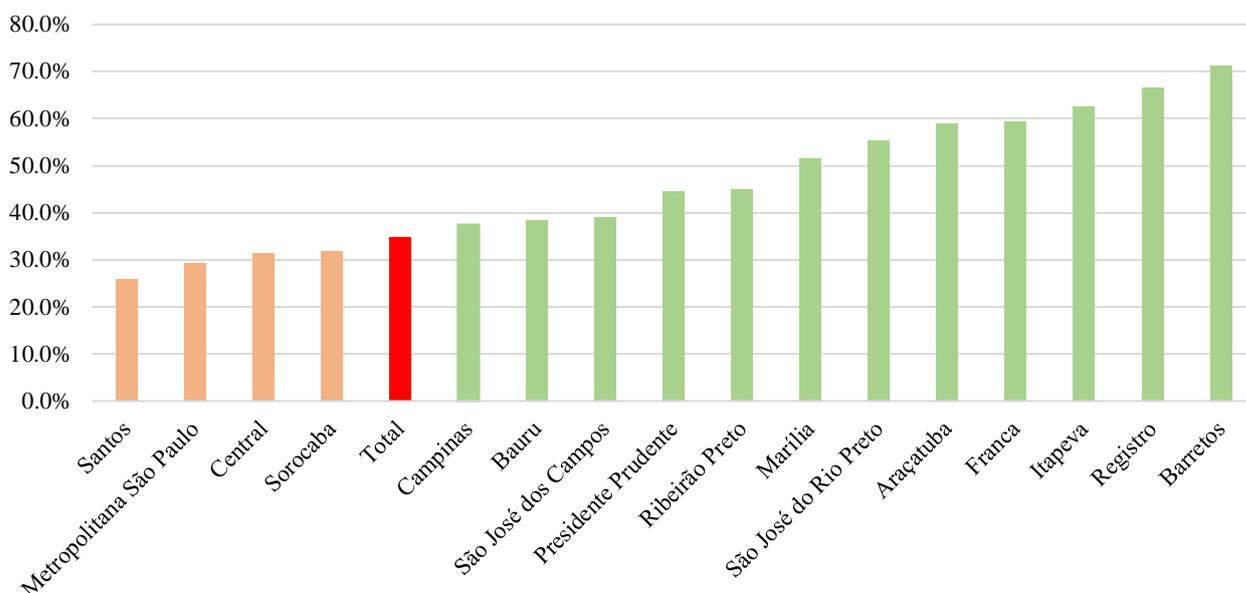
Tabela 5: Valores do consumo total de insumos energéticos (em 10⁶ toe) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo. As divisões existentes também agrupam os números conforme as regiões administrativas.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Barretos	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Bauru	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Campinas	6,6	7,1	7,4	7,3	8,0	8,5	8,7	8,7	8,7	8,9	8,5	8,9	9,0
Central	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1
Franca	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Itapeva	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Marília	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Metropolitan a de São Paulo	13,1	14,2	15,0	14,7	16,1	16,5	17,0	17,5	17,8	17,5	16,5	17,0	17,0
Presidente Prudente	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Registo	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ribeirão Preto	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
Santos	1,4	2,2	2,2	2,2	2,8	2,7	2,9	2,2	2,1	1,9	1,5	1,6	1,7
São José do Rio Preto	1,1	1,3	1,3	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
São José dos Campos	2,0	2,2	2,2	2,2	2,3	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,8	2,8
Sorocaba	2,4	2,7	2,9	2,8	3,0	3,3	3,6	3,6	3,3	3,2	3,1	3,1	3,2
Estado de São Paulo													
Total	31,9	35,5	37,3	36,9	40,8	42,5	44,1	44,5	44,5	44,0	41,9	43,1	43,4

Fonte: Elaboração própria com base em (SECRETARIA DE ENERGIA, 2010; 2011; 2012a; 2013; 2014; 2015; SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO, 2016; 2017; 2018; SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2019; SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA, 2007; 2008; 2009).

Como é observado na Tabela 5, a variação do consumo no estado de São Paulo no período estudado ficou em 35%. Destaca-se também o menor avanço no consumo energético da região administrativa de Santos e o maior aumento da região de Barretos.

Figura 38: Variação do consumo total de insumos energéticos entre os anos de 2006 e 2018. A coluna em vermelho representa a variação total do Estado de São Paulo. As colunas em laranja representam as variações menores em relação ao estado. As colunas em verde representam as variações acima do valor total do estado.



Fonte: Elaboração própria.

4.3.4 Dados de emissões de CO₂

Por fim, os dados de emissão de CO₂ constituem o indicador de intensidade de emissões por cada unidade de energia de combustível utilizado, conhecido como fator de emissão. Os dados de emissão auxiliam no cálculo dos pesos de cada fator na análise de decomposição de índices quando o método utilizado é o LMDI.

Os dados que utilizados nesse estudo foram calculados a partir dos fatores de emissão disponíveis no Relatório do Balanço Energético do estado de São Paulo de 2019. Esses fatores de emissão foram retirados de publicações da CETESB, os quais foram calculados a partir da revisão dos relatórios do IPCC/OCDE de 1993 que continham as diretrizes para o cálculo.

O coeficiente referente ao gás natural foi utilizado a partir de seu valor absoluto. No entanto, um coeficiente artificial foi calculado para os derivados de petróleo, uma vez que estas informações tratam do consumo de um agrupamento de combustíveis. Assim, por meio dos dados de consumo energético que compõem a categoria “derivados de petróleo” (gasolina, óleo diesel, óleo combustível, querosene, GLP e coque de petróleo) e as emissões de CO₂ por eles

emitidas, o fator de emissão de derivados de petróleo (tonelada de CO₂ por 10³ toe) anual foi calculado a partir da média, segundo a fórmula abaixo (Equação 35).

$$Fator\ de\ emiss\tilde{a}o_t = \frac{\sum_t emiss\tilde{o}es_{derivados\ de\ petr\tilde{o}leo,t}}{\sum_t consumo_{derivados\ de\ petr\tilde{o}leo,t}} \quad (Equa\tilde{c}\tilde{a}o\ 35)$$

Nota-se que não é atribuído nenhum fator de emissão para as fontes etanol e eletricidade. Apesar de o Sistema Interligado Nacional apresentar um fator de emissão diferente de nulo – uma vez que o parque gerador também conta com a geração térmica e a geração hidrelétrica não é isenta de emissões (BERTASSOLI JR *et al.*, 2021) –, não se considera tais emissões, pois não são efetuadas junto ao consumidor final, e sim nas centrais geradoras que são dissipadas pelo país. Já o etanol, apesar de sua combustão também liberar gases de efeito estufa, as suas emissões são desconsideradas, pois a plantação é reconhecida como um reservatório de carbono e, portanto, zera-se as emissões (HENRIQUES *et al.*, 2014).

Na Tabela 6 são demonstrados os valores dos coeficientes utilizados para cálculo das emissões totais e por combustível em cada município. Por falta de disponibilidade de dados, em 2006 e 2007 utilizou-se os coeficientes de derivados de petróleo obtidos em 2008.

Tabela 6: Fatores de emissão utilizados para os cálculos de emissão total e por cada categoria de insumo energético.

Fator de emissão (toneladas de CO ₂ /10 ³ toe)	20 06	20 07	20 08	20 09	20 10	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18
Derivados de petróleo	2,8 36	2,8 36	2,8 36	2,8 37	2,8 38	2,8 36	2,8 33	2,8 34	2,8 34	2,8 36	2,8 35	2,8 35	2,8 41
Gás Natural	2,23												

Fonte: Dados retirados de (SIMA, 2019) .

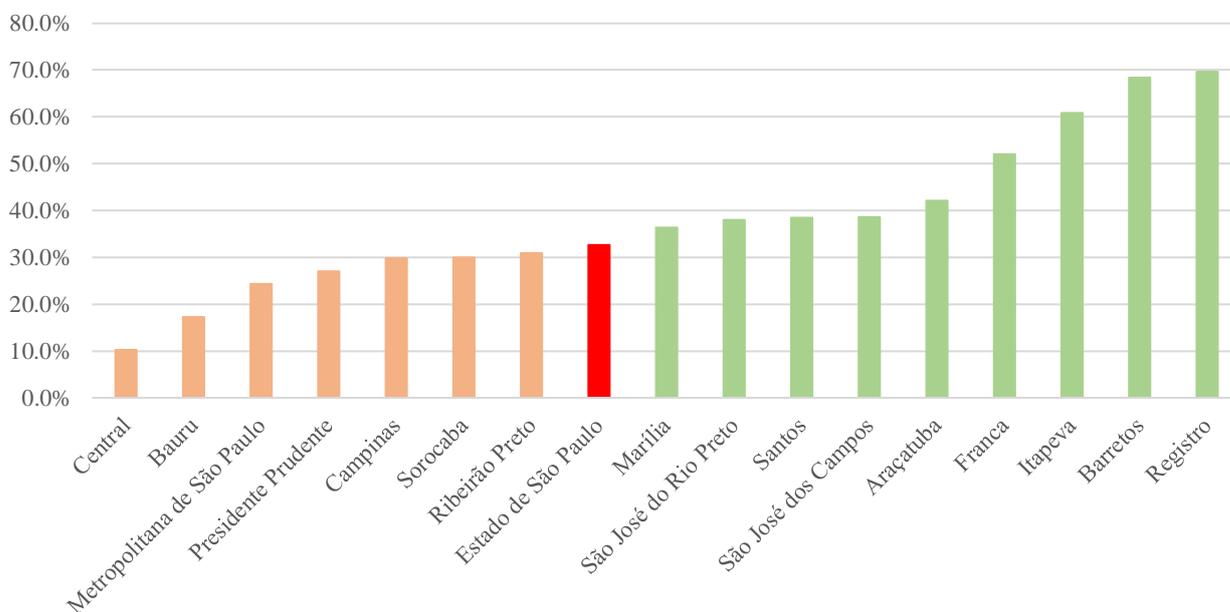
Os dados das emissões totais anuais, calculados a partir do uso de cada insumo multiplicado pelo seu coeficiente de emissão, encontram-se na Tabela 7 e Apêndices E e F, bem como a variação de cada região administrativa e área da concessionária durante o período estudado (Ver Figura 39). Em relação às regiões administrativas, a região central apresentou a menor variação (aproximadamente 15%), e Barretos, a maior variação (71,5%).

Tabela 7: Valores das emissões totais (em 10³ toneladas de CO₂) entre o período de 2006 e 2018 no estado de São Paulo. As divisões existentes também agrupam os números conforme as regiões administrativas

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	1,00	1,03	1,20	1,21	1,45	1,48	1,60	1,66	1,60	1,46	1,51	1,56	1,46
Barretos	0,62	0,67	0,66	0,67	0,91	1,01	1,06	0,98	1,00	0,97	1,02	1,08	1,07
Bauru	1,36	1,39	1,50	1,47	1,67	1,76	1,84	1,92	1,89	1,73	1,78	1,75	1,67
Campinas	11,91	12,77	12,94	12,61	14,09	15,56	16,14	16,09	15,68	15,88	15,17	16,12	15,78
Central	1,59	1,77	1,75	1,81	2,05	2,14	2,21	2,17	2,02	1,88	1,76	1,80	1,82
Franca	0,76	0,77	0,82	0,78	0,91	0,94	1,02	1,12	1,15	1,16	1,16	1,16	1,19
Itapeva	0,57	0,60	0,61	0,57	0,65	0,82	0,89	1,16	1,15	1,16	1,10	1,00	0,93
Marília	1,31	1,40	1,46	1,48	1,74	1,91	2,10	2,17	2,19	2,05	2,03	1,92	1,83
Metropolitana de São Paulo	23,52	25,27	26,38	25,47	28,60	30,08	31,36	32,33	32,14	31,34	29,82	31,15	29,87
Presidente Prudente	0,96	1,00	1,09	1,07	1,26	1,36	1,43	1,51	1,46	1,39	1,42	1,34	1,27
Registro	0,50	0,57	0,61	0,62	0,76	0,83	0,95	1,04	0,98	0,93	0,89	0,92	0,86
Ribeirão Preto	1,81	1,79	1,89	1,84	2,09	2,18	2,25	2,39	2,42	2,39	2,42	2,45	2,44
Santos	2,03	4,35	4,15	4,22	5,88	5,76	6,09	4,20	3,86	3,34	2,42	2,63	2,85
São José do Rio Preto	2,42	2,77	2,69	2,60	3,03	3,33	3,77	3,86	3,73	3,67	3,61	3,67	3,44
São José dos Campos	3,50	3,89	3,75	3,63	3,98	4,50	4,71	4,90	4,73	4,73	4,80	5,10	4,93
Sorocaba	3,63	3,99	4,19	4,14	4,38	5,37	5,92	6,08	5,50	5,25	4,99	4,91	4,84
Estado de São Paulo													
Total	57,50	64,03	65,70	64,19	73,42	79,04	83,36	83,59	81,50	79,33	75,90	78,57	76,27

Fonte: Elaboração própria com dados calculados pela autora com base nos Anuários Municipais e SIMA (2019a).

Figura 39: Variação das emissões totais (em 10^3 toneladas de CO_2) entre os anos de 2006 e 2018. A coluna em vermelho representa a variação total do estado de São Paulo. As colunas em laranja representam as variações menores em relação ao estado. As colunas em verde representam as variações acima do valor total do estado.



Fonte: Elaboração própria.

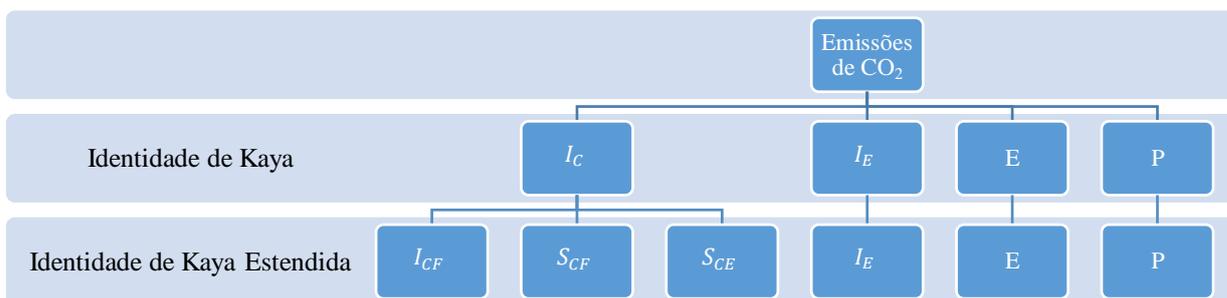
Dessa forma, demonstrou: a) a importância e um breve histórico sobre a utilização de indicadores para o acompanhamento dos impactos ambientais gerados pela humanidade e os seus motores; b) a metodologia utilizada tanto em relação às abordagens sobre os efeitos, como para a realização dos cálculos; c) todos os dados necessários para tais cálculos e o entendimento de como os efeitos na ADI se manifestaram nos últimos anos tanto no estado de São Paulo como na sua divisão entre regiões administrativas. No capítulo a seguir, são apresentados os resultados a partir da utilização dos dados coletados nas metodologias definidas.

5 EFEITOS DA IDENTIDADE DE KAYA ESTENDIDA NO ESTADO DE SÃO PAULO E NAS DIVISÕES REGIONAIS

5.1 Aplicação das metodologias para cálculo dos efeitos no estado de São Paulo

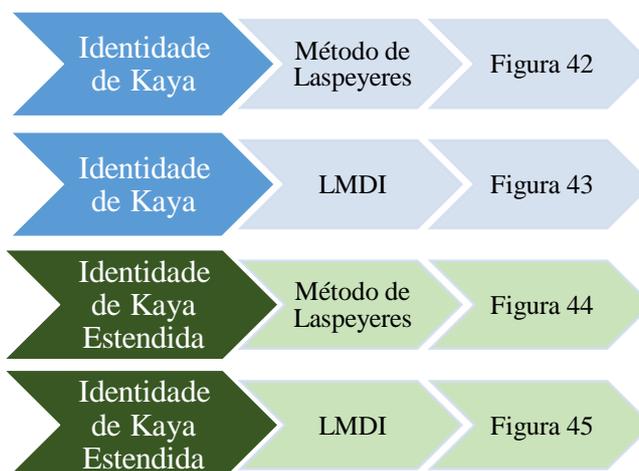
Este tópico aborda os resultados obtidos a partir dos dados do estado de São Paulo em conjunto com a aplicação dos diferentes métodos descritos: Laspeyeres e LMDI. Os resultados mostram os efeitos de escala, intensidade e estrutural por meio da demonstração da agregação aditiva. Esses efeitos são agregados conforme o que é definido na Identidade de Kaya ou a Identidade de Kaya Estendida (ver Figura 40 e Figura 41). Assim, os resultados podem sugerir a facilidade, eficiência e funcionalidade em aplicar e avaliar os efeitos de decomposição mais específica, como é o caso da Identidade de Kaya Estendida. Todos os resultados foram gerados (da atual seção e da 5.2) a partir do Excel e do programa QGIS para produção dos mapas.

Figura 40: Compilado dos efeitos verificados na Identidade de Kaya e Identidade de Kaya Estendida.



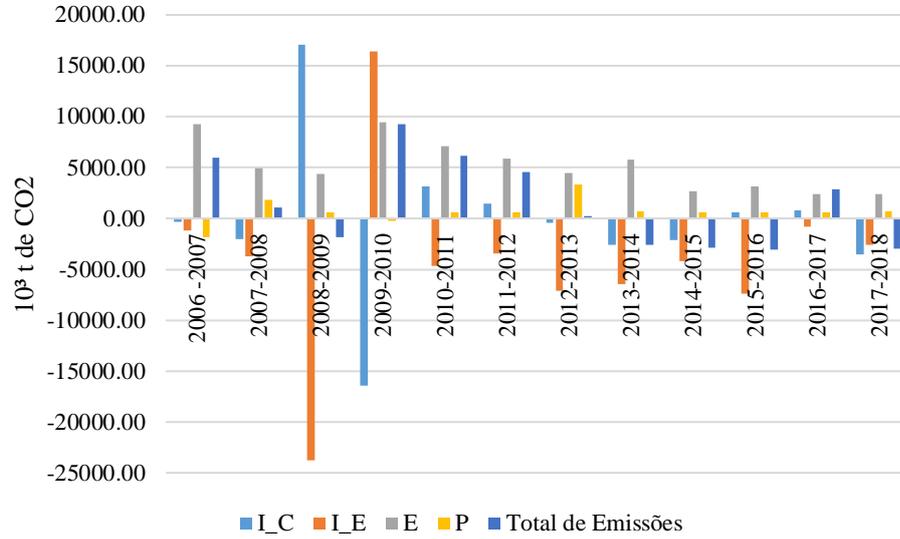
Fonte: Elaboração própria

Figura 41: Definição da ordem das figuras a serem apresentadas conforme a abordagem e métodos aplicados.



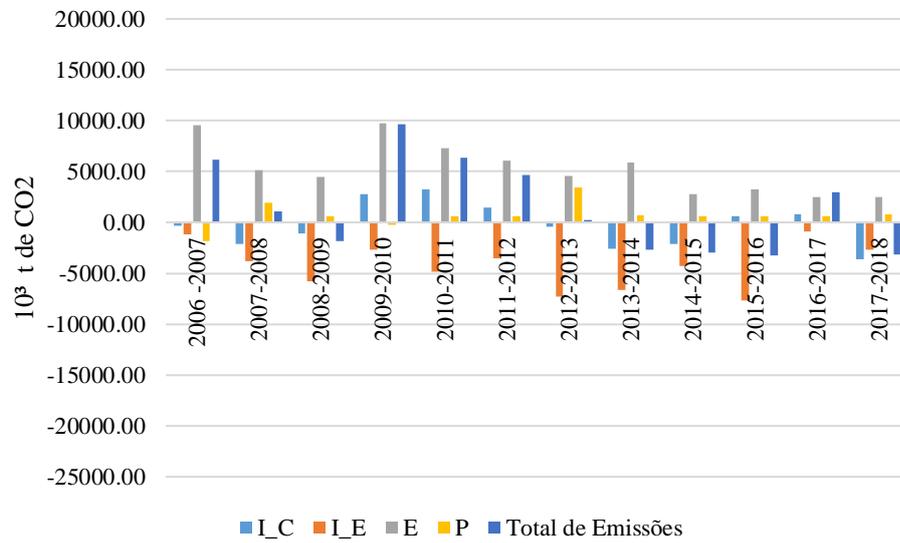
Fonte: Elaboração própria.

Figura 42: Identidade de Kaya + MLR



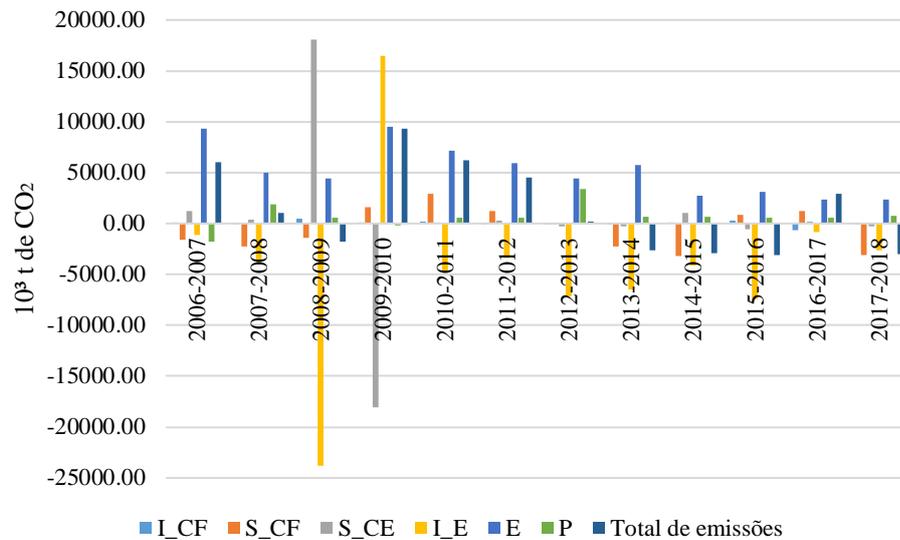
Fonte: Elaboração própria.

Figura 43: Identidade de Kaya + LMDI



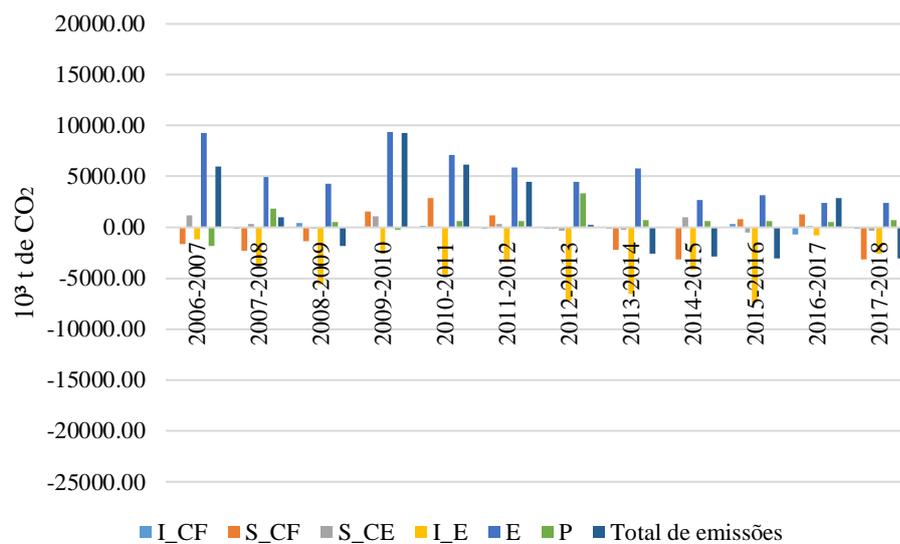
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44: Identidade de Kaya Estendida + MLR.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 45: Identidade de Kaya Estendida e LMDI.



Fonte: Elaboração própria.

Em relação à comparação entre a utilização da Identidade de Kaya simples e Estendida, infere-se que há a necessidade de um acompanhamento mais detalhado a fim de cumprir o objetivo desta dissertação. As modificações geradas por meio da substituição de combustíveis fósseis mais poluidores pelo gás natural (resultando em uma diminuição do fator de emissão), ou substituição de combustíveis fósseis por etanol, são fundamentais para um melhor entendimento da influência desses efeitos para as emissões de CO₂. Assim, essa abordagem auxilia na análise de um dos principais objetivos dessa dissertação, isto é, compreender o papel

do gás natural ao incorporar-se no mix de combustíveis utilizados frente às alterações das emissões de CO₂ no estado. Dessa forma, sugere-se a utilização da Identidade de Kaya Estendida neste processo para que os fatores estruturais sejam avaliados de forma mais detalhada, isto é, diferenciando a substituição de combustíveis fósseis por etanol – um energético de alta importância para o estado, devido a sua alta produção, investimentos e penetração nos setores econômicos – e de derivados de petróleo por gás natural.

Referente ao método de decomposição, considerou-se o LMDI como um método adequado para o uso e aplicação de uma extensa base de dados para gerar os resultados. Isso ocorre porque cada efeito no MLR é constituído por termos extensos, enquanto os efeitos do LMDI são formados por apenas uma função. Além disso, outras vantagens comparativas são vastamente encontradas na literatura e conferidas nos resultados apresentados acima, tais como: os resultados apresentam-se mais estáveis (e, conseqüentemente, as sobreposições geradas no MRL e as superestimções são evitadas) e robustos, além de o método exibir uma facilidade maior em lidar com valores nulos, isto é, substituir o zero por uma constante positiva bem baixa, como 10^{-10} . No entanto, a limitação do método LMDI é não abranger dados com valores negativos (ANG, 2005; SUN, 1998; ZHANG; ANG, 2001). Mas, como não é o caso deste estudo, isso não fora um impedimento para sua utilização.

Portanto, a partir dos dados calculados para o estado de São Paulo, ressalta-se a definição da metodologia utilizada a partir do embasamento teórico e a visualização na prática das abordagens e métodos citados ao longo da revisão bibliográfica. Assim, para o prosseguimento da caracterização e investigação da relação entre a entrada do gás natural junto às emissões de CO₂ e à transição energética no estado, a Identidade de Kaya Espandida com o método de decomposição LMDI foram utilizados para detectar os efeitos, analisados nos próximos tópicos.

5.2 Os efeitos da Identidade de Kaya Estendida no estado de São Paulo

A demonstração dos resultados e sua avaliação são realizadas para cada um dos fatores que compõem as emissões de CO₂, de acordo com a Identidade de Kaya Estendida, em duas etapas. Em uma das abordagens, a ênfase é dada em cada um dos termos a nível estadual e o seu histórico no período analisado, entre 2006 e 2018. Mas, além disso, essas análises são compostas pela comparação dessa trajetória no tempo entre as diversas regiões administrativas que estão presentes no estado e a correlação com o que se vê a nível estadual. Essa é estabelecida a partir do Coeficiente de correlação de Pearson, o qual demonstra o nível de correlação (e não

causalidade) entre a trajetória estadual e de cada região administrativa, para que então sejam avaliadas as especificidades regionais e geográficas do estado.

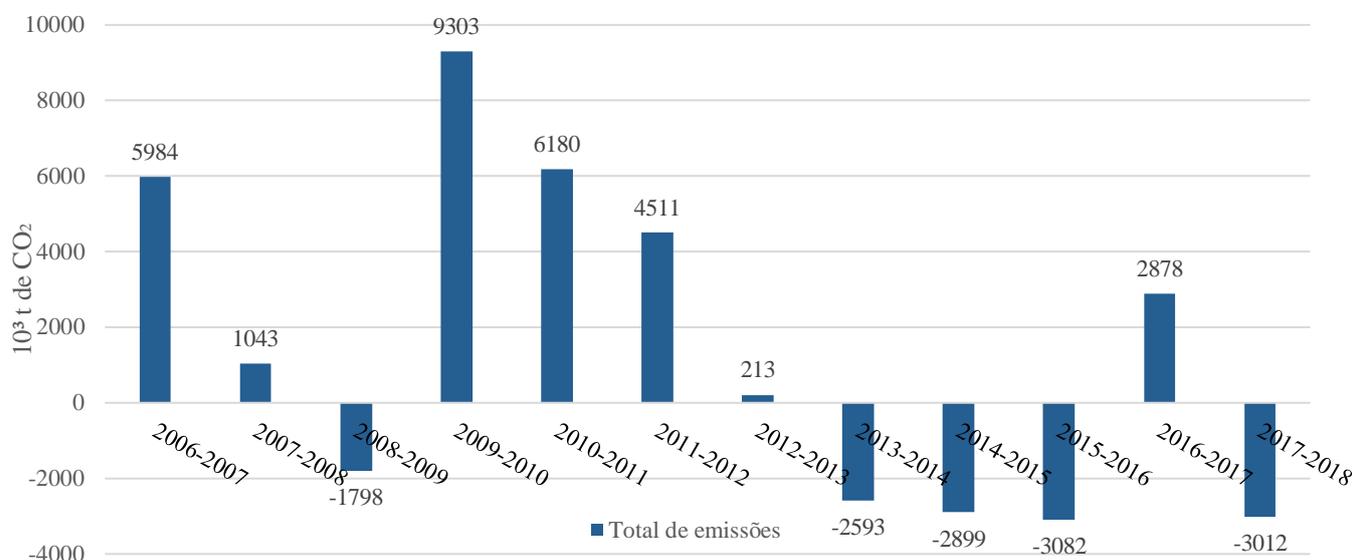
A outra perspectiva discutida nos próximos tópicos se dá a partir dos efeitos analisados em nível estadual, de acordo com os setores econômicos que consomem gás natural (geração elétrica, industrial, transporte, residencial e comercial) e compõem quase a totalidade de consumo energético do estado de São Paulo. Vale salientar que a disponibilidade de dados por setor encontra-se limitada aos anos entre 2009 e 2018, a nível estadual. Diante disso, a análise se concentra neste intervalo de tempo (ver Apêndice G).

A apresentação dos resultados e discussões nesta segunda etapa é dividida em dois períodos: o primeiro período consta entre os anos de 2009 e 2013 e o segundo período entre 2013 e 2018. Como descrito anteriormente, a relação entre o consumo energético e os níveis dos indicadores econômicos (como é o caso do PIB) apresenta uma alta proporcionalidade, sobretudo no estado de São Paulo (SECRETARIA DE ENERGIA, 2012b). Assim, na primeira fase identifica-se um crescimento da economia paulista e do consumo energético como um todo. Esse primeiro período também envolve a entrada da oferta de gás natural do Pré-Sal e a introdução de algumas das ações de planejamento estadual voltadas às mudanças climáticas. Já o segundo período de análise demonstra uma estagnação econômica, na qual não há o crescimento relevante do consumo energético no estado. Nesse momento, apesar de ocorrer uma breve recuperação do setor terciário, há uma estagnação contínua do setor secundária. Porém, há uma crise hídrica nos reservatórios de água de São Paulo e do Brasil que geram distúrbios na geração elétrica do país e, conseqüentemente, no consumo do estado. Nesse momento, também há um forte comprometimento do país (e dos estados) perante a comunidade internacional sobre as emissões de gases de efeito estufa.

Com base nos dados de uso de combustíveis fósseis, pode-se observar a variação na emissão total advindas do setor energético (ver Figura 46). Não é possível notar uma tendência clara que acompanhe o período entre 2006 e 2018. Mas, quando há a partição desse período, é evidente que, no primeiro intervalo (até a virada de ano entre 2012-2013), há um crescimento nas emissões, nos setores de transporte, industrial e geração elétrica. Já nos anos posteriores há uma predominância na diminuição de emissões de um ano para o outro. Essa redução foi majoritariamente embasada pelo setor industrial, seguido pela diminuição de emissões nos transportes¹³ (ver Figura 47).

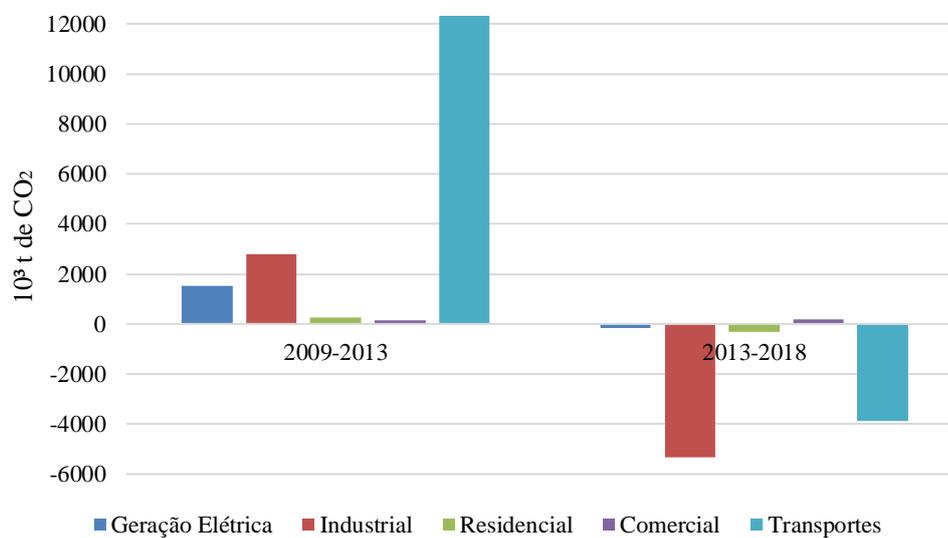
¹³ Há um pequeno desvio entre os números observados nos gráficos que representam os valores de emissões totais (2006-2018) e os valores de emissões categorizadas por setores da economia (2009-2018). Isso se deve ao fato de a base de dados utilizada para o primeiro gráfico ser baseada na utilização de combustíveis e a segunda base de

Figura 46: Variações ano a ano das emissões de CO₂ no estado de São Paulo (em 10³ t).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47: Alterações das emissões de CO₂ por setor entre os períodos analisados (2009-2013 e 2013-2018).

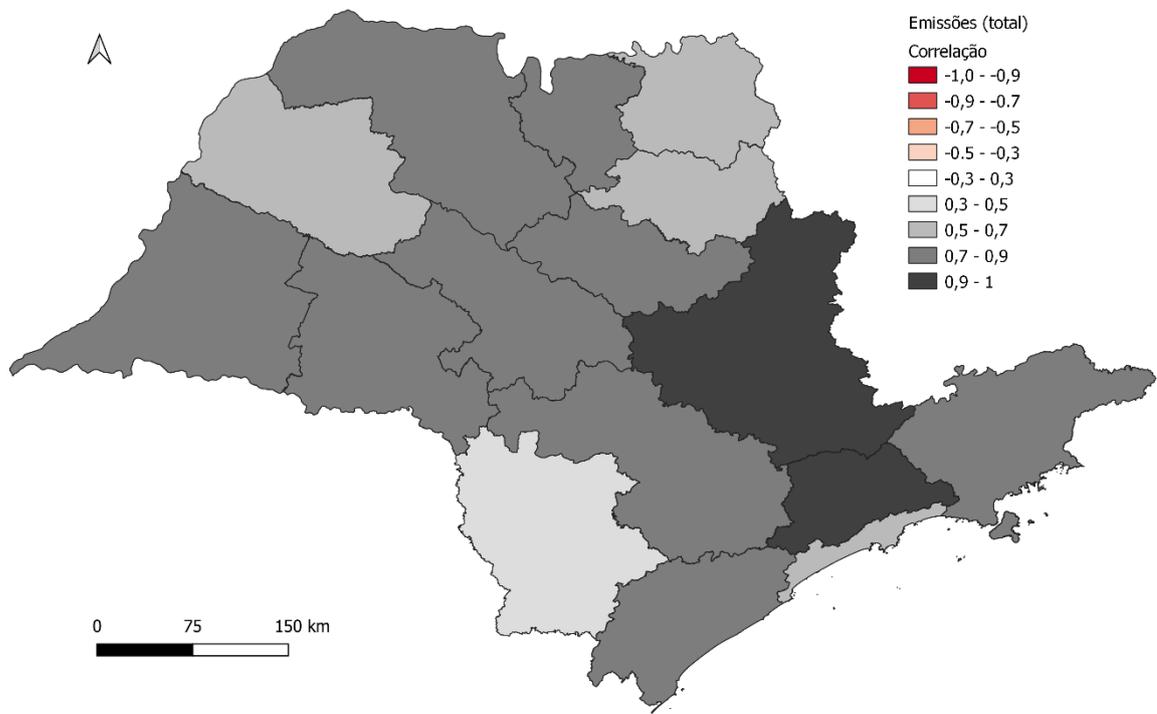


Fonte: Elaborado pela autora.

dados estar dividida de acordo com os setores. Dessa forma, os consumos de alguns setores não são contabilizados, como é o exemplo de agropecuária, público e outros. Essa característica é observada nos resultados apresentados a seguir, mas não impedem as análises propostas nessa dissertação, uma vez que representam uma pequena diferença.

A Figura 48 demonstra que as regiões administrativas paulistas apresentaram uma correlação positiva com a tendências observadas no estado de São Paulo durante o período analisado, de 2006 a 2018. No entanto, a correlação mostrou-se muito forte ($\rho = 0,9 - 1,0$) apenas nas regiões de Campinas e São Paulo, que estão entre as regiões mais emissoras de CO₂ no estado. A região de Itapeva é a única que apresentou uma correlação fraca ($\rho = 0,3 - 0,5$). As demais regiões apresentaram correlações fortes ($\rho = 0,7 - 0,9$) e moderadas ($\rho = 0,5 - 0,7$).

Figura 48: Mapa de correlação entre a série histórica de emissões totais de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



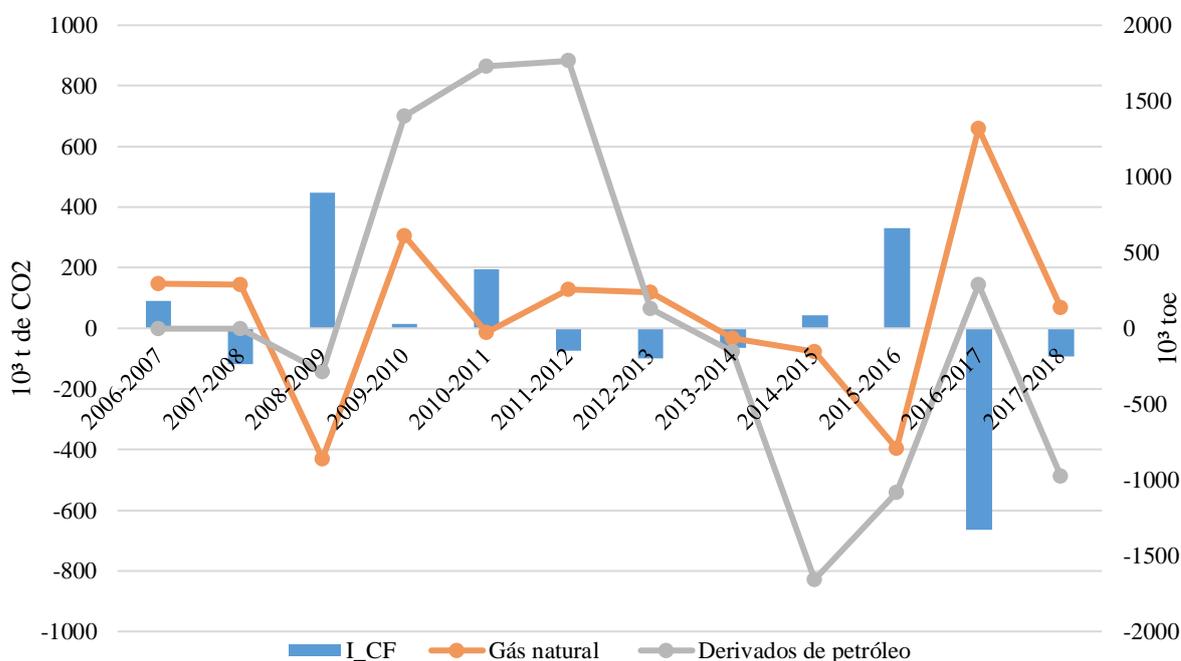
Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a partir desse panorama geral sobre as emissões no estado e suas séries históricas, os resultados sobre os efeitos da Identidade de Kaya Estendida e suas análises são apresentadas a seguir, assim como a relevância dos setores econômicos e os mapas de correlação para identificar as regionalizações existentes.

5.2.1 Substituição de derivados de petróleo por gás natural

Neste primeiro efeito analisado, identificou-se a relação entre as emissões obtidas por consumo de combustíveis fósseis, isto é, gás natural e derivados de petróleo. Com isso, algumas análises podem ser feitas, como a da qualidade e pureza dos combustíveis, da eficiência das tecnologias de combustão, entre outras categorias. No entanto, devido ao acesso às informações e aos métodos utilizados, o que se nota nesse parâmetro é a entrada do gás natural e sua substituição referente aos derivados de petróleo¹⁴. A Figura 49 expressa o comportamento do efeito em relação às emissões de CO₂ no período analisado, apresentando oscilações no caráter de fomentar o aumento das emissões ou atenuar esse processo. As colunas em azul ressaltam a variação do efeito de um ano para o outro. A fim de corroborar com as análises dessas oscilações, adicionou-se curvas da variação no consumo de gás natural e derivados de petróleo.

Figura 49: Valores do efeito de intensidade do fator de emissão durante os anos de 2006 e 2018 (colunas azuis) em 10³ t de CO₂. As linhas representam o consumo de gás natural (laranja) e derivados de petróleo (cinza) em 10³ toneladas de óleo equivalente.



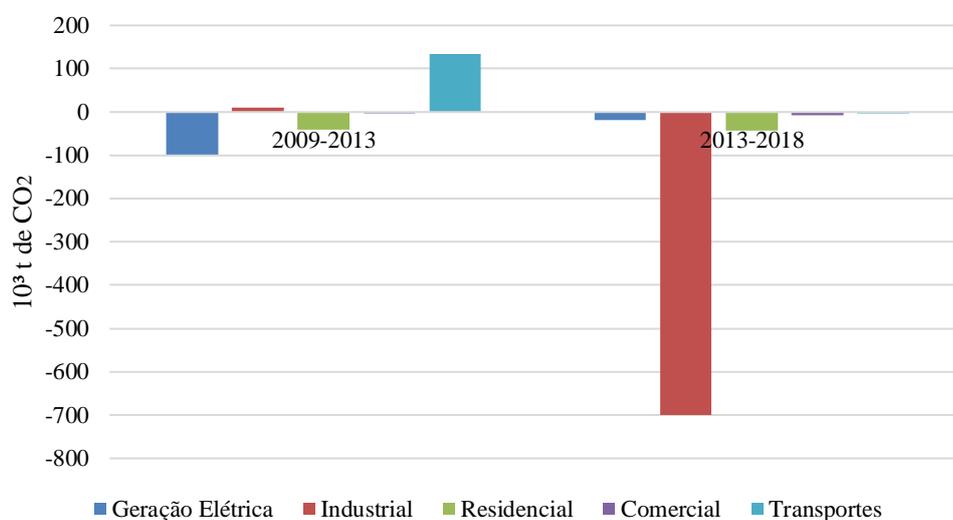
Fonte: Elaborado pela autora.

¹⁴ Salienta-se novamente que os derivados de petróleo considerados para esse trabalho são: gasolina, óleo diesel, óleo combustível, querosene, GLP, coque de petróleo e outras secundárias de petróleo.

Com esses dados foi possível encontrar uma correlação muito forte e negativa ($\rho = -0,89$) em relação ao uso do gás natural e às emissões advindas do efeito analisado. Em outras palavras, as variações positivas no uso de gás natural mostram, em geral, um caráter de diminuição das emissões de CO₂. No que se refere ao consumo de derivados de petróleo, não é possível mencionar qualquer correlação evidente ou que corrobore com as alterações nas emissões de CO₂. A partir disso, o consumo de gás natural é considerado como um ponto chave para o entendimento deste efeito.

De acordo com as análises por setores, as relações observadas anteriormente são corroboradas (ver Figura 50 e Tabela 8). Particularmente, os setores de geração elétrica e industrial apresentam uma maior entrada do gás natural em relação aos combustíveis fósseis. No primeiro período analisado (2009-2013) há um aumento relativo da utilização de gás natural no setor de geração elétrica, residencial e comercial. Sendo assim, houve um valor negativo deste efeito de intensidade. No segundo período, todos os setores, com exceção de transportes, apresentaram o aumento no consumo de gás natural e, novamente, valores negativos. Merece destaque o setor industrial, com uma alta penetração do gás natural – alterando sua participação de 54,8%, em 2013, para 70,8%, em 2018. Ressalta-se ainda que o setor industrial fora mencionado no Plano Paulista de Energia 2020 como um setor relevante para a penetração do gás natural e consequente substituição dos combustíveis fósseis, além dos estudos já mencionados que verificam esse potencial (GALLO, 2018; SECRETARIA DE ENERGIA, 2012b; STRAPASSON, 2004). O setor de transportes, por sua vez, aparece como um setor com grande dificuldade de entrada para o combustível, pela grande cultura de outros combustíveis (como gasolina, etanol e diesel), falta de escala do gás natural, tanto em veículos leves como de carga, e baixo número de postos que disponibilizem tal combustível.

Figura 50: Valores do efeito de intensidade de fator de emissão dos combustíveis fósseis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8: Participação do consumo de gás natural entre os combustíveis fósseis por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.

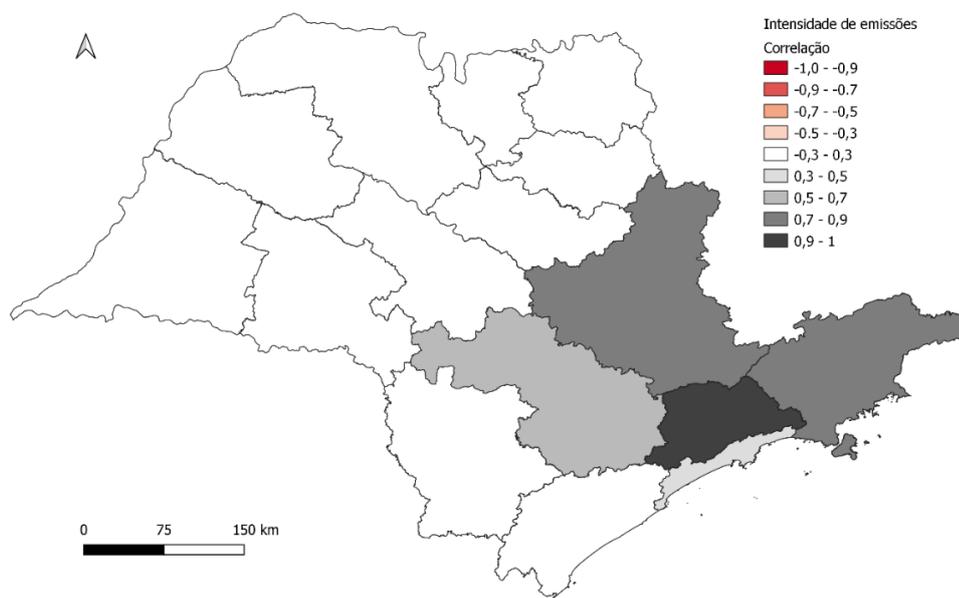
	2009	2013	2018
GERAÇÃO ELÉTRICA	70,2%	89,8%	92,4%
INDUSTRIAL	55,0%	54,8%	70,8%
RESIDENCIAL	9,1%	13,1%	17,2%
COMERCIAL	35,7%	36,7%	40,4%
TRANSPORTES	2,9%	1,5%	1,5%

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação às regiões administrativas, a tendência analisada no estado de São Paulo apresenta correlação muito alta ao que ocorre, sobretudo, na região Região Metropolitana de São Paulo (ver Figura 51). Notadamente, essa região, junto à Campinas e Sorocaba correspondem à uma alta quantidade do consumo energético estadual e também à uma inserção do gás natural à números negativos durante o período entre 2006 e 2018, justificando sua correlação (Figura 52). Já a região de São José dos Campos, apesar de apresentar uma correlação notável, durante o período apresentou um aumento da participação do gás natural em sua matriz e, conseqüentemente, apresentou um efeito negativo nas emissões. O mesmo ocorre com as regiões de Santos, Araçatuba, Central, Ribeirão Preto, Bauru e Marília. Todas essas regiões, com exceção de Marília e Ribeirão Preto, são cortadas por importantes gasodutos

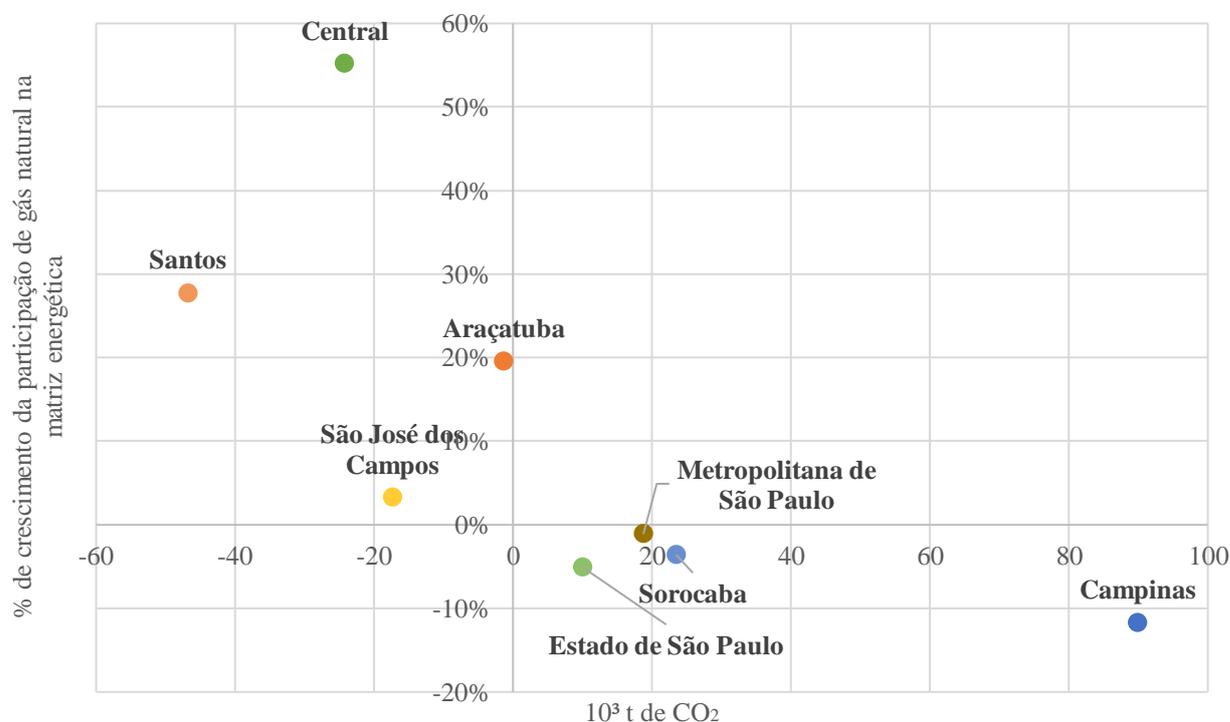
de transporte e apresentam o setor secundário como uma fonte relevante para o PIB. No gráfico a seguir não são todas as regiões que foram apresentadas, pois Franca, Itapeva, Presidente Prudente e Registro não apresentam o gás natural na sua matriz; Bauru e Marília apresentaram o valor inicial de zero, o que impossibilita calcular a taxa de crescimento, e; Barretos, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto que aumentaram consideravelmente a proporção de gás natural em sua matriz, mas também iniciaram com números bem reduzidos. Em conclusão, quando somados os efeitos ano a ano, as regiões de Santos, São José dos Campos, Ribeirão Preto, Bauru, Araçatuba, Marília e Central apresentaram total do efeito negativo em relação ao período estudado, ou seja, a substituição de derivados de petróleo por gás natural acabou por reduzir as emissões totais de CO₂.

Figura 51: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade de fator de emissão de combustíveis fósseis de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 52: Relação entre o aumento da participação de gás natural na matriz energética e o efeito de substituição de derivados de petróleo por gás natural em 10^3 t de CO_2 entre 2006 e 2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

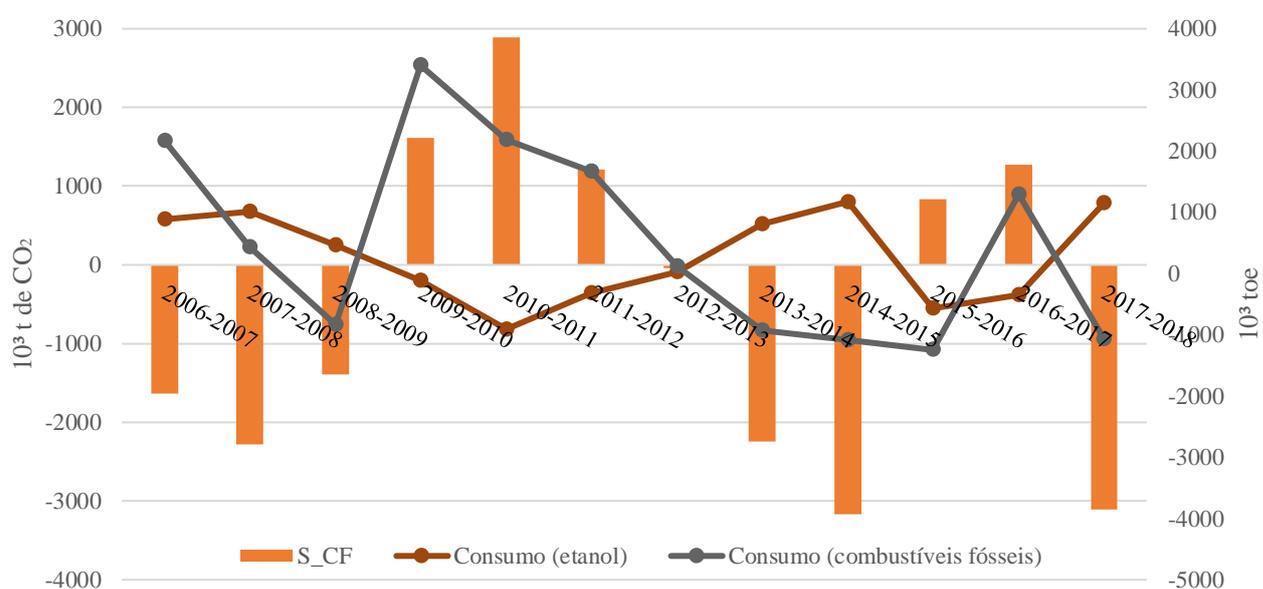
Por fim, por meio da análise dos dados demonstrados acima, sugere-se que a inserção do gás natural nos diversos setores da economia e o aumento da sua participação relativa auxiliaram na atenuação das emissões de CO_2 durante o período analisado. Essa relação ficou clara quando se analisa as regiões administrativas que apresentaram uma maior inserção do gás em substituição de derivados de petróleo, devido ao fornecimento desse insumo e o consumo industrial. Contudo, este efeito também apresenta uma pequena contribuição em relação ao montante das emissões totais.

5.2.2 Substituição de combustíveis fósseis por etanol

A substituição de combustíveis fósseis por etanol ou o uso de outros biocombustíveis é um segundo efeito que gera impacto nas emissões de CO_2 . O etanol é um biocombustível que pode ser sintetizado, inclusive, a partir da cana-de-açúcar, um recurso abundante no estado de São Paulo. A Figura 53 expõe as variações decorrentes de um ano para o outro, calculadas para esse efeito nas colunas em laranja para o estado de São Paulo. Identifica-se períodos de contribuição positiva – como é o caso das variações anuais entre 2009 até 2012 e entre 2015

até 2017 –, ou ainda períodos em que esse quociente de substituição permitiu a atenuação das emissões e rebaixou os números calculados para o patamar negativo. Em marrom e cinza escuro estão as variações da quantidade consumida de etanol e combustíveis fósseis, respectivamente, ano a ano.

Figura 53: Valores do efeito estrutural de participação do etanol dentre os combustíveis que contêm composição de carbono durante os anos de 2006 e 2018 (colunas laranjas) em 10^3 t de CO_2 . As linhas representam o consumo de combustíveis fósseis (cinza escuro) e etanol (marrom) em 10^3 toneladas de óleo equivalente.



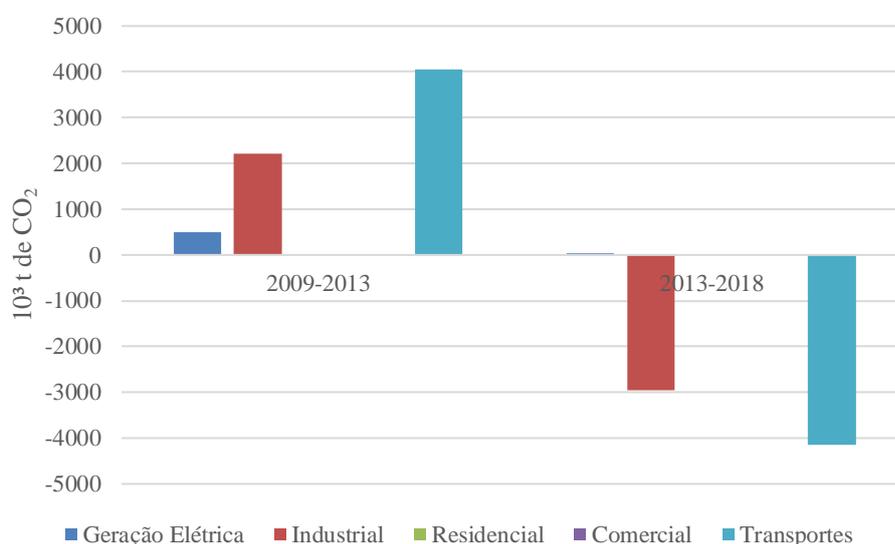
Fonte: Elaborado pela autora.

A curva de variação do consumo do etanol e as colunas em laranja, que representam o efeito da Identidade de Kaya Estendida indica a existência de uma altíssima correlação negativa ($\rho = -0,96$). Dessa forma, em momentos que o consumo do etanol varia positivamente, a tendência das emissões é de cair, e vice-versa. Isso sugere uma grande relevância do consumo desse combustível para combater os altos níveis de emissão e, até mesmo, a substituição (quando possível) de combustíveis fósseis. As oscilações no consumo devem-se também às oscilações na safra de cana, um dos principais causadores nas alterações do preço desse insumo.

Em relação aos diversos setores, um caráter diferente é notado entre os dois períodos analisados (ver Figura 54 e Tabela 9). No primeiro, quando há uma diminuição na participação do etanol devido à uma queda no setor sucroalcooleiro e concomitante ao desenvolvimento inicial do Pré-sal, ocorreu uma maior elevação das emissões, principalmente no setor de transportes. Já no período posterior, de ascensão na safra de cana-de-açúcar continua até pelo

menos o ano de 2016 (CONAB, 2021), ocorreu um crescimento na participação industrial e no setor de transportes, auxiliando a queda na variação das emissões relacionadas a esse efeito. A única exceção da tendência desse segundo momento foi o setor de geração elétrica, o qual teve uma participação constante na utilização de bagaço de cana. Vale lembrar que um dos pontos estratégicos da empresa Gas Brasileiro é a geração elétrica a partir de usinas que aceitem tanto a cana-de-açúcar para produção elétrica, quanto o gás natural nos períodos entre safra. Evidencia-se, ainda, que nem o setor residencial nem o comercial apresentam abertura para consumo de etanol.

Figura 54: Valores do efeito estrutural da entrada de etanol entre os combustíveis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.



(*) Os setores de geração elétrica e industrial contabilizam, além do consumo de etanol, o consumo de bagaço de cana.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9: Participação do consumo de etanol em relação ao consumo de combustíveis por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.

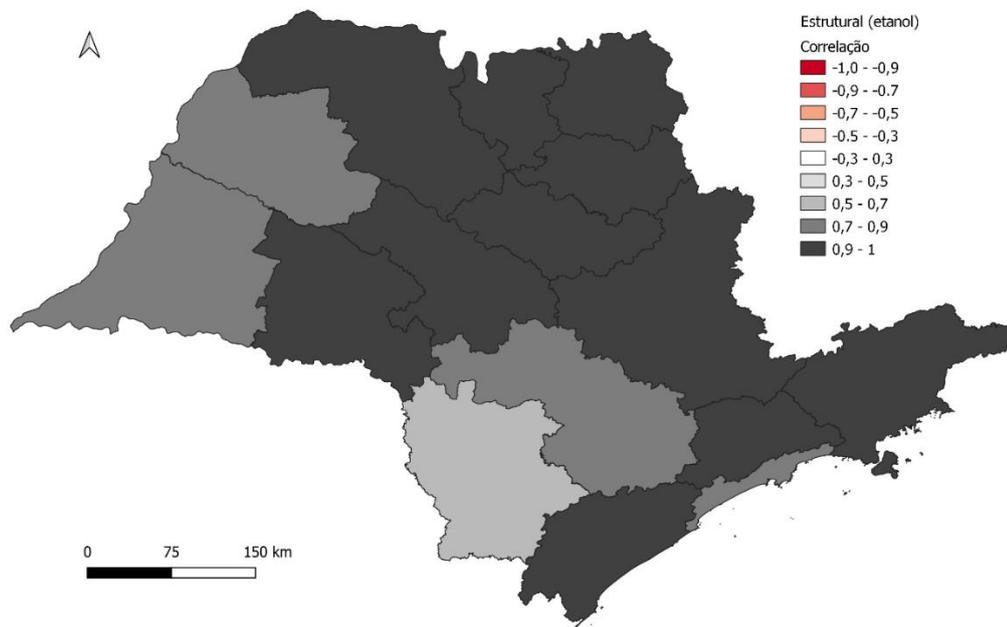
	2009	2013	2018
GERAÇÃO ELÉTRICA	40,8%	23,4%	22,5%
INDUSTRIAL	69,0%	65,2%	70,6%
RESIDENCIAL	0,0%	0,0%	0,0%
COMERCIAL	0,0%	0,0%	0,0%
TRANSPORTES	28,1%	21,2%	27,6%

(*) Os setores de geração elétrica e industrial contabilizam, além do consumo de etanol, o consumo de bagaço de cana.

Fonte: Elaborado pela autora.

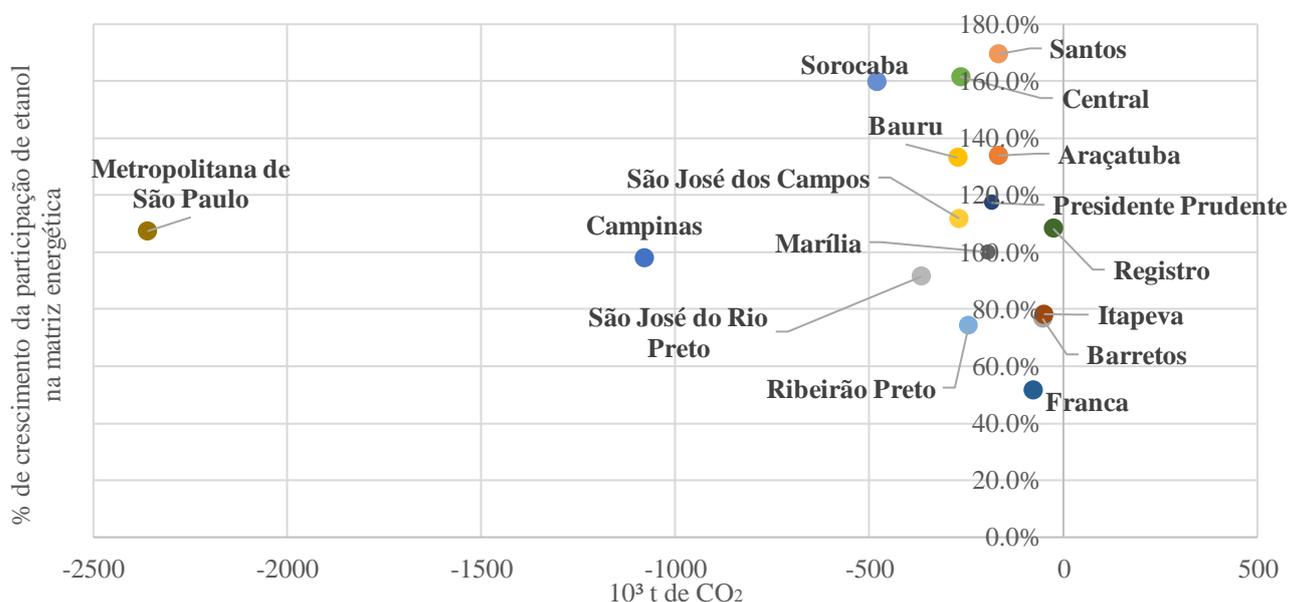
Pela avaliação entre as regiões administrativas (ver Figura 55), há uma forte correlação positiva com a tendência vista no estado de São Paulo. A única região mais destoante do geral analisado é a de Itapeva, que permaneceu com o indicador relativamente constante, sem grandes flutuações como a ocorrida no estado. Mesmo assim, essa região apresentou um aumento da contribuição do etanol em sua matriz (ver Figura 56). No geral, essa análise corrobora com a alta disseminação e forte cultura do etanol a partir da cana-de-açúcar no estado, sobretudo no setor industrial e de transportes. Em todas as regiões, esse efeito apresentou um efeito total negativo nas emissões de CO₂ durante o período analisado, devido ao crescimento da participação do etanol.

Figura 55: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito estrutural da substituição de combustíveis fósseis por etanol de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 56: Relação entre o aumento da participação de etanol na matriz energética e o efeito de substituição de combustíveis fósseis por etanol em 10^3 t de CO_2 entre 2006 e 2018.



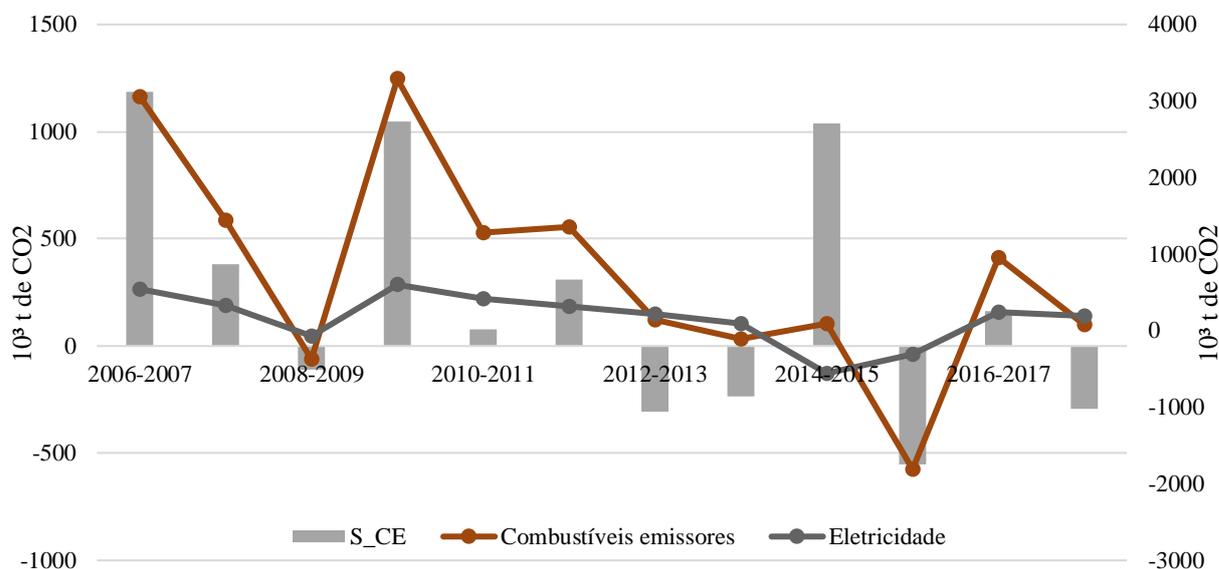
Fonte: Elaborado pela autora.

De maneira geral, esses dados sugerem a relevância da entrada de etanol como um combustível promissor para a atenuação das emissões de CO_2 e do efeito analisado em questão. Essa relação ficou evidente especialmente nos últimos anos. Como já mencionado no Capítulo 3, as vantagens do etanol são sua grande abrangência pelo estado e o alto potencial de investimento em diversas regiões administrativas.

5.2.3 Participação de combustíveis fósseis e etanol na matriz energética

Esse número-índice indica a contribuição das alterações na composição da matriz energética do estado de São Paulo, ou seja, a quantidade relativa dos combustíveis fósseis e o processo de eletrificação dos diversos setores. No gráfico abaixo (ver Figura 57), as colunas em cinza representam a contribuição absoluta a partir da substituição, entre os anos de 2006 e 2018. As linhas com marcadores apresentam a variação de um ano para o outro do consumo de combustíveis fósseis + etanol/bagaço de cana (em cinza escuro) e de eletricidade (marrom). Em geral, a variação no consumo da eletricidade permaneceu positiva durante todo o período, com exceção de 2015-2016, quando houve um aumento da tarifa média de eletricidade por conta da permissão do repasse dos custos adicionais de geração para o consumidor (bandeira vermelha). Já a curva cinza escura apresenta uma maior oscilação no período analisado, e essa variação

Figura 57: Valores do efeito estrutural de participação dos combustíveis fósseis+etanol na matriz energética durante os anos de 2006 e 2018 (colunas cinza claro) em 10^3 t de CO_2 . As linhas representam o consumo de combustíveis fósseis+etanol (marrom) e eletricidade (cinza escuro) em 10^3 toneladas de óleo equivalente.



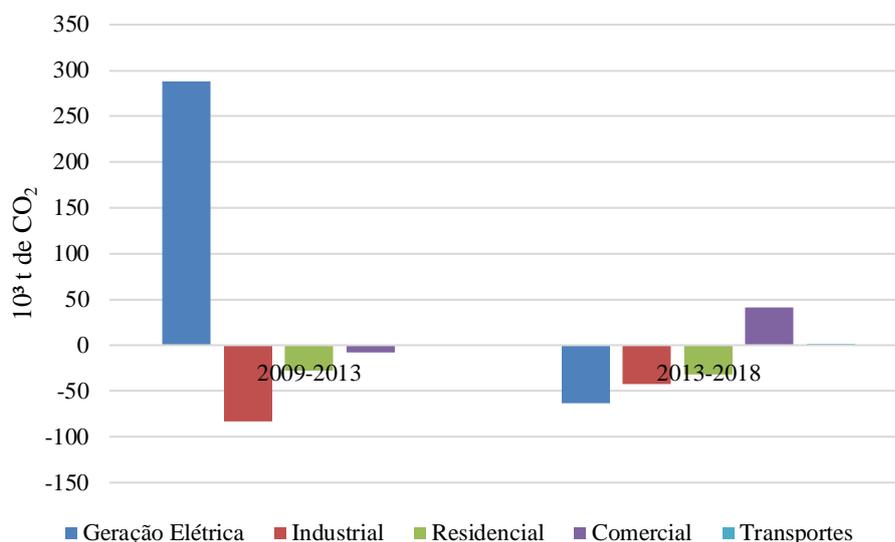
Fonte: Elaborado pela autora.

Em referência aos setores da economia durante o período entre 2009 e 2013, verifica-se a influência das emissões de CO_2 na eletrificação da matriz energética em cada setor (ver Figura 58 e Tabela 10). A atenuação das emissões ocasionadas pelo efeito da substituição de combustíveis fósseis + etanol pela eletricidade ocorre, sobretudo, na indústria, nas residências, no comércio (primeiro período) e na geração elétrica (segundo período). Em relação ao setor de energia elétrica¹⁵, nota-se um valor grande durante o primeiro período, advindo da crescente utilização de térmicas no estado. No período seguinte, o alto acionamento continua por pelo menos os dois anos seguintes. Mas, até 2018, ele decresce e alcança o valor negativo de emissões oriundas do efeito estrutural analisado. O setor industrial apresentou uma pequena alteração na composição da matriz energética, alterando o uso de eletricidade de 19,1% para 20,2% durante todo o período analisado. No entanto, esse processo já permitiu a atenuação das emissões. O valor do efeito estrutural no setor de transportes permaneceu praticamente constante em todo o período, uma vez que a predominância de combustíveis fósseis e etanol

¹⁵ No setor de geração elétrica, as fontes energéticas que não são combustíveis fósseis e bagaço da cana são outras fontes renováveis para produção de eletricidade, principalmente a hidroeletricidade.

possuem um grande destaque, e a eletrificação nos transportes ainda é algo incipiente no estado e no Brasil.

Figura 58: Valores do efeito estrutural da entrada de etanol entre os combustíveis por cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.



(*) Os setores de geração elétrica e industrial contabilizam, além do consumo de etanol, o consumo de bagaço de cana.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10: Participação do consumo de combustíveis fósseis + etanol em à matriz energética total por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018.

	2009	2013	2018
GERAÇÃO ELÉTRICA	65,2%	79,2%	77,2%
INDUSTRIAL	80,9%	80,2%	79,8%
RESIDENCIAL	36,6%	34,3%	32,4%
COMERCIAL	13,0%	12,6%	14,3%
TRANSPORTES	99,6%	99,6%	99,6%

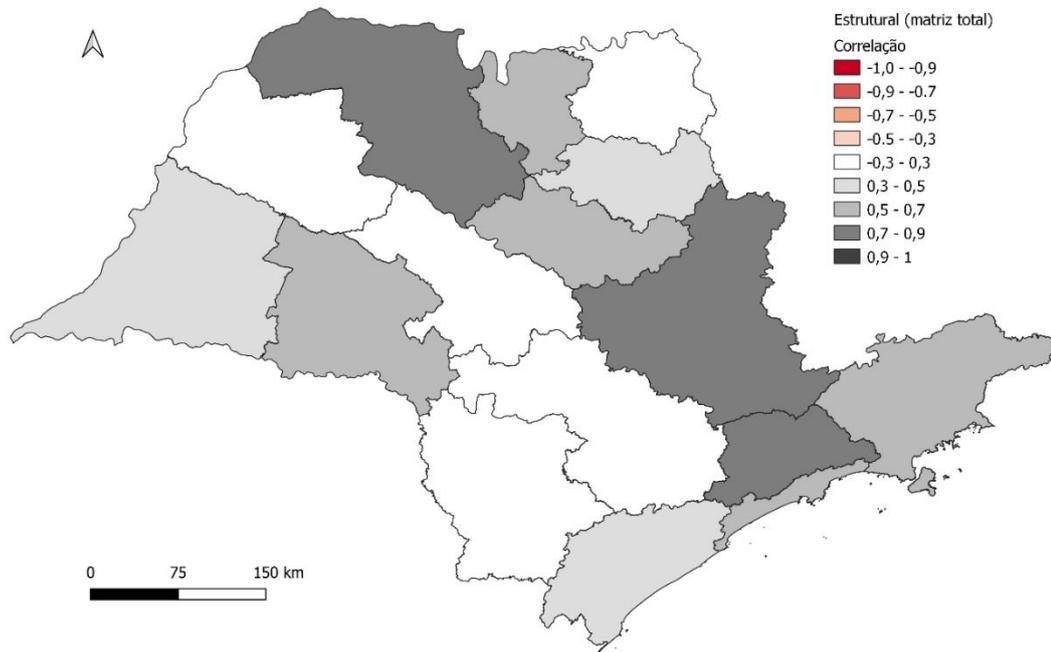
(*) Os setores de geração elétrica e industrial contabilizam, além do consumo de etanol, o consumo de bagaço de cana.

Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, a Figura 59 evidencia três grupos diferentes de regiões administrativas em referência à correlação existente na trajetória estadual e em cada uma dessas áreas. O primeiro

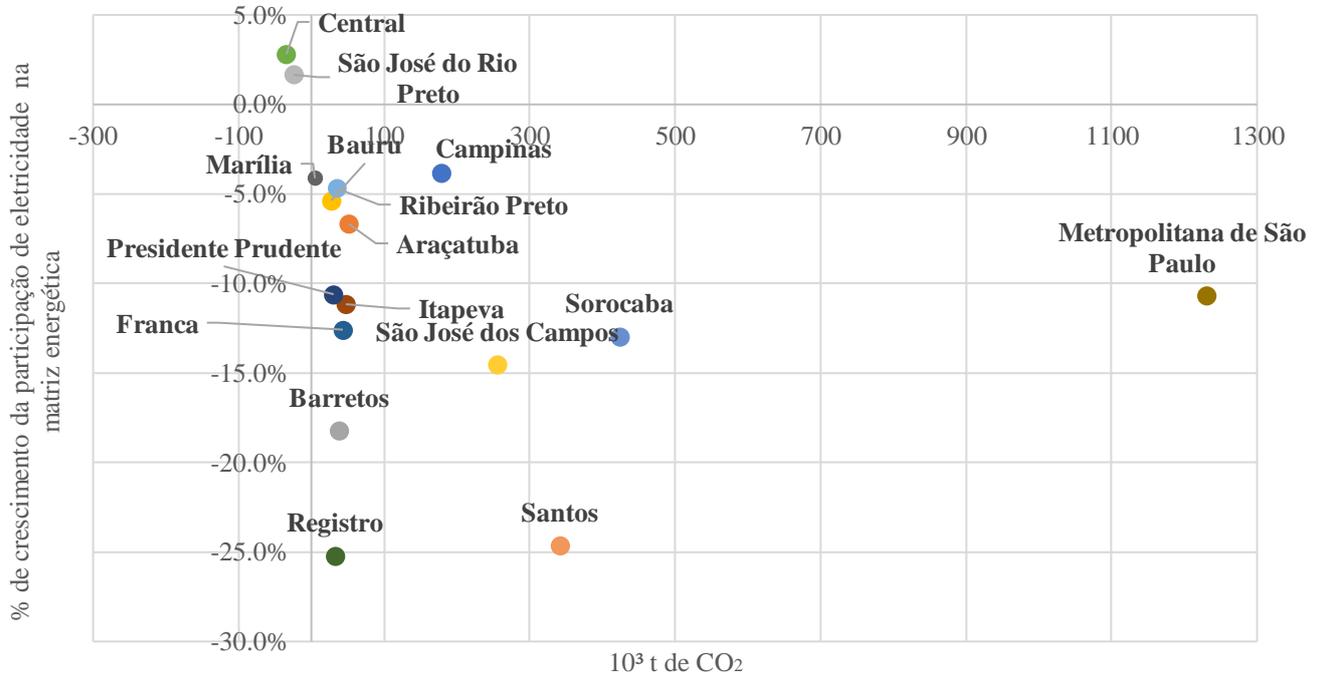
grupo de alta correlação é composto pelas regiões de Campinas, Metropolitana de São Paulo e São José do Rio Preto. O segundo grupo associa-se à uma correlação fraca e moderada, sendo composto pelas regiões de São José dos Campos, Santos, Registro, Ribeirão Preto, Central, Barretos, Presidente Prudente e Marília. Já o terceiro grupo, no qual há uma correlação muito fraca entre as regiões e o contexto estadual, são constituídos pelas regiões de Sorocaba, Barretos, Araçatuba, Franca e Itapeva. Devido à grande heterogeneidade, não foi possível estabelecer uma relação entre as causas e os diferentes níveis de correlação destas regiões. Salienta-se que as únicas regiões em que o efeito da participação de combustíveis fósseis e etanol na matriz energética resultou em redução nas emissões durante o período analisado foram a Central e São José do Rio Preto (ver Figura 60).

Figura 59: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito estrutural da substituição de combustíveis fósseis+etanol por eletricidade de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 60: Relação entre o aumento da participação da eletricidade na matriz energética e o efeito de substituição de combustíveis com composição de carbono por eletricidade em 10^3 t de CO_2 (2006-2018).

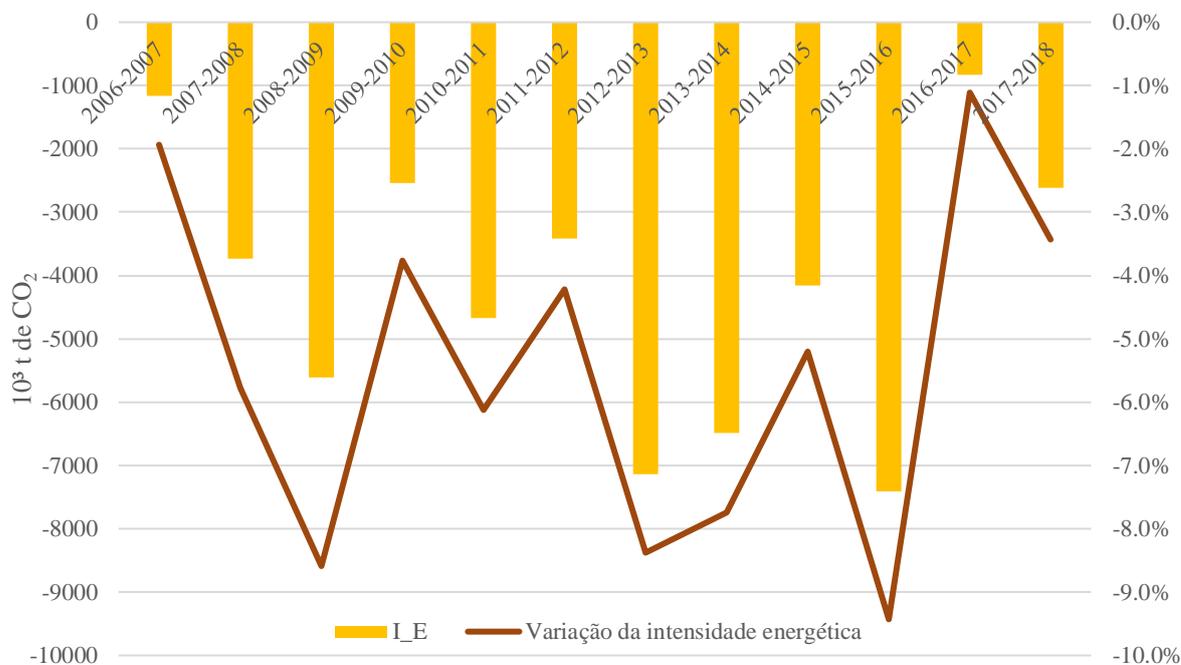


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.4 Intensidade energética

Um outro efeito possível de ser analisado é a intensidade energética, a qual, resumidamente, retrata a quantidade de energia necessária para gerar uma unidade de PIB e, conseqüentemente traduz os avanços tecnológicos e a eficiência na transformação. Nesse sentido, a Figura 61 aponta a quantificação das emissões associadas a esse efeito (colunas amarelas) e a variação percentual da intensidade energética de um ano para o outro. Por motivos evidentes, a correlação entre essas duas curvas apresenta-se fortemente positiva ($\rho= 0,98$). Além disso, durante o período observado, esse efeito mostrou-se uma importante fonte para a diminuição das emissões de CO_2 no estado de São Paulo, apresentando tanto valores negativos como variação negativa da intensidade energética.

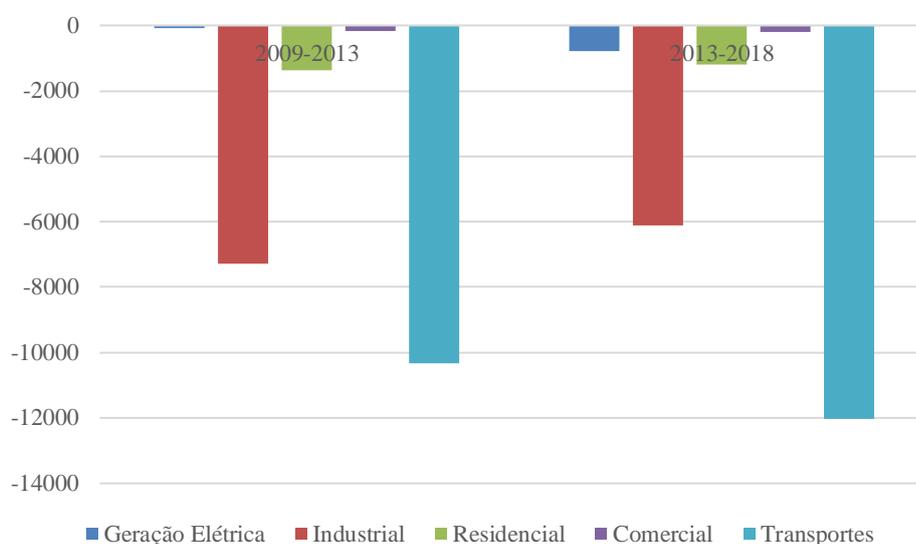
Figura 61: Valores do efeito de intensidade energética durante os anos de 2006 e 2018 (colunas amarelas) em 10^3 t de CO_2 . A linha marrom representa a variação percentual da intensidade energética e as colunas correspondem às variações nas emissões de CO_2 associadas ao efeito de intensidade energética.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar os setores de consumo, nota-se que em todos eles há o decréscimo das emissões, devido ao melhor desenvolvimento da intensidade energética, tanto do período de 2009 a 2013, quanto de 2013 a 2018 (ver Figura 62). No primeiro intervalo, os setores industrial e de transportes foram os grandes destaques, seguido pelo setor residencial. A geração elétrica e o setor comercial apresentam uma contribuição negativa diminuta. No segundo período, o setor industrial e de transportes também se sobressaíram, sendo que o de transportes ainda ampliou a redução. Os outros setores permaneceram com uma diminuição nas emissões próximas ao que foi visto no primeiro período, com exceção da geração elétrica, que apresentou um progresso na redução das emissões. De acordo com a Tabela 11, a maior variação de intensidade energética ocorreu no setor industrial, sendo essa redução superior aos 50%. Já o setor com uma redução mais tímida foi o de geração elétrica, com uma variação negativa de aproximadamente 27%. No entanto, ressalta-se novamente que todos os setores apresentaram redução na intensidade energética, a qual advém do desenvolvimento de tecnologias que necessitam de menos energia para gerar uma unidade de riqueza.

Figura 62: Valores do efeito da intensidade energética para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11: Valores de eficiência energética (10^3 toe/ R\$) por setor nos anos de 2009, 2013 e 2018 e a variação do valor durante o período analisado (2009-2018).

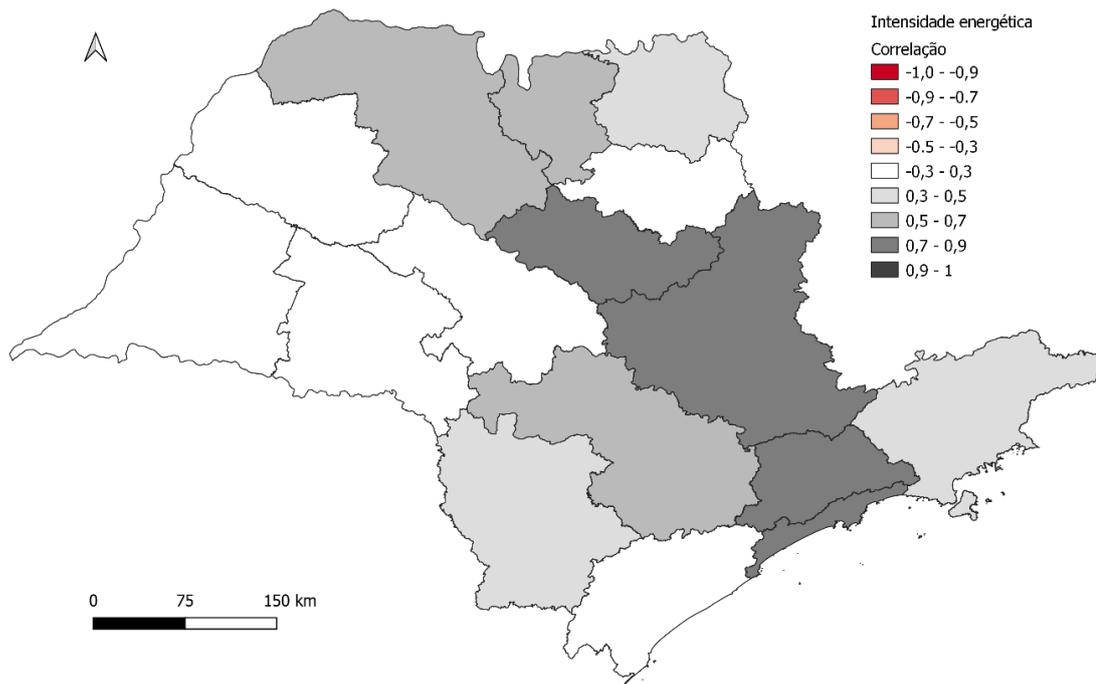
	2009	2013	2018	VARIÇÃO 2009-2018
GERAÇÃO ELÉTRICA	0,00000120	0,00000116	0,00000087	-27,63%
INDUSTRIAL	0,00002513	0,00001716	0,00001216	-51,61%
RESIDENCIAL	0,00000396	0,00000296	0,00000228	-42,29%
COMERCIAL	0,00000191	0,00000156	0,00000129	-32,47%
TRANSPORTES	0,00001675	0,00001325	0,00001034	-38,28%

Fonte: Elaborado pela autora.

Na distribuição geográfica, que correlaciona a trajetória observada no estado e nas diversas regiões administrativas em relação ao efeito de intensidade energética, também se identifica uma heterogeneidade. As regiões Metropolitana de São Paulo, Campinas, Santos e Central apresentam uma correlação forte com a trajetória observada no estado de São Paulo, enquanto as demais regiões apresentam uma correlação moderada ou fraca (ver Figura 63). No entanto, vale ressaltar que todas as regiões apresentaram um avanço na melhoria de intensidade energética e, conseqüentemente, variação negativa durante o período analisado, isto é, entre

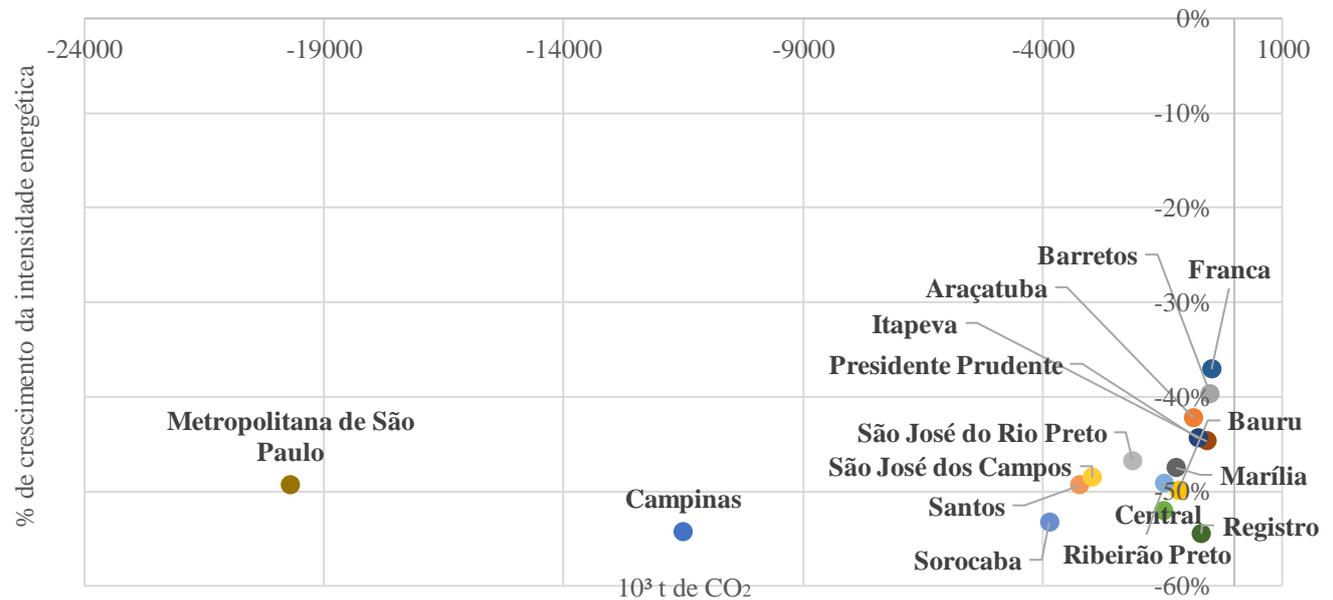
2006 e 2018 (ver Figura 64). Ademais, a contribuição total do efeito auxiliou da intensidade energética na diminuição de emissão de CO₂.

Figura 63: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade energética de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 64: Relação entre o aumento da melhoria da intensidade energética e seu efeito de intensidade em 10^3 t de CO_2 entre 2006 e 2018.



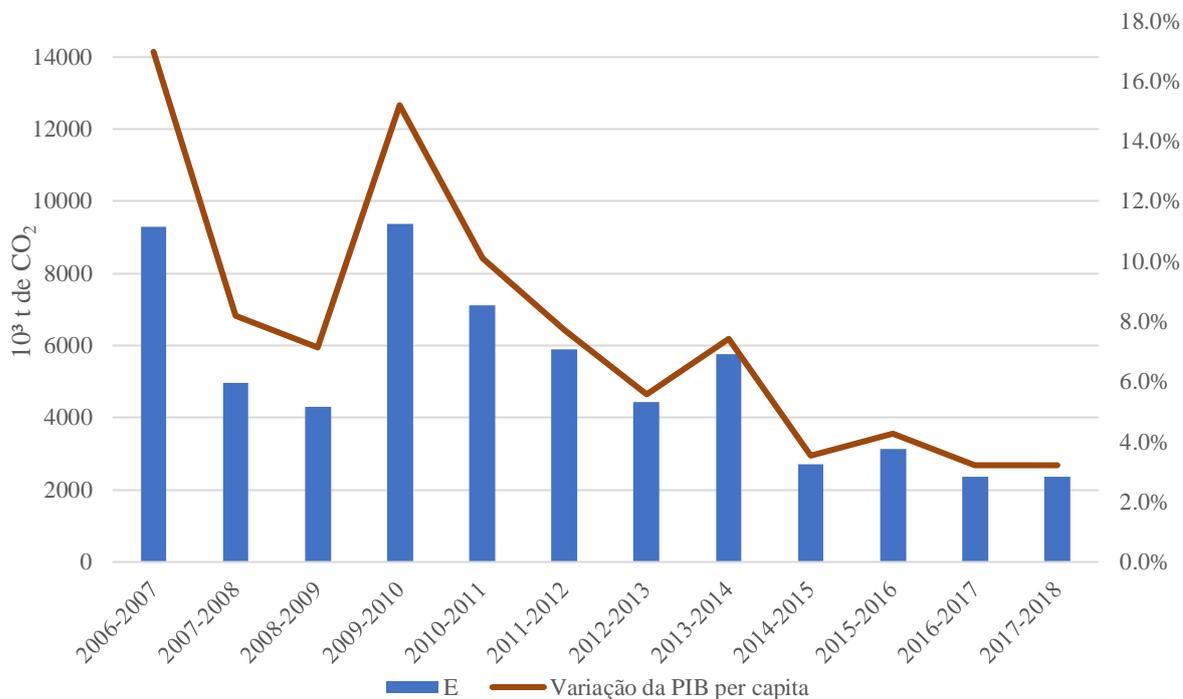
Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.5 PIB *per capita*

Esse efeito de escala é considerado um indicador de afluência, ou seja, a riqueza do estado. Em geral, o PIB *per capita* está associado ao desenvolvimento econômico do estado e à utilização de insumos energéticos. Resumindo, divide-se o PIB por toda a população.

A Figura 65 evidencia a quantificação das emissões de CO_2 a partir desse efeito de escala (colunas azuis). A linha marrom representa a evolução da renda per capita durante os anos de 2006 e 2018. Há uma tendência de variação positiva por todo o intervalo de tempo, seja das emissões ou do número-índice que compõe a Identidade de Kaya Estendida de renda *per capita*. Contudo, nota-se um progresso evidente de queda, justificado pela estagnação econômica dos últimos anos.

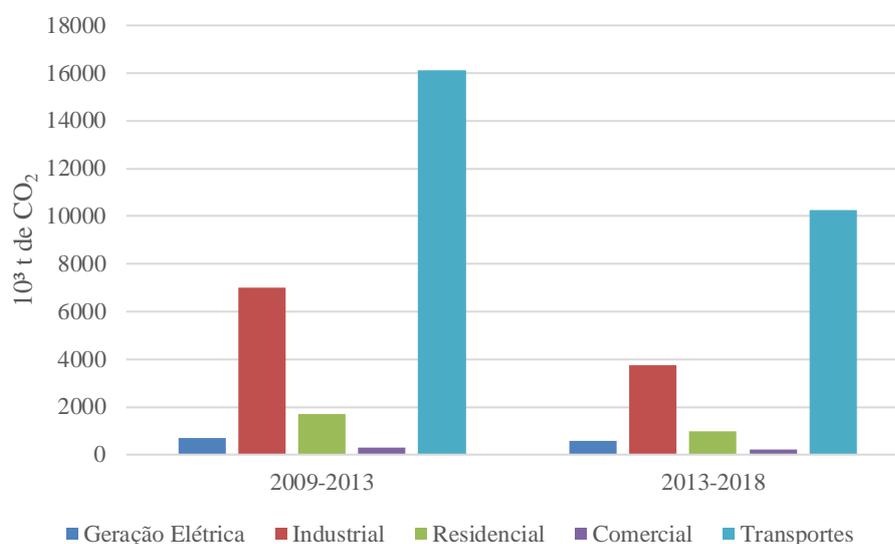
Figura 65: Valores do efeito de PIB *per capita* durante os anos de 2006 e 2018 (colunas azuis) em 10^3 t de CO₂. A linha marrom representa a variação percentual do PIB *per capita* e as colunas correspondem às variações nas emissões de CO₂ associadas a esse efeito de escala.



Fonte: Elaborado pela autora.

No gráfico a seguir (Figura 66), é revelada uma estimativa de contribuição de cada setor a partir da alteração do valor de PIB *per capita* da população paulista. Observa-se que esse fator não apresenta distinções intrínsecas a cada setor, como são os casos dos efeitos estruturais e de intensidade, que dependem da composição do consumo energético e dos avanços tecnológicos. O efeito do PIB *per capita* sugere uma alteração na movimentação de riquezas da população, o que interfere diretamente no consumo dos insumos energéticos e, conseqüentemente, na emissão de CO₂. Como já mencionado anteriormente, a economia paulista é intimamente relacionada ao consumo energético. Diante disso, a Figura 66 apresenta o efeito do PIB *per capita* como uma maior contribuição positiva nas emissões de CO₂ no primeiro período (2009-2013), quando a tendência de queda e estagnação econômica ainda não era muito presente. Já no segundo momento, essa contribuição, apesar de continuar positiva, apresentou certa atenuação.

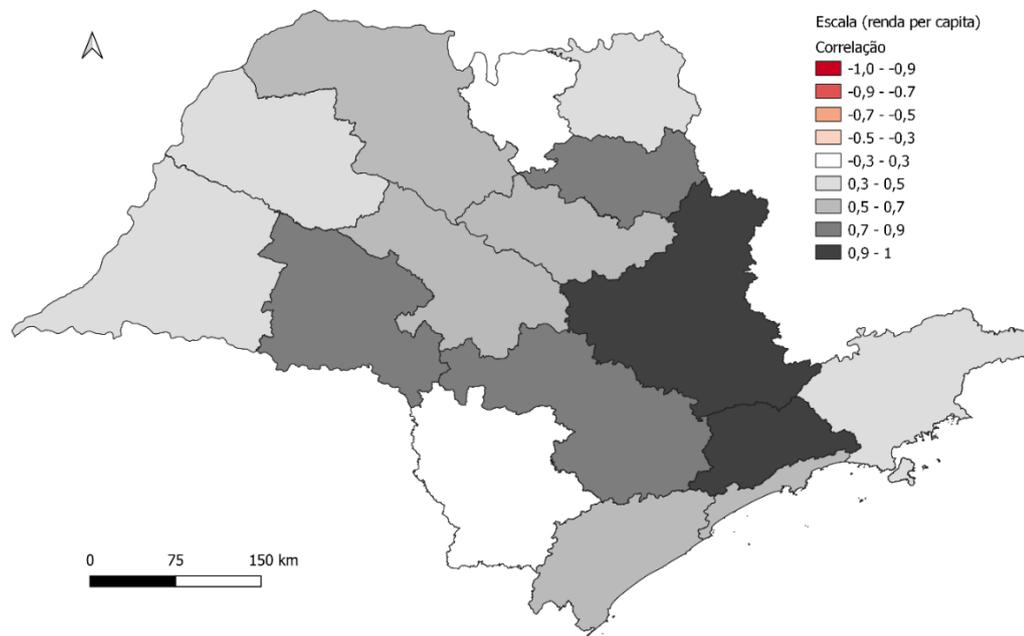
Figura 66: Valores do efeito do PIB *per capita* para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

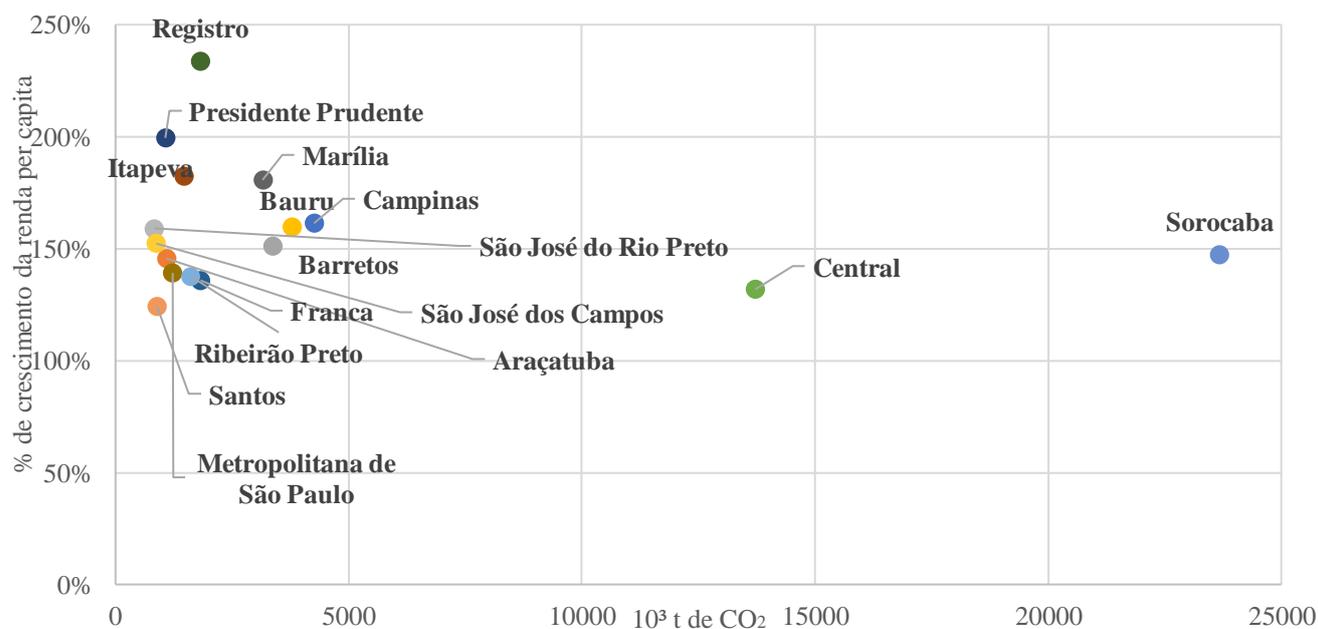
No mapa a seguir, é apresentada a correlação das trajetórias de cada região administrativa com a trajetória do efeito do PIB *per capita* do estado de São Paulo (ver Figura 67). As regiões de Campinas e Metropolitana de São Paulo apresentaram uma alta correlação com a tendência estadual – o que não é diferente do esperado, uma vez que essas duas regiões apresentam uma alta contribuição do PIB total estadual. As regiões de Barretos e Itapira, por sua vez, apresentaram uma correlação muito fraca. Ambas as economias tiveram crescentes número-índices relativos a esse efeito escala durante o período analisado, mas outras regiões como Registro, Marília e Presidente Prudente apresentaram um crescimento ainda maior de suas rendas *per capita*. Por fim, as demais regiões apresentaram, em geral, uma correlação média. Salienta-se que, apesar da queda ou estagnação das emissões devido à correlação com o estado, todas as regiões apresentaram um total positivo em relação efeito do PIB *per capita* durante o período analisado. Destaca-se as regiões de Sorocaba e Campinas com aumentos significantes das emissões (ver Figura 67).

Figura 67: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de escala do PIB per capita de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 68: Relação entre o aumento renda *per capita* e seu efeito de escala em 10^3 t de CO_2 entre 2006 e 2018.

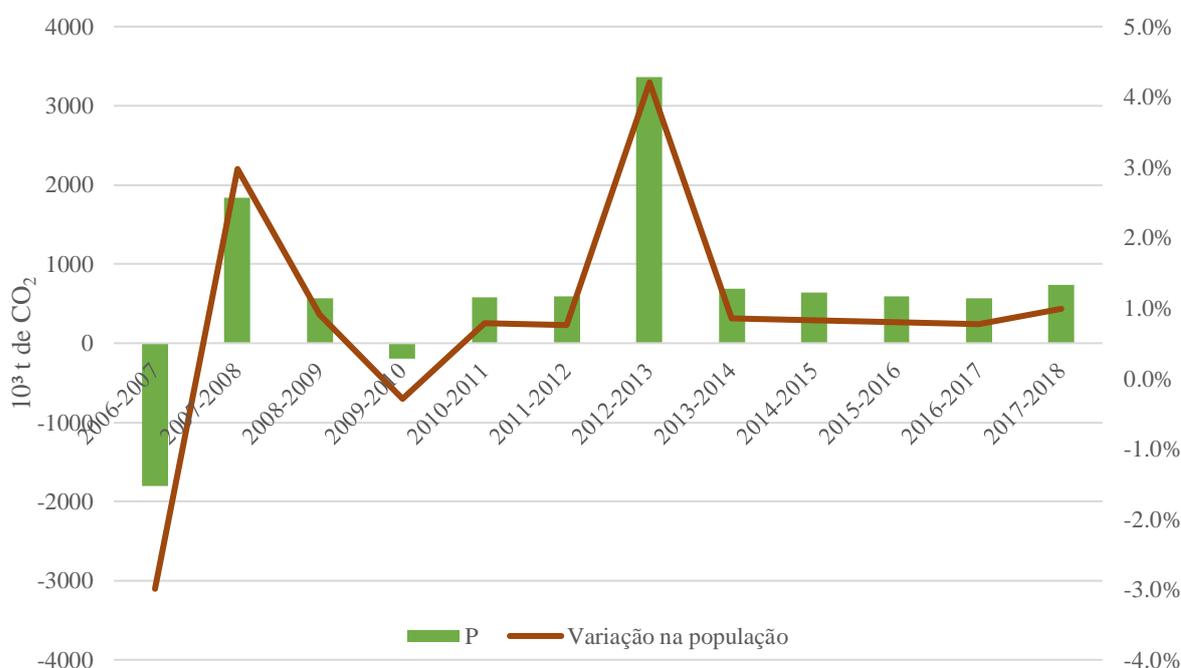


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.6 População

A população, considerada um último efeito de escala, também traduz o aumento das emissões de CO₂ de acordo com o aumento da população. Na Figura 69, a contribuição das emissões está em coluna verde e a alteração em linha marrom. A alteração da população também está intimamente conectada ao aumento das emissões no setor energético, pois parte do princípio de que isso também é um fator que aumenta o consumo. Importante mencionar que os biênios 2006-2007 e 2009-2010 apresentam a contribuição de emissões de CO₂ e a variação negativas. Sugere-se que isso ocorre devido ao ajuste das estimativas da população, uma vez que são nesses anos que as contagens propriamente ditas (ou censo) foram realizadas. Portanto, estima-se que, salvo essas flutuações que são seguidas de picos, a variação da contribuição da população enquanto um fator de escala permaneceu constante durante o período analisado, assim como a variação no crescimento da população, permanecendo cerca de 1% ao ano.

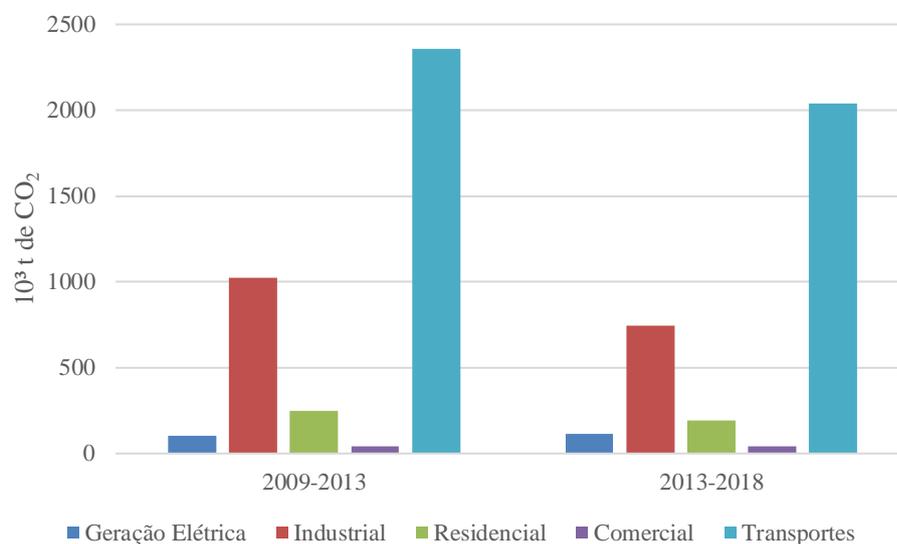
Figura 69: Valores do efeito da população durante os anos de 2006 e 2018 (colunas verdes) em 10³ t de CO₂. A linha marrom representa a variação percentual da população e as colunas correspondem às variações nas emissões de CO₂ associadas ao efeito de escala da população.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 70 também mostra a contribuição de cada setor a partir do que é esperado com o aumento da população. Como esta também é um efeito de escala, não se espera distinções a partir de especificidades de cada setor. Como comentado anteriormente, por apresentar uma relativa constância na contribuição das emissões durante o período analisado, entre os setores da economia não seria diferente. Tanto nos períodos de 2009-2013 como no de 2013-2018, a contribuição foi positiva em todos os setores e com valores bem próximos entre esses dois períodos.

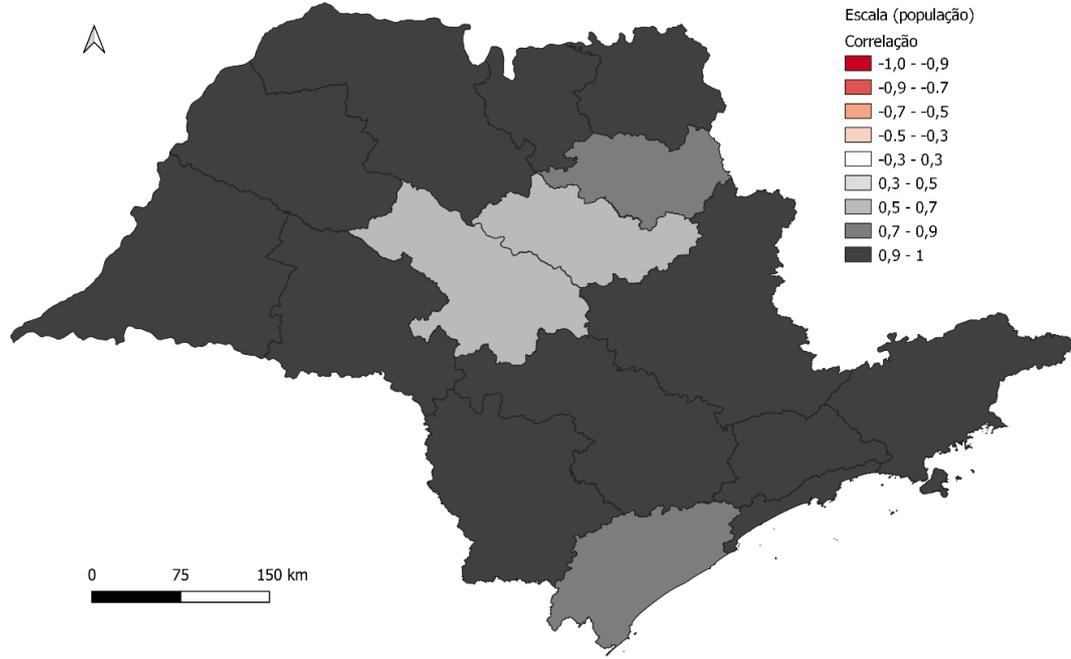
Figura 70: Valores do efeito da população para cada setor da economia entre os períodos de 2009-2013 e 2013-2018



Fonte: Elaborado pela autora.

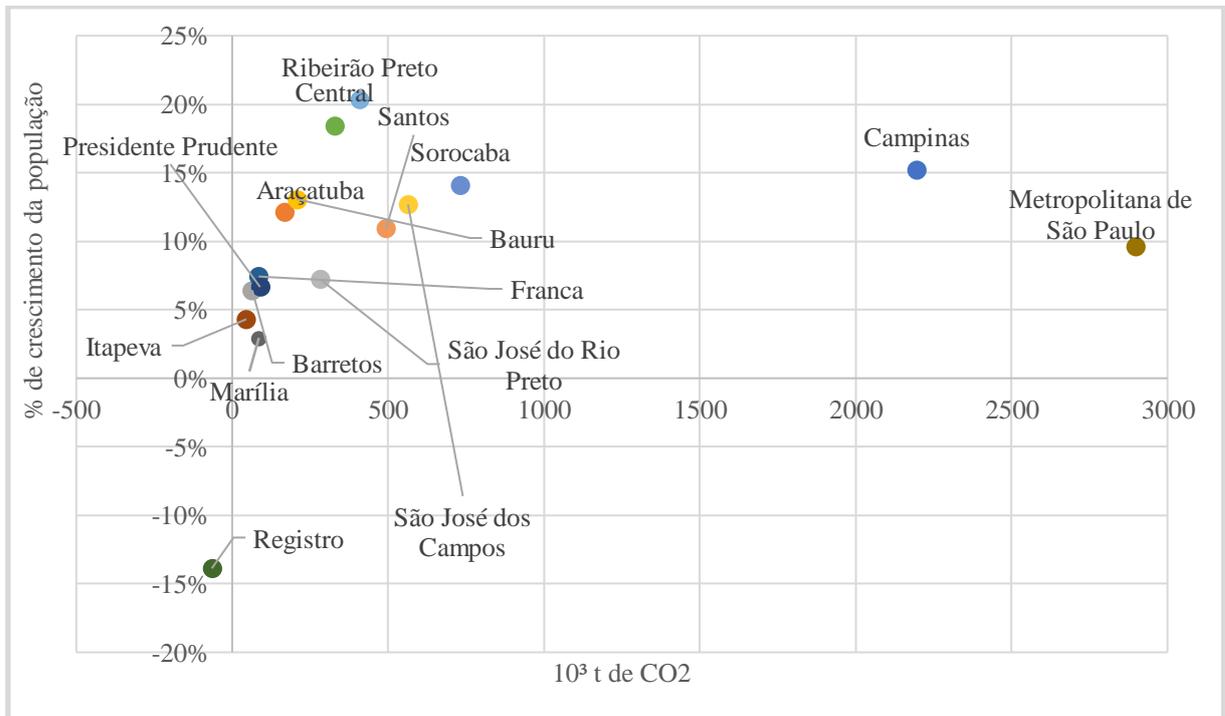
O efeito de escala não apresenta uma grande variação geográfica, assim como visto no efeito do PIB *per capita*. As regiões com menor correlação são Central, Ribeirão Preto, Registro e Bauru. No entanto, considera-se que há uma homogeneidade por todo o estado em relação a esse fator (ver Figura 71). Em todas as regiões totaliza-se uma contribuição positiva em relação ao efeito da população durante o período analisado (ver Figura 72).

Figura 71: Mapa de correlação entre a série histórica do efeito de intensidade energética de cada região administrativa do estado de São Paulo e a série histórica estadual (entre 2006-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 72: Relação entre o aumento da população e seu efeito de escala em 10^3 t de CO_2 entre 2006 e 2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

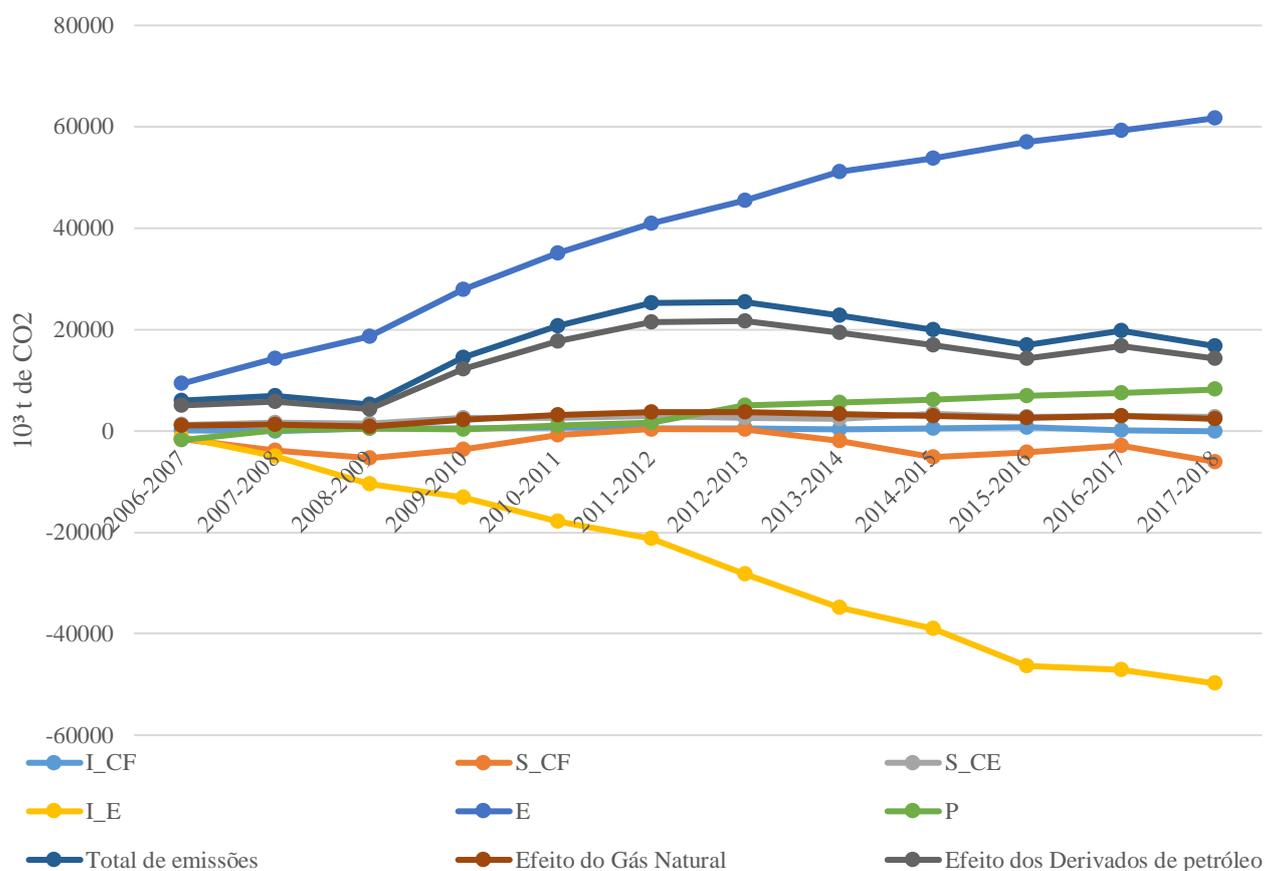
5.2.7 Panorama geral de todos os efeitos da Identidade de Kaya Estendida

Após o aprofundamento em cada um dos efeitos, os resultados observados acima e as análises realizadas anteriormente são sintetizadas aqui. A Figura 73 representa as curvas associadas aos efeitos acumulados por todo o período estudado (2006-2018). Infere-se que o efeito de maior contribuição para o aumento das emissões é o de PIB *per capita*, mesmo com a estagnação do crescimento econômico dos últimos anos. Em alguns estudos anteriores, é evidente a dominância desse efeito, seja em uma comparação entre países ou a nível nacional (HENRIQUES *et al.*, 2014; O'MAHONY, 2013; TAVAKOLI, 2018). Por outro lado, o efeito de maior contribuição negativa é a intensidade energética, ressaltando avanços tecnológicos que permitem um consumo menor de energia para a produção de uma unidade de PIB.

Os outros efeitos apresentaram uma contribuição reduzida. O efeito de escala da população, por exemplo, resultou em um aporte positivo das emissões. Por sua vez, o número-índice acumulado do fator de emissão (troca de combustíveis pesados pelo gás natural) apresentou uma contribuição próxima de zero. Já os outros efeitos estruturais, isto é, a substituição de combustíveis fósseis por etanol e a eletrificação, apresentaram acumulações negativa e positiva, respectivamente.

Outra verificação que a Figura 73 permite trazer é a contribuição do gás natural e dos derivados de petróleo em relação às emissões totais. A curva marrom representa o valor acumulado do efeito do gás natural, que reflete uma contribuição bem reduzida quando comparada à de derivados de petróleo, em cinza.

Figura 73: Acumulação dos diferentes efeitos da Identidade de Kaya Estendida no estado de São Paulo durante o período entre 2006 e 2018.



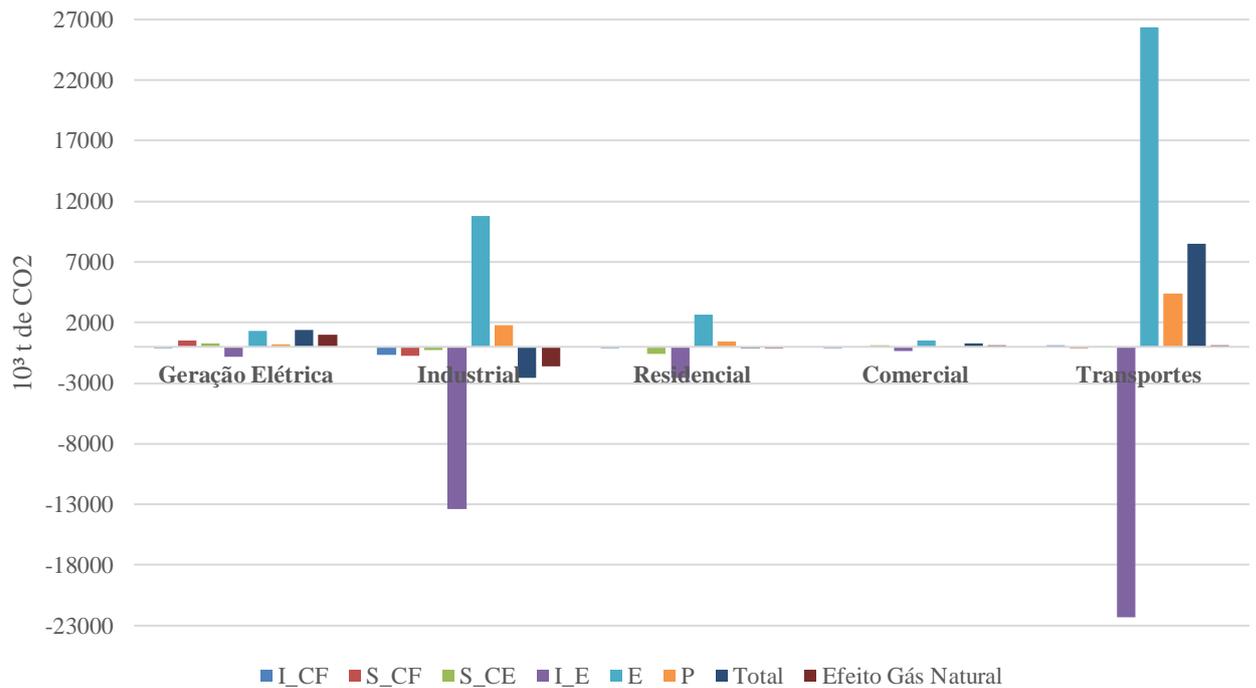
Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos setores de consumo, evidencia-se que, entre o período de 2009 e 2018, a geração elétrica, comercial e o transporte foram responsáveis pelo aumento das emissões de CO₂ (ver Figura 74). Em todos eles, o fator de PIB *per capita* ultrapassou a contribuição negativa adquirida pela eficiência energética e ainda foi agravada pela diminuição da utilização de recursos alternativos (aos derivados de petróleo) no setor de geração elétrica ou pelo efeito do aumento da população no setor de transportes.

Já os setores industrial e residencial apresentaram uma redução nas emissões durante o intervalo analisado. A partir dos efeitos, constata-se que a atenuação causada pela eficiência energética apresentou maiores impactos do que o aumento do PIB *per capita*. Mas, além disso, para o setor industrial, a inserção de gás natural em substituição aos derivados de petróleo e a inserção do etanol auxiliaram na diminuição. Já no setor residencial, a eletrificação e a substituição de combustíveis derivados de petróleo por gás natural também influenciaram a diminuição da emissão de CO₂.

O efeito do gás natural em cada setor apresentou um caráter diferenciado para cada um dos diversos setores. Em relação à geração elétrica, o intervalo estudado apresentou uma contribuição relevante a partir do efeito do gás natural. Isso se acentuou com a necessidade de produção elétrica por térmicas durante as complicações junto aos reservatórios hídricos. Já o setor industrial totalizou uma redução nas emissões, e o fator gás natural demonstrou uma contribuição relevante para essa diminuição. No setor de transportes, a contribuição é pequena, como já esperado devido à baixa penetração desse combustível na matriz de transportes. Em relação aos setores residencial e comercial, a pequena contribuição positiva nas emissões também é verificada.

Figura 74: Efeitos totais entre os anos de 2009 e 2018 em cada setor de consumo. A coluna azul é resultado do somatório de todos os efeitos por setor e a coluna em cor vinho é a contribuição do gás natural.

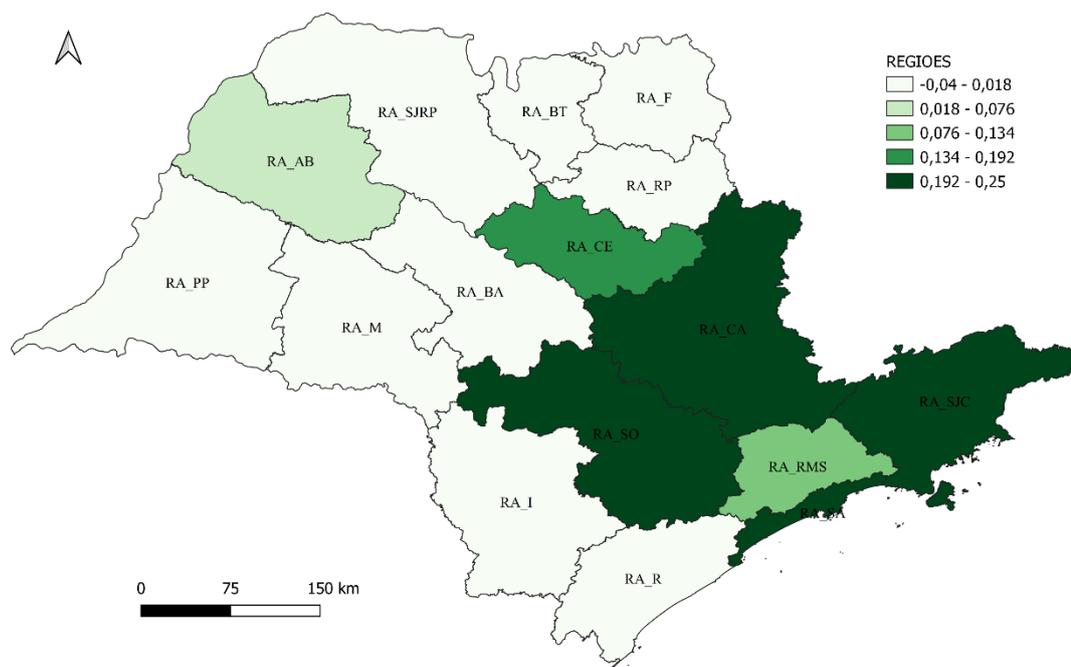


Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, em relação a distribuição geográfica, demonstra-se por meio da próxima figura (Figura 75), que o efeito do gás natural em relação às emissões concentra-se na região pelo qual o acesso e a malha de distribuição se fazem mais presente. A região à noroeste do estado concentra um alto consumo energético, assim como grande parte da atividade econômica. Em contrapartida, ainda há duas das regiões administrativas nas quais não há nenhuma cidade que tenha acesso ao gás natural. Para tanto, reforça a diferença regional observada no estado a partir

da diferença na distribuição dos energéticos. O início da consolidação do gás natural ainda se apresenta incipiente, mas promissora para os próximos anos, inclusive pela oferta de biometano.

Figura 75: Efeito do gás natural nas emissões de CO₂ em cada região administrativa em relação ao somatório do efeito total e do gás natural durante os anos de 2006 e 2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Considerações parciais

A partir dos dados analisados neste capítulo, verificou-se que os efeitos de escala, isto é, população e PIB *per capita*, apresentaram um comportamento bem similar em todo o estado. A população em geral apresentou um crescimento de menos de 1,0% ao ano, o que resultou em uma pequena contribuição positiva (8170×10^3 t de CO₂) em relação aos outros montantes calculados para os demais efeitos. Essa tendência foi observada por todo o estado sem grandes discrepâncias.

Em relação ao PIB *per capita*, há um progresso estadual no qual verifica-se altas contribuições positivas para as emissões de CO₂, sendo que, a partir de 2013, com a estagnação econômica, há uma queda no valor absoluto desses fatores. Esse progresso é verificado com alta correlação em todo o estado, com exceção de Barretos e Itapeva, que mantiveram uma

ascensão do PIB *per capita* por quase todo o período observado. Durante o intervalo de tempo analisado, o fator PIB *per capita* resultou em $61\,712 \times 10^3$ t de CO₂. Para ambos os fatores (população e PIB *per capita*), não há uma grande relevância na análise por setor, uma vez que não dispõem de especificidades dedicadas a um ou outro setor.

O efeito de intensidade energética pode ser considerado uma importante ferramenta para o combate às altas emissões de CO₂, apresentando o maior efeito negativo e que cancela, em parte ou totalmente, o efeito positivo de PIB *per capita* em todo o período analisado. O total dessa contribuição negativa resultou em $-49\,787 \times 10^3$ t de CO₂. O setor de transporte e industrial apresentaram as maiores contribuições, o que sugere o fato de algumas regiões como Campinas, São Paulo e São José do Rio Preto apresentarem altas correlações com o que ocorre no estado, isto é, são regiões que concentram alta relevância para a indústria e transporte.

O outro efeito de intensidade, relativo ao fator das emissões de combustíveis fósseis, é a relevância da entrada do gás natural em substituição aos derivados de petróleo. O montante total adquirido no tempo verificado entre 2006 e 2018 é de -10×10^3 t de CO₂. Os outros setores também apresentam um certo potencial a ser explorado. Em relação à regionalização, as regiões que apresentam pelo menos 2% do gás natural na composição de sua matriz energética são as mesmas onde se observa uma redução nas emissões por esse fator, com exceção da região de Campinas e Metropolitana de São Paulo.

Por fim, os efeitos estruturais, ou seja, que representam a composição da matriz energética do estado, mostram dois comportamentos diferentes. O efeito da entrada de etanol totalizou uma retirada de -6078×10^3 t de CO₂. Já o efeito de eletrificação resultou em um acréscimo de 2702×10^3 t de CO₂, devido ao aumento da proporção de combustíveis fósseis na matriz. O etanol é considerado um importante insumo para o Brasil, especialmente para o estado de São Paulo. A correlação da trajetória apresentou-se dissipada por todas as regiões administrativas do estado. O etanol apresenta uma boa penetração nos setores industrial, de transportes e, em uma menor escala, para a geração de energia elétrica. Dito isso, para finalizar este trabalho, os resultados apresentados nessa seção são aplicados a todo o contexto trabalhado anteriormente, trazendo considerações finais acerca do gás natural no estado de São Paulo por uma visão de descarbonização.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais desse trabalho, evidencia-se que o estado de São Paulo se mostra como um carro-chefe brasileiro no compromisso de atenuar as mudanças climáticas, pois é um dos primeiros estados a criar um fórum voltado às discussões sobre as ações de mitigação e acompanhamento das emissões de gases de efeito estufa, e adaptações necessárias frente às consequências das atividades humanas, que impactam a dinâmica ambiental e climática. Além disso, reafirma sua agenda, a partir de 2009, devido à instituição do PEMC, no qual há a declaração de metas sobre redução de emissões de gases de efeito estufa, além da exigência de inventários para o acompanhamento destas e a definição de diretrizes para ações nas diversas áreas de atuação, incluindo o setor energético.

Ademais, o estado se mostra como um dos espaços em que o mercado de gás se demonstra mais consolidado, dentro do território brasileiro. Durante o período entre 2006 e 2018, o consumo de gás natural apresentou um crescimento de quase 30%. Isso se deve também ao fato de que é nesse estado que há importantes campos de exploração *offshore* e a oferta advinda do Gasbol, o maior consumo de gás natural no país e uma infraestrutura de transporte e distribuição robusta. Ressalta-se que essa infraestrutura é um relevante aspecto para que a transição energética ocorra, uma vez que os altos investimentos para a sua construção podem prejudicar esse processo. Portanto, aqui encontra-se um ponto importante a ser considerado para que o gás natural, quando comprovada suas vantagens para a descarbonização, viabilize-se como um elemento de transição energética por já ter uma infraestrutura razoável em seu território.

No estado de São Paulo nota-se que a regionalização do acesso ao gás natural também se faz presente entre as áreas concessionárias das empresas de distribuição e às regiões administrativas. Além das diferentes estratégias e níveis de captação de clientes das diferentes companhias, o acesso à infraestrutura de transporte também é diferenciado. Isso resultou em potenciais dispare de inserção do gás natural nas regiões e, conseqüentemente, a substituição de derivados de petróleo é diferenciada. Portanto, esse é o único efeito da Identidade de Kaya com uma notável diferenciação entre as regiões administrativas: aquelas que aumentaram a participação de gás natural em sua matriz no intervalo de tempo, também obtiveram contribuições negativas de um dos efeitos de intensidade, isto é, do fator de emissão. Em relação aos outros efeitos, é possível observar uma correlação maior entre as diversas regiões administrativas e a trajetória estadual, salvo poucas exceções.

O estado de São Paulo também apresenta uma forte cultura com o etanol e biomassa, sobretudo vindos da cana-de-açúcar. Isso é observado na alta participação na matriz de oferta interna de energia e ao elevado consumo na maior parte das regiões administrativas do estado. Essa fonte energética também é considerada uma fonte renovável e com o fator de emissão nulo. Apesar de emitir gases CO₂ para geração de energia, a biomassa também apresenta o papel de reservatório de carbono durante o momento de plantio. Mas, apesar de o etanol ser visto como uma fonte concorrente do gás natural, há uma oportunidade de sinergia entre eles. Em momentos de baixa safra e de queda na produção, o gás natural pode ser um combustível complementar, sobretudo no setor industrial, onde o etanol e biomassa são consolidados, ou na geração elétrica, no qual há o crescimento de sua participação. Portanto, sugere-se que os insumos sejam pensados em sincronia e que revertam em uma matriz mais limpa, mas sem ignorar a segurança energética, que também se relaciona com o acesso econômico a esses insumos.

Em relação à análise do comportamento da curva de emissões de CO₂ no estado de São Paulo, é possível observar a retração nos últimos anos. A partir da verificação dos efeitos determinados na Identidade de Kaya Estendida, demonstra-se o avanço tecnológico na eficiência energética como uma ação relevante para esse decréscimo durante o período analisado. No entanto, apesar do efeito de escala de afluência sempre demonstrar-se como relevante para o aumento das emissões de CO₂, a desaceleração do crescimento econômico do estado também refletiu na diminuição deste efeito durante os últimos anos do período analisado. O único setor que apresentou crescimento contínuo no PIB per capita é associado às atividades terciárias, que em geral apresentam uma intensidade menor no consumo energético e, conseqüentemente, tem menor impacto nas emissões totais do estado.

De qualquer maneira, espera-se que o progresso econômico projetado no estado de São Paulo nos próximos anos não eleve as emissões. Para isso, de acordo com o efeito do PIB *per capita*, é necessária a adoção de medidas ainda mais fortes para que atitudes sejam redirecionadas aos fatores que não elevem as emissões e não comprometam o desenvolvimento do estado. É o caso do potencial de substituição de derivados de petróleo por gás natural no setor industrial, a cogeração e geração distribuída de gás natural, o incentivo às práticas de eficiência energética, a criação de planos integrados de recursos que podem se complementar (como é o caso do etanol e gás natural), uma maior incorporação do etanol e gás natural no setor de transportes, entre outras iniciativas. Apesar do efeito do fator de emissão não apresentar números negativos, pode atuar no sentido de reduzir as emissões causadas pelos derivados de

petróleo, e em conjunto com outras soluções mitigadoras (como o caso do avanço das tecnologias) pode auxiliar a alcançar o *net zero* firmado pelo estado de São Paulo.

Com isso, fica evidente as vantagens deste insumo, a partir dos dados históricos. Ele auxiliou em estabilizar as emissões frente aos setores mencionados, com exceção do setor de transportes, no qual o gás natural ainda não apresenta inserção relevante. Percebe-se que, no intervalo de tempo observado, as atitudes mencionadas no PPE, como a penetração de gás natural e outras fontes renováveis, resultaram em uma diminuição na dependência dos derivados de petróleo. Portanto, é fundamental para que os efeitos de atividade econômica e, consequente aumento das emissões de CO₂, sejam neutralizados, que o estado se utilize do gás natural – este recurso presente no território paulista - de forma estratégica, sobretudo no setor econômico industrial e em sua recuperação esperada para os próximos anos. Para isso, é necessário que ocorra investimentos em ferramentas de acompanhamento (como as usadas neste estudo) e que os inventários produzidos pelos órgãos estaduais sejam utilizados de maneira criteriosa para o fomento de novas políticas públicas que incentivem a substituição e a incorporação de infraestrutura necessária para o estado. Ademais, o mercado de gás natural passa por um momento promissor, mas ainda em princípio, no qual é estimulado a consolidação do livre mercado e a ampla concorrência perante à esfera federal e que, certamente, trará reflexos à oferta e consumo estadual.

Apenas com o auxílio de todas as esferas da sociedade – poder público, indústrias, sociedade civil e instituições de pesquisa – e contínuo monitoramento será possível alcançar a diminuição das emissões de combustíveis fósseis para que os impactos causados pelas atividades humanas sejam, ao menos, reduzidos. Também vale lembrar os outros desafios da transição, como a segurança energética – quer seja em aspectos de oferta do recurso energético ou acessibilidade econômica - que necessita ser avaliada a fim de que esse processo ocorra de forma justa e limpa.

REFERÊNCIAS

- ABEGÁS. **O combustível**. 2019. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/o-combustivel>. Acesso em 10 mar. 2021.
- ABRAHÃO, Eliane Morelli. Cozinha modelo: o impacto do gás e da eletricidade na casa paulistana (1870-1930). **Revista Brasileira de História**, v. 29, n. 58, p. 505-509, 2009.
- ADVFN. **PIB Brasil 2018**. [s.d.]. Disponível em: <https://br.advfn.com/indicadores/pib/brasil/2018>. Acesso em 05 ago. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico 2018**. 29 jun. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2018>. Acesso em 05 ago. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário Estatístico 2019**. 27 jun. 2019. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019>. Acesso em 05 ago. 2021.
- ALESP. Assembleia Legislativa do estado de São Paulo. Lei nº 13.789, de 09 de novembro de 2009. Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC. **Diário da Assembleia**. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13798-09.11.2009.html>. Acesso em 05 ago. 2021.
- ANDRADE, José Célio Silveira; COSTA, Paulo. Mudança climática, Protocolo de Kyoto e mercado de créditos de carbono: desafios à governança ambiental global. **Organizações & Sociedade**, v. 15, n. 45, p. 29-45, 2008.
- ANDRES, R. J. *et al.* Carbon dioxide emissions from fossil-fuel use, 1751–1950. **Tellus B**, v. 51, n. 4, p. 759-765, 1999.
- ANG, Beng W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. **Energy policy**, v. 33, n. 7, p. 867-871, 2005.
- ANG, Beng Wah; CHOONG, Wei Lim; NG, Tsan Sheng. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 42, p. 1077-1093, 2015.
- BARBOSA, Alessandra Andrade França; FERRAZ, Luciana Martin; ARIZA, Marília Bueno de Araújo; SILVA, Paula Souza Da; MATTOS, Renato De. O gás como energético no Estado de São Paulo. **Museu da Energia**, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.museudaenergia.org.br/media/63144/08.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.
- BASTOS, Gabriel; BASTOS, Ildeson. **BACIA DE CAMPOS: Sumário Geológico e Setores em Oferta**. ANP, 2017. Disponível em: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round14/Mapas/sumarios/Sumario_Geologico_R14_Campos.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

BERTASSOLI JR, Dailson *et al.* How green can Amazon hydropower be? Net carbon emission from the largest hydropower plant in Amazonia. **Science Advances**, v. 7, n. 26, 2021.

BNDES. **Gás para o Desenvolvimento: Perspectivas de oferta e demanda no mercado de gás natural do Brasil.** BNDES, 2020.

BP. **BP Statistical Review of World Energy Statistical Review of World.** 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Decreto Legislativo nº 144, de 2002. Aprova o texto do Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 14 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, **Diário Oficial da União**, 21 jun. 2002. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/2002/decretolegislativo-144-20-junho-2002-458772-protocolo-1-pl.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto de 7 de julho de 1999. Cria a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, com a finalidade de articular as ações de governo nessa área. Brasília, **Diário Oficial da União**, 08 jul 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/Anterior a 2000/Dnn07-07-99-2.htm. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto de 28 de agosto de 2000. Dispõe sobre o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas e dá outras providências. Brasília, **Diário Oficial da União**, 29 ago. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/2000/Dnn28-8.2000.htm. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007. Institui o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima - CIM, orienta a elaboração do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, e dá outras providências. Brasília, **Diário Oficial da União**, 22 nov. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6263.htm. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, **Diário Oficial da União**, 30 dez. 2009a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009. Cria o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, altera os arts. 6º e 50 da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, e dá outras providências. Brasília, **Diário Oficial da União**, 10 dez. 2009b. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a exploração e a produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos, sob o regime de partilha de produção, em áreas

do pré-sal e em áreas estratégicas; cria o Fundo Social - FS e dispõe sobre sua estrutura e fontes de recursos; altera dispositivos da Lei no 9.478, de 6 de agosto de 1997; e dá outras providências. Brasília, **Diário Oficial da União**, 23 dez. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12351.htm. Acesso em 05 ago. 2021.

BRASIL. Intended Nationally Determined Contribution towards achieving the objective of the UNFCCC. [S. l.], v. 9, 2015. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

BREUER, Anita; JANETSCHEK, Hannah; MALERBA, Daniele. Translating sustainable development goal (SDG) interdependencies into policy advice. **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 2092, 2019.

BRINI, Riadh. Renewable and non-renewable electricity consumption, economic growth and climate change: Evidence from a panel of selected African countries. **Energy**, v. 223, p. 120064, 2021

CADE. **Termo de compromisso de cessação de prática**. Brasília, 2019a. Disponível em: https://sei.cade.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?DZ2uWeaYicbuRZEFhBt-n3BfPLlu9u7akQAh8mpB9yOfbx5eD8vU7hfNPDc1HQ8Mo2wUUI_pMBwmHa9QywbQV DVJniUCKbu0aQsg2fy2ggM6fjABY7XMTQWI3Q5i7QbJ. Acesso em 05 ago. 2021.

CADE. **Cade e Petrobras celebram acordo para venda de ativos no mercado de gás natural**. 2019b. Disponível em: <http://antigo.cade.gov.br/noticias/cade-e-petrobras-celebram-acordo-para-venda-de-ativos-no-mercado-de-gas-natural>. Acesso em 05 ago. 2021.

CAO, Xia. Climate change and energy development: implications for developing countries. **Resources policy**, v. 29, n. 1-2, p. 61-67, 2003.

CETESB. **Quantificação e Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. São Paulo, abr. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/04/Nota-Tecnica-01-Quantificacao-e-Relato-de-Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

CHANG, Hung Kiang; ASSINE, Mario Luis; CORRÊA, Fernando Santos; TINEN, Julio Setsuo; VIDAL, Alexandre Campana; KOIKE, Luzia. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2 suppl, p. 29-46, 2008.

CHEN, Wei-Ming; KIM, Hana. Circular economy and energy transition: A nexus focusing on the non-energy use of fuels. **Energy & Environment**, v. 30, n. 4, p. 586-600, 2019.

CIM. Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC. Brasília, 2008. <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/plano-nacional-sobre-mudanca-do-clima-brasil-pnmc.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

CNO RIO +20. Rio+20: Como chegamos até aqui. **Conferência das Nações Unidas sobre desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], p. 16, 2012. Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/>.

COMGAS. **Cenário de Oportunidades**. Comgás: São Paulo, 2014. Disponível em: https://mz-filemanager.s3.amazonaws.com/14abe1c8-5911-4e94-a991-82f500120a89/central-de-downloadsrelatorios-anuais/3bc6d60c453a5d5f9635d5509543049b727a23c7de1ad51c20b72ced41174748/relatorio_anual_2014.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

COMGAS. **Relatório de sustentabilidade**. 2017. Disponível em: https://mz-filemanager.s3.amazonaws.com/14abe1c8-5911-4e94-a991-82f500120a89/relatorios-anuais/b87f8bb00115116f44f6c581a6f6c4f9ade900f8de2c65a38a287eb00a5a8b42/relatorio_de_sustentabilidade_2017.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

COMPASS. **Relatório de sustentabilidade**. São Paulo. 2020. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/17eafccb-2e4b-40d4-8da2-1ba38e6d4676/b3df80c5-74f8-4c28-965a-2c3520481b42?origin=1>. Acesso em 05 ago. 2021.

CONAB. **Série histórica das safras**. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em 05 ago. 2021.

CONNOR, Peter; FITCH-ROY, Oscar. The socio-economic challenges of smart grids. In: **Pathways to a Smarter Power System**. Academic Press, 2019. p. 397-413.

CORRÊA, Antonio Cláudio de França. A Extração do Petróleo da camada pré-Sal brasileira: desafios e oportunidades. **Revista Advir**, [S. l.], p. 21–27, 2013. Disponível em: <https://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/conteudo/comunicacao/conteudo-tecnico/advir2013%20desafios%20e%20oportunidades%20extracao%20pre%20sal.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

COSTAS, Ruth. Como se chegou à pior recessão desde os anos 90? **BBC Brasil**, São Paulo, 01 dez. 2015. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151201_pib_terceirotri2015_ru. Acesso em 05 ago. 2021.

CRISTINA, Maria; SOUZA, Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris : uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 42, p. 52–80, 2017.

D'AGOSTO, Márcio de Almeida; RIBEIRO, Suzana Kahn; DE SOUZA, Cristiane Duarte Ribeiro. Opportunity to reduce greenhouse gas by the use of alternative fuels and technologies in urban public transport in Brazil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 177–183, 2013.

DAVID I, Stern; MICHAEL, Common S.; EDWARD, Barbier B. Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development. **World Development**, [S. l.], v. 24, n. 7, p. 1151–1160, 1996.

DELGADO, Fernanda; GAUTO, Marcelo. Too much gas in Brazil. **Geopolitics of energy**, [S. l.], v. 42, n. 8, 2020.

DGA - DIREÇÃO GERAL DO AMBIENTE. Proposta para um sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável. Amadora, Portugal, 2000.

DI SILVESTRE, Maria Luisa; FAVUZZA, Salvatore; RIVA SANSEVERINO, Eleonora; ZIZZO, Gaetano. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 93, p. 483–498, 2018.

DIETZ, Thomas; ROSA, Eugene A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. **Human Ecology Review**, v. 1, n. 2, p. 277-300, 1994.

DINIZ, Eliezer Martins. Os resultados da Rio+ 10. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 15, p. 31-35, 2002.

DOS SANTOS, Edmilson Moutinho; FAGÁ, Murilo Tadeu Werneck; BARUFI, Clara Bonomi; POULALLION, Paul Louis. Gás natural: A construção de uma nova civilização. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 21, n. 59, p. 67–90, 2007.

ENERDATA. **Total energy consumption**. 2018. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional - Séries Históricas Completas**. 2019a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em 05 ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte - PIG. Rio de Janeiro, 2019b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-415/PIG%20-%20Plano%20Indicativo%20de%20Gasodutos%20de%20Transporte_EPE2019.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte - PIG. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-531/EPE,%202020%20-%20Plano%20Indicativo%20de%20Gasodutos%20de%20Transporte%202020.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Indicativo de Terminais de GNL**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-620/PITER%202021.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

ESCAP. **Energy Security and Sustainable Development in Asia and the Pacific**. Bangkok, 2008. Disponível em: <https://www.unescap.org/sites/default/files/energy-security-ap.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

FAFÁ, Larissa. Sergipe vai produzir 20 milhões de m³/dia de gás natural, diz governador. **Epbr**, [S. l.], 23 ago. 2019. Disponível em: <https://epbr.com.br/sergipe-vai-produzir-20-milhoes-de>

m%C2%B3-dia-de-gas-natural-diz-governador/. Acesso em 05 ago. 2021.

FERNANDEZ, Rodrigo de Oliveira; SANTOS, Alhan Jose Dos. **BACIA DE SANTOS: Sumário Geológico e Setores em Oferta**. ANP, 2017. Disponível em: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round14/Mapas/sumarios/Sumario_Geologico_R14_Santos.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

FERREIRA, Helder; CASSIOLATO, Martha; GONZALEZ, Roberto. Uma experiência de desenvolvimento metodológico para avaliação de programas: o modelo lógico do programa segundo tempo. **Texto para Discussão**, Brasília, 2009. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1369.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

FGV. Aplicação de Indicadores de Intensidade em Instrumentos Econômicos. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://mediadrawer.gvces.com.br/publicacoes/original/gvces-relatorio-indicadores-de-intensidade-26-08-2015.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

FOUQUET, Roger. Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation. **Energy Research & Social Science**, v. 22, p. 7-12, 2016.

FOUQUET, Roger. The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6586-6596, 2010.

FOUQUET, Roger; PEARSON, Peter J. G. Past and prospective energy transitions: Insights from history. **Energy Policy**, [S. l.], v. 50, p. 1–7, 2012.

FUNATSU, Beatriz M. et al. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. **Global Environmental Change**, v. 57, p. 101923, 2019.

GALLO, Alexandre de Barros. **Avaliação da inserção do gás natural no setor industrial brasileiro: uma análise de indicadores de impactos energético, ambiental e econômico**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/?q=pt-br/produção-técnico-científica/teses-2018-ppge-e-procam>.

GALLOPÍN, Gilberto C. Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A systems approach. **Environmental Modeling & Assessment**, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 101–117, 1996.

GALVÃO, Jucilene; BERMANN, Célio. Crise hídrica e energia: Conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 29, n. 84, p. 43–68, 2015. DOI:

GASBRASILIANO. **Relatório Integrado da Administração**. 2019. Disponível em: <https://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/automotivo/arquivo/relatorio-integrado-da-administracao2019.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

GILLESSEN, B.; HEINRICHS, H.; HAKE, J. F.; ALLELEIN, H. J. Natural gas as a bridge to sustainability: Infrastructure expansion regarding energy security and system transition. **Applied energy**, v. 251, p. 113377, 2019.

GODDE, C. M.; CROZ, D. Mason-d; MAYBERRY, D. E.; THORNTON, P. K.; HERRERO, M. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. **Global food security**, v. 28, 2021.

GONZÁLEZ-MAHECHA, Rosa Esperanza; LUCENA, André F. P.; GARAFFA, Rafael; MIRANDA, Raul F. C.; CHÁVEZ-RODRIGUEZ, Mauro; CRUZ, Talita; BEZERRA, Paula; RATHMANN, Régis. Greenhouse gas mitigation potential and abatement costs in the Brazilian residential sector. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 184, p. 19–33, 2019.

GONZÁLEZ, Carlos Germán Meza. **Transição energética global e desenvolvimento sustentável: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo**. 2018. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

GOSMANN, Hugo Leonardo. **INTEGRAÇÃO GASÍFERA NA AMÉRICA DO SUL: Estudo dos casos dos gasodutos Bolívia-Brasil (GASBOL) e Lateral-Cuiabá no contexto das relações bilaterais Bolívia-Brasil**. 2011. Monografia (Especialização em Relações Internacionais) - Instituto de Relações Internacionais, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

GRUBLER, Arnulf. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. **Energy Policy**, [S. l.], v. 50, p. 8–16, 2012.

GRUBLER, Arnulf; WILSON, Charlie; NEMET, Gregory. Apples, oranges, and consistent comparisons of the temporal dynamics of energy transitions. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 22, p. 18–25, 2016.

GUNNINGHAM, Neil. Managing the energy trilemma: The case of Indonesia. **Energy Policy**, [S. l.], v. 54, p. 184–193, 2013.

GÜRSAN, C.; DE GOOYERT, V. The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 138, 2021.

HENRIQUES, Mauricio F.; DANTAS, Fabrício; SCHAEFFER, Roberto. Potential for reduction of CO2 emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector. **Energy Policy**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. 1946–1961, 2010.

HENRIQUES, Sofia Teives; BOROWIECKI, Karol J. The drivers of long-run CO2 emissions in Europe, North America and Japan since 1800. **Energy Policy**, v. 101, p. 537-549, 2017.

HIRSH, Richard F.; JONES, Christopher F. History's contributions to energy research and policy. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 1, p. 106–111, 2014.

HOLDREN, John P. A Brief History of “IPAT”. **The Journal of Population and Sustainability**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 66–74, 2018.

IBGE. **Logística de Energia**: 2015. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv97260.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

IBGE. **Estimativas da População**. 2020a. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em 05 ago. 2021.

IBGE. **Tabela 5938 - Produto interno bruto a preços correntes, impostos, líquidos de subsídios, sobre produtos a preços correntes e valor adicionado bruto a preços correntes total e por atividade econômica, e respectivas participações - Referência 2010**. 2020b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5938#notas-tabela>. Acesso em 05 ago. 2021.

IBGE. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2020**. 2020c. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101747.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

IEA. **Energy security and climate policy: Assessing interactions**. IEA, [S.l.], 28 mar. 2007. Disponível em: <https://www.iea.org/news/energy-security-and-climate-policy-assessing-interactions>. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change: The IPCC Response Strategies**. Gevena: IPCC, 1991. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_III_full_report.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **IPCC Second Assessment: Climate Change 1995**. Gevena: IPCC, 1995. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-en-1.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change 2001: Synthesis Report**. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: IPCC, 2001. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/front-1.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Gevena: IPCC, 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Gevena: IPCC, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. 2019a. Technical Summary *In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Geneva: IPCC, 2019a. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/04_SROCC_TS_FINAL.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Gevena: IPCC, 2019b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf.

Acesso em 05 ago. 2021.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C**. Geneva: IPCC, 2019c. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

KASA, Sjur. Industrial Revolutions and Environmental Problems. *In: ØSTRENG, Willy (org.). Confluence: Interdisciplinary Communications 2007/2008*. Oslo: CAS, 2009.

KAYA, Y.; YOKOBORI, K. **Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability**. Tokyo: United Nations University Press, 1997.

KERN, Florian; SMITH, Adrian. Restructuring energy systems for sustainability? Energy transition policy in the Netherlands. **Energy Policy**, [S. l.], v. 36, n. 11, p. 4093–4103, 2008.

KRUYT, Bert; VAN VUUREN, D. P.; DE VRIES, H. J. M.; GROENENBERG, H. Indicators for energy security. **Energy Policy**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 2166–2181, 2009.

KUZNETS, Simon. Economic Growth and Income Inequality. **The American Economic Review**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 1–28, 1955.

LEAL, Fernando I.; REGO, Erik E.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, Celma. Natural gas regulation and policy in Brazil: Prospects for the market expansion and energy integration in Mercosul. **Energy Policy**, [S. l.], v. 128, n. February, p. 817–829, 2019. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.01.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.030>.

LEE, April; ZINAMAN, Owen; LOGAN, Jeffrey. **Opportunities for Synergy Between Natural Gas and Renewable Energy in the Electric Power and Transportation Sectors** Technical Report NREL. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2012.

LIMA, Fátima; NUNES, Manuel Lopes; CUNHA, Jorge; LUCENA, André F. P. A cross-country assessment of energy-related CO₂ emissions: An extended Kaya Index Decomposition Approach. **Energy**, [S. l.], v. 115, p. 1361–1374, 2016.

MA, Minda; CAI, Wei; CAI, Weiguang. Carbon abatement in China's commercial building sector: A bottom-up measurement model based on Kaya-LMDI methods. **Energy**, [S. l.], v. 165, p. 350–368, 2018.

MADEIRA, João Lyra; SIMÕES, Celso Cardoso da Silva. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as Unidades da Federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. **Revista Brasileira de Estatística**, [S. l.], v. 33, n. 129, p. 3–11, 1972.

MARKOVSKA, Natasa; DUIĆ, Neven; MATHIESEN, Brian Vad; GUZOVIĆ, Zvonimir; PIACENTINO, Antonio; SCHLÖR, Holger; LUND, Henrik. Addressing the main challenges of energy security in the twenty-first century – Contributions of the conferences on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. **Energy**, [S. l.], v. 115, p. 1504–1512, 2016.

MARZALL, Kátia; ALMEIDA, Jalcione. Indicadores de sustentabilidade para

agoecossistemas: Estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 41–59, 2000.

MEDEIROS, Hércules Souza De. **Inserção do Gás Natural na Economia Brasileira e seus Efeitos nas Emissões de CO₂**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MILLER, Clark A.; ILES, Alastair; JONES, Christopher F. The Social Dimensions of Energy Transitions. **Science as Culture**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 135–148, 2013.

MILLER, Clark a.; RICHTER, Jennifer; O'LEARY, Jason. Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 6, p. 29–40, 2015.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. 21 dez. 2018. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural**. 2007-2019. 18 out. 2019a. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural>. Acesso em 05 ago. 2021.

MME. **Novo mercado de gás**. 23 out. 2019b. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cmgn/novo-mercado-de-gas>. Acesso em 05 ago 2021.

MOCARQUER, Sebastian; BARROSO, Luiz; RUDNICK, Hugh; BEZERRA, Bernardo; PEREIRA, Mario. Balance of power. **IEEE Power and Energy Magazine**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 26–35, 2009.

MODI, Vijay; MCDADE, Susan; LALLEMENT, Dominique; SAGHIR, Jamal. Energy Services for the Millennium Development Goals. **Program Manager**, [S. l.], 2005.

MORAES, Suzy Elaine Gasparini De. **O mercado de gás natural no Estado de São Paulo: histórico, cenário, perspectivas e identificação de barreiras**. 2003. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MOUETTE, Dominique; MACHADO, Pedro Gerber; FRAGA, Denis; PEYERL, Drielli; BORGES, Raquel Rocha; BRITO, Thiago Luis Felipe; SHIMOMAEBARA, Lena Ayano; DOS SANTOS, Edmilson Moutinho. Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 668, p. 1104–1116, 2019.

MOURA, Maria Teresa Voltarelli Barbosa; MARTINS, Gilberto. Geração Distribuída a gás natural: potencial dos segmentos comercial e residencial na área de concessão da Comgás. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO 2020, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.].

NAJM, Sarah; MATSUMOTO, Ken'ichi. Does renewable energy substitute LNG international trade in the energy transition? **Energy Economics**, [S. l.], v. 92, 2020.

NATURGY. **História Rio**. 2001. Disponível em: <https://www.naturgy.com.br/br/conhecamos/a+companhia/nossa+companhia/historia/1297092019569/historia+rio.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

NATURGY. **Informe anual 2020**. Rio de Janeiro: Naturgy, 2020. Disponível em: https://www.naturgy.com.br/servlet/ficheros/1297164598153/NAT_CEG_Informe_Anual_2020-completo2.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

NOVAES, Washington. Eco-92: avanços e interrogações. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 6, n. 15, p. 79–93, 1992.

NUNES, Luciana; BOTELHO, Felipe; COSTA, Felipe; WAEGER, Luiza; DE ALMEIDA, Edmar; COLOMER, Marcelo; VITTO, William Adrian Clavijo. **Gás do Pré-Sal: Oportunidades, desafios e perspectivas**. 2017. Disponível em: https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2017/02/2017_TD_Gas_do_Pre_Sal_Oportunidades_Desafios_e_Perspectivas.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

O'CONNOR, Peter A. **Energy Transitions**. The Pardee Papers, v. 12, 2010. Disponível em: <https://www.bu.edu/pardee/files/2010/11/12-PP-Nov2010.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

O'MAHONY, Tadhg. Decomposition of Ireland's carbon emissions from 1990 to 2010: An extended Kaya identity. **Energy Policy**, [S. l.], v. 59, p. 573–581, 2013.

OLIVEIRA, Leandro Dias De. A Geopolítica do Desenvolvimento Sustentável na CNUMAD - 1992 (ECO-92): entre o Global e o Local, a Tensão e a Celebração. **Revista de Geopolítica**, Ponta Grossa, v. 2, n. 1, p. 43–56, 2011.

ONU. **Agenda 21 - ECO-92 ou RIO-92**: Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. 1992. Disponível em: <http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Table/Agenda-21-ECO-92-ou-RIO-92/>. Acesso em 05 ago. 2021.

ONU. **#Envision2030**: 17 goals to transform the world for persons with disabilities Title. 2015. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/disabilities/envision2030.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

ORTEGA-RUIZ, G.; MENA-NIETO, A.; GARCÍA-RAMOS, J. E. Is India on the right pathway to reduce CO2 emissions? Decomposing an enlarged Kaya identity using the LMDI method for the period 1990–2016. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 737, 2020.

PANAYOTOU, Theodore. **Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development**. [s.l: s.n.]. v. 4

PAO, Hsiao Tien; TSAI, Chung Ming. CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. **Energy Policy**, [S. l.], v. 38, n. 12, p. 7850–7860, 2010.

PAPADIS, Elisa; TSATSARONIS, George. Challenges in the decarbonization of the energy sector. **Energy**, [S. l.], v. 205, 2020.

PEARSON, Peter J. G.; FOXON, Timothy J. A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations. **Energy Policy**, [S. l.], v. 50, p. 117–127, 2012.

PERDIZ, Lauro Daniel B.; SOUSA, Eduardo F. De; FLOR, Ricardo A. M. Lei do Gás, contradições com a Constituição, incentivos aos investimentos e aspectos tributários. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2008 2008, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, p. 1–9, 2008. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21219465>. Acesso em 05 ago. 2021.

PEYERL, Drielli. **The Oil of Brazil: Exploration, Technical Capacity, and Geosciences Teaching (1864-1968)**. Switzerland: Springer Nature, 2019.

PRADHAN, Prajal; COSTA, Luís; RYBSKI, Diego; LUCHT, Wolfgang; KROPP, Jürgen P. A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions. **Earth's Future**, [S. l.], v. 5, n. 11, p. 1169–1179, 2017.

QUARTON, Christopher J.; SAMSATLI, Sheila. The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation. **Applied Energy**, [S. l.], v. 257, 2020.

QUÉRÉ, Corinne et al. Global Carbon Budget 2018. **Earth System Science Data**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 2141–2194, 2018.

RELVA, Stefania Gomes; SILVA, Vinícius Oliveira Da; GIMENES, André Luiz Veiga; UDAETA, Miguel Edgar Morales; ASHWORTH, Peta; PEYERL, Drielli. Enhancing developing countries' transition to a low-carbon electricity sector. [S. l.], v. 220, 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **CO2 and Greenhouse Gas Emissions**. 2017. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 13 fev. 2020.

ROMITELLI, M. Silvia. Emery Analysis of the New Bolivia-Brazil Gas Pipeline (Gasbol). In: BROWN, Mark T. (org.). Gainesville: The Center for Environmental Policy Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, 2000.

SAALTINK, Maarten W.; VILARRASA, Victor; DE GASPARI, Francesca; SILVA, Orlando; CARRERA, Jesús; RÖTTING, Tobias S. A method for incorporating equilibrium chemical reactions into multiphase flow models for CO2 storage. **Advances in Water Resources**, [S. l.], v. 62, p. 431–441, 2013.

SANTOS, Edmilson Moutinho Dos; PEYERL, Drielli; NETO, Anna Luisa Abreu. **Oportunidades e desafios do gás natural e do gás natural liquefeito no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2020.

SANTOS, João Tadeu Alves Dos; BARBOSA, Mariana Oliveira; ROMIO, Renato; BERMANN, Célio; PARENTE, Virginia. Geração Distribuída com Pequenas e Microturbinas

a Gás Natural: Tecnologias e Mecanismos para sua Inserção no Brasil. *In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO 2020, Anais [...]*. [s.l.: s.n.].

SANTOS, Filipe Duarte. Os desafios ambientais criados pela Grande Aceleração do Pós-Guerra. **Nação e Defesa**, [S. l.], v. 122, n. s, p. 61–78, 2009.

SCHMIDT-TRAUB, Guido; KROLL, Christian; TEKSOZ, Katerina; DURAND-DELACRE, David; SACHS, Jeffrey D. National baselines for the Sustainable Development Goals assessed in the SDG Index and Dashboards. **Nature Geoscience**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 547–555, 2017.

SCHÜTTE, Artur Friedrich Dufrayer. **O Segmento do Biogás em Foco: Discussão das Políticas Públicas do Brasil e do Mundo**. 2017. Universidade de Brasília, [S. l.], 2017.

SEADE - FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS **Indicadores do Estado de São Paulo**. 2020a. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/>. Acesso em 05 ago. 2021.

SEADE. **Valor Adicionado, segundo os Setores e subsectores de atividade econômica**. 2018. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/produtos2/pib-anual/>. Acesso em 05 ago. 2021.

SEADE. Divisão Regional do Estado de São Paulo: Evolução histórica 1967 - 2018. 2019. Disponível em: http://www.imp.seade.gov.br/home/wp-content/uploads/2019/02/historico_legislacao_regionalizacoes_SP.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo**. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/416-anuario-energetico-2010.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo**. São Paulo, 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/496-anuario-energetico-2011.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo**. São Paulo, 2012a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/532-anuario-energetico-2012.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo**. São Paulo, 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/619-anuario-energetico-2013.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo**. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado**

de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202015.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA. **Plano Paulista de Energia.** São Paulo, 2012b. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/2012/05/09/ppe-2020-plano-paulista-de-energia/>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2019a. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2007. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/39-anuario-energetico-2007.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2008. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/40-anuario-energetico-2008.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA. **Anuário estatístico de energéticos por município no estado de São Paulo.** São Paulo, 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2015/08/108-anuario-energetico-2009.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

SEEG. **Perfil de emissões do estado de São Paulo em 2019.** 2021. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territories/sao-paulo/card?year=2019>. Acesso em 05 ago. 2021.

SEQUINEL, Maria Carmen Mattana. Cúpula mundial sobre desenvolvimento sustentável - Joanesburgo : entre o sonho e o possível. **Análise Conjuntural**, [S. l.], v. 24, n. 11–12, p. 12–15, 2002.

SETO, Karen C.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, Roberto; FRAGKIAS, Michail. The new geography of contemporary urbanization and the environment. **Annual review of environment and resources**, v. 35, p. 167-194, 2010.

SHIELDS, D. J.; ŠOLAR, S. V.; MARTIN, W. E. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 2, n. 1–2, p. 149–160, 2002.

SICHE, Raúl; AGOSTINHO, Feni; ORTEGA, Enrique; ROMEIRO, Ademar. Índices Versus Indicadores: Precisoões Conceituais Na Discussão Da Sustentabilidade De Países. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 137–148, 2007.

SIGEL. **Mapa Empreendimentos Geração de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=45374c61bd3e40e3a484878003fae937>. Acesso em 05 ago 2021.

SIMA-SP. **Distribuição de Gás Natural - Estado de São Paulo**. 2020. Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalicev2/intranet/PetroGas/index.html>. Acesso em 05 ago. 2021.

SIMA-SP. **Balço Energético do Estado de São Paulo Ano-Base: 2018**. 2019a. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2019/09/corr_beesp2019ab2018bx.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

SIMA-SP. **Resumo Executivo - Dados de produção e consumo de petróleo, derivados e gás**. São Paulo. 2019b.

SIMA-SP. **Municípios atendidos - Gás natural 2018**. 2018. Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/Portalicev2/intranet/PetroGas/mapagas.jpg>. Acesso em 05 ago 2021.

SMIL, Vaclav. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospect**. Santa Barbara: ABC-CLIO, 2010.

SMIL, Vaclav. Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 22, p. 194–197, 2016.

SMIL, Vaclav. The long slow rise of solar and wind. **Scientific American**, [S. l.], v. 310, n. 1, p. 52–57, 2014.

SOUTAR, Iain. **Emergence and control in UK energy democratisation**. Energy Policy Group, 2019. Disponível em: https://geography.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/schoolofgeography/images/researchgroups/epg/190226_InSearchofGoodEnergyPolicyFINAL.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

SOVACOOOL, Benjamin K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of

energy transitions. **Energy Research and Social Science**, [S. l.], v. 13, p. 202–215, 2016.

STEFFEN, Will et al. **Global Change and the Earth System - A Planet Under Pressure**. 1. ed. [s.l.] : Springer Berlin Heidelberg New York, 2004.

STEFFEN, Will; BROADGATE, Wendy; DEUTSCH, Lisa; GAFFNEY, Owen; LUDWIG, Cornelia. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. **Anthropocene Review**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 81–98, 2015.

STERN, David I. Environmental Kuznets Curve. [S. l.], v. 2, p. 517–525, 2004.

STRAPASSON, Alexandre Betinardi. A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético. 2004. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-25092005-155030/publico/dissertacao_strapasson.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

SUN, J. W. Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. **Energy Economics**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 85–100, 1998.

TAN, Xianchun; ZHU, Kaiwei; MENG, Xiaoyan; GU, Baihe; WANG, Yi; MENG, Fanxin; LIU, Gengyuan; TU, Tangqi; LI, Hui. Research on the status and priority needs of developing countries to address climate change. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 289, 2021.

TAVAKOLI, Azadeh. A journey among top ten emitter country, decomposition of “Kaya Identity”. **Sustainable Cities and Society**, [S. l.], v. 38, n. September 2017, p. 254–264, 2018.

TSAFOS, Nikos. How Will Natural Gas Fare in the Energy Transition? **CSIS**, [S. l.], n. January, p. 1–10, 2020. Disponível em: http://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/200114_Tsafos_How_Will_Natural_Gas_Fare.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

UN - United Nations. **Report of the United Nations Conference on the Human Environment**. Stockholm, 5-16 June 1972. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/523249>. Acesso em 05 ago. 2021.

UNFCCC. UNFCCC Decision 1/CP.21: Paris Agreement. [S. l.], n. January, p. 32, 2015. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

VAHL, Fabrício Peter; FILHO, Nelson Casarotto. Energy transition and path creation for natural gas in the Brazilian electricity mix. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 86, p. 221–229, 2015.

VAN FOREEST, Floris. **The role of natural Gas in the Dutch energy transition: towards low-carbon electricity supply**. Oxford Institute for Energy Studies, 2010.

VIOLA, Eduardo. O regime internacional de mudança climática e o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, [S. l.], v. 17, n. 50, p. 25–46, 2002.

WAGGONER, P. E.; AUSUBEL, J. H. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 99, n. 12, p. 7860–7865, 2002.

WEC - World Energy Council. **Assessment of Energy Policy and Practices**. 2008. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/assessmentdecember_final_version.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **Policies for the future**: 2011 Assessment of country energy and climate policy. 2011. Disponível em: http://www.worldenergy.org/documents/wec_2011_assessment_of_energy_and_climate_policies.pdf <http://www.worldenergy.org/publications/3800.asp>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **Pursuing sustainability**: 2010 Assessment of country energy and climate policy. 2010. Disponível em: http://www.worldenergy.org/documents/assessment_2010_full_report_1.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy and Climate Policy**: 2009 Assessment. 2009. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_wec_2009_assessment_of_energy_and_climate_policies_2009_WEC.pdf. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma: Time to get real – the case for sustainable energy policy**. 2012. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2012-time-to-get-real-a-the-case-for-sustainable-energy-policy>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma: Time to get real – the case for sustainable energy investment**. 2013. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/2013-Time-to-get-real-the-case-for-sustainable-energy-investment.pdf>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma: Time to get real – the myths and realities of financing energy systems**. 2014. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2014-time-to-get-real-the-myths-and-realities-of-financing-energy-systems>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma 2016 - Defining Measures To Accelerate the Energy Transition** **World Energy Council Report**. 2016a. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-trilemma-2016-defining-measures-to-accelerate-the-energy-transition/>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma 2017: Changing Dynamics – Using Distributed Energy Resources to Meet the Trilemma Challenge**. 2017. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2017-changing-dynamics-a-using-distributed-energy-resources-to-meet-the-trilemma-challenge#:~:text=The%20World%20Energy%20Trilemma%202017,insights%20of%20the%20traditional%20and>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma Index 2017 - Monitoring the Sustainability of National Energy Systems**. 2017b. Disponível em:

<https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2017-monitoring-the-sustainability-of-national-energy-systems>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma Index 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2018>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **World Energy Trilemma Index 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2019>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **2015 Energy Trilemma Index - Benchmarking the sustainability of national energy systems**. 2015. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/2015-energy-trilemma-index-benchmarking-the-sustainability-of-national-energy-systems>. Acesso em 05 ago. 2021.

WEC. **2016 World Energy Trilemma - Priority actions on climate change and how to balance the trilemma**. 2016b. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/2016-energy-trilemma-index-benchmarking-the-sustainability-of-national-energy-systems>. Acesso em 05 ago. 2021.

WIGLEY, T. M. L. The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 25, n. 13, p. 2285–2288, 1998.

WILSON, Charlie. Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies. **Energy Policy**, [S. l.], v. 50, p. 81–94, 2012.

WINZER, Christian. Conceptualizing energy security. **Energy Policy**, [S. l.], v. 46, p. 36–48, 2012.

YORK, Richard; ROSA, Eugene A.; DIETZ, Thomas. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 351–365, 2003.

ZERRAHN, Alexander; SCHILL, Wolf Peter. Long-run power storage requirements for high shares of renewables: review and a new model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 79, n. June, p. 1518–1534, 2017.

ZHANG, F. Q.; ANG, B. W. Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environment indicators. **Energy Economics**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 179–190, 2001.

APÊNDICE A – [Consumo de derivados (10³ toe)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,33	0,34	0,40	0,39	0,48	0,49	0,53	0,55	0,52	0,47	0,49	0,51	0,47
Barretos	0,21	0,23	0,22	0,23	0,31	0,35	0,36	0,34	0,34	0,33	0,35	0,37	0,36
Bauru	0,47	0,47	0,50	0,49	0,55	0,58	0,61	0,61	0,60	0,54	0,56	0,54	0,52
Campinas	2,94	3,16	3,14	3,20	3,57	4,06	4,31	4,35	4,22	4,25	4,10	4,18	3,95
Central	0,48	0,52	0,49	0,50	0,57	0,59	0,62	0,63	0,56	0,52	0,49	0,49	0,49
Franca	0,26	0,25	0,27	0,25	0,30	0,31	0,34	0,38	0,39	0,38	0,39	0,39	0,39
Itapeva	0,20	0,21	0,21	0,20	0,22	0,28	0,31	0,41	0,39	0,40	0,38	0,35	0,32
Marília	0,45	0,48	0,50	0,50	0,58	0,65	0,71	0,74	0,74	0,68	0,67	0,64	0,60
Metropolitana de São Paulo	6,84	7,30	7,45	7,39	8,34	9,08	9,36	9,50	9,35	9,01	8,99	9,02	8,50
Presidente Prudente	0,32	0,33	0,35	0,35	0,41	0,45	0,47	0,50	0,47	0,45	0,46	0,43	0,40
Registro	0,18	0,20	0,21	0,21	0,22	0,29	0,33	0,36	0,34	0,32	0,31	0,32	0,30
Ribeirão Preto	0,62	0,60	0,63	0,61	0,70	0,73	0,76	0,81	0,81	0,79	0,80	0,80	0,79
Santos	0,52	1,31	1,23	1,32	1,90	1,86	1,97	1,25	1,13	0,94	0,69	0,69	0,66
São José do Rio Preto	0,83	0,94	0,90	0,87	1,02	1,13	1,29	1,32	1,27	1,24	1,22	1,24	1,14
São José dos Campos	0,86	0,96	0,89	0,92	0,98	1,18	1,26	1,30	1,23	1,22	1,27	1,27	1,18
Sorocaba	1,00	1,08	1,11	1,12	1,15	1,52	1,73	1,80	1,61	1,52	1,44	1,35	1,31
Estado de São Paulo													
Total	16,50	18,38	18,52	18,55	21,34	23,55	24,98	24,85	23,99	23,07	22,61	22,59	21,38

APÊNDICE B – [Consumo de eletricidade (10³ toe)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,11	0,14	0,23	0,23	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16
Barretos	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11
Bauru	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25
Campinas	1,77	1,89	1,96	1,93	2,09	2,20	2,24	2,30	2,34	2,25	2,22	2,28	2,35
Central	0,20	0,21	0,22	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,27
Franca	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15
Itapeva	0,08	0,10	0,10	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Marília	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19
Metropolitana de São Paulo	3,92	4,10	4,14	4,12	4,46	4,63	4,74	4,82	4,89	4,60	4,47	4,50	4,52
Presidente Prudente	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14
Registro	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Ribeirão Preto	0,23	0,23	0,26	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32
Santos	0,57	0,57	0,58	0,58	0,61	0,62	0,64	0,66	0,66	0,63	0,53	0,54	0,54
São José do Rio Preto	0,21	0,23	0,24	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,31	0,30	0,31	0,33
São José dos Campos	0,60	0,61	0,63	0,63	0,67	0,69	0,68	0,71	0,71	0,68	0,67	0,71	0,72
Sorocaba	0,99	1,12	1,15	1,12	1,11	1,11	1,24	1,20	1,09	1,06	1,05	1,08	1,14
Estado de São Paulo													
Total	9,34	9,89	10,22	10,15	10,75	11,16	11,48	11,69	11,78	11,23	10,91	11,16	11,36

APÊNDICE C – [Consumo de gás natural (10³ toe)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões Administrativas													
Araçatuba	0,0 2	0,0 2	0,0 1	0,0 2	0,0 2	0,0 2	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 2	0,0 2	0,0 3	0,0 3
Barretos	0,0 0												
Bauru	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 1	0,0 2	0,0 3	0,0 5	0,0 5	0,0 4	0,0 4	0,0 5	0,0 4
Campinas	1,5 0	1,5 7	1,6 1	1,3 6	1,5 6	1,6 5	1,6 2	1,5 4	1,4 8	1,4 5	1,3 5	1,7 1	1,7 8
Central	0,0 9	0,1 1	0,1 3	0,1 3	0,1 5	0,1 7	0,1 7	0,1 5	0,1 6	0,1 3	0,1 3	0,1 5	0,1 5
Franca	0,0 0												
Itapeva	0,0 0												
Marília	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 1	0,0 1	0,0 2	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 2	0,0 2	0,0 2
Metropolitana de São Paulo	1,6 6	1,7 6	1,9 6	1,5 6	1,7 9	1,6 2	1,8 8	2,1 2	2,1 6	2,1 0	1,5 2	2,1 1	2,0 4
Presidente Prudente	0,0 0												
Registro	0,0 0												
Ribeirão Preto	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 1	0,0 0	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 2	0,0 2
Santos	0,2 5	0,2 7	0,2 7	0,1 8	0,1 8	0,2 0	0,2 1	0,2 7	0,2 8	0,2 7	0,1 9	0,2 8	0,4 0
São José do Rio Preto	0,0 0												
São José dos Campos	0,4 5	0,4 9	0,4 9	0,3 9	0,4 8	0,4 8	0,4 8	0,5 1	0,5 1	0,5 0	0,4 9	0,6 2	0,6 4
Sorocaba	0,3 3	0,3 7	0,4 1	0,3 7	0,4 3	0,4 3	0,4 0	0,3 9	0,3 5	0,3 3	0,3 3	0,4 1	0,4 2
Estado de São Paulo													
Total	4,2 9	4,5 9	4,8 8	4,0 2	4,6 3	4,6 0	4,8 5	5,0 9	5,0 3	4,8 7	4,0 8	5,4 0	5,5 4

APÊNDICE D – [Consumo de etanol (10³ toe)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,0 3	0,0 6	0,0 8	0,0 9	0,0 8	0,0 7	0,0 7	0,0 7	0,1 0	0,1 2	0,1 0	0,1 1	0,1 2
Barretos	0,0 2	0,0 4	0,0 5	0,0 5	0,0 5	0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 5	0,0 6	0,0 6	0,0 6	0,0 7
Bauru	0,0 6	0,0 8	0,1 2	0,1 3	0,1 4	0,1 2	0,1 1	0,1 1	0,1 4	0,1 8	0,1 6	0,1 6	0,1 8
Campinas	0,3 5	0,5 1	0,7 2	0,8 2	0,7 9	0,6 0	0,5 1	0,5 2	0,6 9	0,9 4	0,8 5	0,7 2	0,9 7
Central	0,0 5	0,0 8	0,1 1	0,1 4	0,1 4	0,1 3	0,1 0	0,0 9	0,1 2	0,1 6	0,1 5	0,1 4	0,1 7
Franca	0,0 5	0,0 7	0,1 0	0,1 0	0,1 0	0,0 8	0,0 8	0,0 7	0,0 9	0,1 1	0,1 1	0,1 0	0,1 2
Itapeva	0,0 2	0,0 2	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 2	0,0 2	0,0 5	0,0 4	0,0 4	0,0 3	0,0 4
Marília	0,0 5	0,0 7	0,1 0	0,1 1	0,1 0	0,0 9	0,0 8	0,0 9	0,1 1	0,1 4	0,1 3	0,1 3	0,1 5
Metropolitana de São Paulo	0,7 0	1,0 6	1,4 4	1,6 5	1,5 3	1,1 5	1,0 6	1,0 8	1,3 5	1,7 9	1,5 4	1,3 9	1,8 9
Presidente Prudente	0,0 4	0,0 6	0,0 8	0,0 9	0,0 9	0,0 7	0,0 7	0,0 8	0,1 0	0,1 2	0,1 1	0,1 2	0,1 3
Registro	0,0 1	0,0 1	0,0 2	0,0 2	0,0 2	0,0 1	0,0 1	0,0 1	0,0 2	0,0 2	0,0 2	0,0 2	0,0 2
Ribeirão Preto	0,0 9	0,1 2	0,1 6	0,1 8	0,1 8	0,1 4	0,1 3	0,1 3	0,1 5	0,2 0	0,2 0	0,2 1	0,2 4
Santos	0,0 3	0,0 6	0,0 9	0,1 0	0,1 0	0,0 7	0,0 6	0,0 6	0,0 7	0,1 1	0,0 8	0,0 7	0,1 1
São José do Rio Preto	0,1 0	0,1 5	0,2 0	0,2 1	0,2 2	0,1 8	0,1 6	0,1 7	0,2 1	0,2 6	0,2 4	0,2 5	0,2 9
São José dos Campos	0,0 8	0,1 3	0,1 9	0,2 2	0,2 0	0,1 4	0,1 2	0,1 3	0,1 5	0,2 3	0,1 8	0,1 6	0,2 4
Sorocaba	0,1 0	0,1 4	0,2 0	0,2 1	0,2 4	0,1 9	0,1 9	0,1 6	0,2 3	0,3 3	0,2 7	0,2 4	0,3 3
Estado de São Paulo													
Total	1,7 8	2,6 7	3,6 8	4,1 4	4,0 3	3,1 2	2,8 1	2,8 3	3,6 4	4,8 2	4,2 6	3,9 1	5,0 7

APÊNDICE E – [Emissões de CO₂ associadas aos derivados de petróleo (10³ t de CO₂)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	9,40	9,57	11,24	11,17	13,57	13,83	14,92	15,49	14,85	13,36	14,02	14,38	13,26
Barretos	6,09	6,46	6,31	6,44	8,73	9,84	10,34	9,53	9,68	9,35	9,81	10,40	10,21
Bauru	13,25	13,37	14,30	13,89	15,68	16,54	17,16	17,35	16,94	15,28	15,84	15,38	14,68
Campinas	83,50	89,60	89,07	90,79	101,22	115,09	122,15	123,37	119,60	120,56	116,38	118,57	112,17
Central	13,55	14,85	14,00	14,32	16,27	16,87	17,69	17,82	15,96	14,83	13,84	13,80	13,93
Franca	7,32	7,20	7,61	7,18	8,45	8,93	9,67	10,79	10,94	10,87	10,97	11,02	11,13
Itapeva	5,63	5,90	5,92	5,54	6,26	8,03	8,76	11,53	11,18	11,36	10,81	9,84	9,06
Marília	12,76	13,54	14,05	14,12	16,58	18,32	20,13	20,86	20,90	19,30	19,10	18,05	16,99
Metropolitana de São Paulo	193,93	206,97	211,29	209,75	236,61	257,67	265,05	269,19	264,98	255,50	254,81	255,88	241,53
Presidente Prudente	8,99	9,37	10,07	9,82	11,73	12,65	13,45	14,16	13,39	12,69	13,07	12,16	11,42
Registro	5,01	5,64	6,02	6,08	7,45	8,26	9,48	10,32	9,73	9,15	8,76	9,06	8,50
Ribeirão Preto	17,52	17,12	17,81	17,20	19,75	20,70	21,48	22,85	22,96	22,46	22,66	22,80	22,55
Santos	14,63	37,09	35,01	37,44	54,05	52,74	55,83	35,56	31,92	26,67	19,48	19,53	18,83
São José do Rio Preto	23,60	26,72	25,63	24,67	28,88	32,19	36,65	37,51	35,95	35,11	34,62	35,13	32,52
São José dos Campos	24,36	27,11	25,25	26,17	27,83	33,38	35,66	36,87	34,96	34,73	35,95	36,05	33,44
Sorocaba	28,31	30,65	31,57	31,79	32,63	43,02	49,11	51,06	45,74	43,03	40,95	38,35	37,07
Estado de São Paulo													
Total	46,79	52,12	52,52	52,64	60,57	66,81	70,75	70,43	67,97	65,43	64,10	64,04	60,73

APÊNDICE F – [Emissões de CO₂ associadas ao gás natural (10³ t de CO₂)]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Regiões administrativas													
Araçatuba	0,0 4	0,0 4	0,0 3	0,0 4	0,0 4	0,0 6	0,0 7	0,0 6	0,0 6	0,0 5	0,0 4	0,0 6	0,0 6
Barretos	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Bauru	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 1	0,0 3	0,0 6	0,1 2	0,1 1	0,0 9	0,0 9	0,1 1	0,0 9
Campinas	3,3 4	3,5 0	3,5 8	3,0 2	3,4 8	3,6 7	3,6 1	3,4 3	3,2 9	3,2 4	3,0 0	3,8 2	3,9 6
Central	0,2 0	0,2 4	0,2 9	0,2 9	0,3 3	0,3 8	0,3 8	0,3 4	0,3 5	0,3 0	0,2 8	0,3 4	0,3 2
Franca	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Itapeva	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Marília	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 2	0,0 2	0,0 4	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 4	0,0 4
Metropolitana de São Paulo	3,6 9	3,9 2	4,3 6	3,4 7	3,9 9	3,6 1	4,2 0	4,7 4	4,8 1	4,6 8	3,3 8	4,7 0	4,5 5
Presidente Prudente	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Registro	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0
Ribeirão Preto	0,0 0	0,0 0	0,0 1	0,0 1	0,0 0	0,0 2	0,0 3	0,0 3	0,0 3	0,0 2	0,0 3	0,0 4	0,0 4
Santos	0,5 5	0,6 1	0,6 0	0,4 1	0,4 1	0,4 4	0,4 7	0,6 0	0,6 2	0,6 0	0,4 2	0,6 3	0,9 0
São José do Rio Preto	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 0	0,0 1
São José dos Campos	1,0 1	1,1 0	1,1 0	0,8 8	1,0 7	1,0 7	1,0 8	1,1 4	1,1 4	1,1 1	1,0 9	1,3 9	1,4 4
Sorocaba	0,7 4	0,8 4	0,9 1	0,8 3	0,9 6	0,9 5	0,9 0	0,8 8	0,7 8	0,7 4	0,7 3	0,9 2	0,9 3
Estado de São Paulo													
Total	9,5 8	10, 23	10, 87	8,9 5	10, 32	10, 26	10, 82	11, 36	11, 21	10, 87	9,1 0	12, 05	12, 35

APÊNDICE G – [Dados dos setores econômicos]

Setor	Ano	População· (nº de· habitantes)	PIB·(R\$·1000· à preços· correntes)	Consumo· (GN)· (toe)	Consumo· (Etanol)· (toe)	Consumo· (Derivados)· (toe)	Consumo· (Eletricidade)· (toe)	Consumo· (Total)· (toe)	Emissões· (GN) (t·de· CO2)
Comercial	2009	41384039	1127093826	100	0	180	1871	2151	223000
	2013	43663669	1715238417	124	0	214	2344	2682	276520
	2018	45538936	2210561949	165	0	243	2441	2849	367950
Residencial	2009	41384039	1127093826	148	0	1486	2828	4462	330040
	2013	43663669	1715238417	228	0	1510	3333	5071	508440
	2018	45538936	2210561949	282	0	1354	3414	5050	628860
Transporte	2009	41384039	1127093826	396	5285	13125	78	18884	883080
	2013	43663669	1715238417	269	4792	17570	98	22729	599870
	2018	45538936	2210561949	249	6294	16224	94	22861	555270
Industrial	2009	41384039	1127093826	3903	15822	3189	5412	28326	8703690
	2013	43663669	1715238417	4498	15396	3707	5836	29437	10030540
	2018	45538936	2210561949	4472	15144	1845	5421	26882	9972560
Geração· Elétrica	2009	41384039	1127093826	368	361	156	472	1357	820640
	2013	43663669	1715238417	1087	369	123	414	1993	2424010
	2018	45538936	2210561949	1063	335	88	440	1926	2370490