

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

WAGNER WILSON PINHO DE FRANÇA

**A ELASTICIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE MORISHIMA APLICADA AOS
RECURSOS FÓSSEIS DA MATRIZ DE ENERGIA PRIMÁRIA**

TOLEDO - PR
2018

WAGNER WILSON PINHO DE FRANÇA

**A ELASTICIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE MORISHIMA APLICADA AOS
RECURSOS FÓSSEIS DA MATRIZ DE ENERGIA PRIMÁRIA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Economia do Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), *campus* Toledo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Braga de Almeida Gabriel.

TOLEDO - PR
2018

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

França, Wagner Wilson Pinho de

A Elasticidade de Substituição de Morishima aplicada aos recursos fósseis da matriz de energia primária / Wagner Wilson Pinho de França; orientador(a), Flávio Braga de Almeida Gabriel, 2018.

111 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2018.

1. Substituibilidade entre combustíveis. 2. Gás natural. 3. Função de custo Translog. 4. Elasticidade de substituição. I. Gabriel, Flávio Braga de Almeida. II. Título.

WAGNER WILSON PINHO DE FRANÇA

**A ELASTICIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE MORISHIMA APLICADA AOS
RECURSOS FÓSSEIS DA MATRIZ DE ENERGIA PRIMÁRIA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Economia do Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), *campus* Toledo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Data de aprovação: 14 de maio de 2018.

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues de Castro

Prof. Dr. Luiz Alberto Cypriano

Prof. Dr. Flávio Braga de Almeida Gabriel
(orientador)

AGRADECIMENTOS

Devo agradecimento a todos os professores do PGE e do PGDRA da Unioeste/Toledo. Em especial, ao Prof. Flávio Gabriel, quem me incentivou a entrar no programa mesmo antes da ideia se tornar uma possibilidade e veio a ser o meu orientador. Ao Prof. Jandir Lima, meu primeiro contato em Toledo e com cuja interação rendeu boas e interessantes conversas. Ao Prof. Jefferson Staduto, coordenador do PGE, grande conhecedor de várias áreas da economia e cuja dedicação proporcionou todas as condições para que o programa nascesse e atingisse os melhoramentos dos quais fui beneficiado como aluno. Ao Prof. Weimar Rocha, que hoje considero um amigo e a quem devo muitos agradecimentos pontuais. Ao Prof. Luis Alberto Cypriano, quem mostrou comigo uma atenção que foi além da sala de aula. Sinto grande admiração! Agradeço também a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo apoio financeiro que me permitiu dedicar ao estudo. Sem esse apoio, não teria sido possível dar mais esse passo na minha formação acadêmica. Aos meus colegas, tanto do PGE quanto do PGDRA, devo boas horas de conversas, muitos litros de cafés e vários lanches da tarde! Principalmente a segunda turma do PGE, deixo o meu muito obrigado! Bruna, Carlos, Erivelto e Ikaro, parceiros de estudo e de algumas pizzas, vocês foram decisivos, não somente na contribuição em sala de aula, mas à minha estada na cidade. Sinto que a amizade continuará por anos! Seria impossível desenvolver esse trabalho sem as contribuições, diretas e indiretas, do Prof. Erly Cardoso Teixeira. O capítulo "Função Transcendental Logarítmica", escrito por ele, pelo Eduardo Castro e pelo Adelson Figueiredo, parte do livro Métodos Quantitativos em Economia (UFV, 2004), foi o manual de bolso para o desenvolvimento da metodologia. Ainda mais especial foi a atenção que recebi dele pessoalmente durante a sua passagem por Toledo em 2017. Ele transformou uma rápida conversa de 15 minutos em carinhosa e dedicada atenção de quase duas horas. A disposição em ajudar, as recomendações e principalmente as motivações, deram o impulso de que eu precisava para que o trabalho tomasse forma. Um dos frutos dessa conversa foi o contato com o Prof. Eduardo Castro, quem se mostrou igualmente atencioso e disposto a contribuir com materiais particulares para o desenvolvimento da metodologia. Agradeço a ele também por tal disposição e prontidão, e por integrar a banca de defesa, com contribuições fundamentais. Mas, provavelmente, nenhuma dessas contribuições teria ocorrido sem o intermédio do Prof. Cypriano, aluno exemplar do Prof. Erly - nas palavras do próprio professor! - e colega do Prof. Eduardo. A ele, mais uma vez, o meu especial agradecimento! Agradeço a minha revisora oficial da língua portuguesa, Giselle de Pinho Costa, que também vem a ser a minha mãe. Sempre de prontidão e estimulada a ler diversas vezes cada página que escrevo. Essa valiosa ajuda, no entanto, não exime a minha total responsabilidade por eventuais tropeços na língua portuguesa! Por fim, sempre, minha eterna dívida com você, Branquinha! Para sempre, obrigado!

RESUMO

A matriz mundial de energia primária é composta predominantemente por recursos não renováveis e cujo consumo contribui para a intensificação do efeito estufa. O consumo do petróleo e do carvão, combustíveis que supriram mais de 60% da demanda total de energia entre 1970 e 2015, é mais intensivo na geração de poluentes do que o consumo do gás natural. Além disso, alguns autores datam para próximo de 2050 a impossibilidade de sustentar a demanda de petróleo, pelo esgotamento técnico e econômico das reservas do tipo convencional. A tecnologia vem dando flexibilidade para que haja a substituição dentre os combustíveis fósseis, em várias aplicações. Isso gera a oportunidade de aumentar o consumo do menos poluidor, o gás natural, em substituição aos outros dois. O gás natural também possui reservas relativamente maiores do que as do petróleo, o que permite a ele aliviar parte da pressão colocada sobre este último. Por estas perspectivas, aumentar a participação do gás natural contribui para a mitigação da externalidade ambiental e reduz a magnitude de uma possível crise causada por um choque de oferta. O objetivo geral desta dissertação é responder se há uma relação de substituição entre o gás natural e os outros combustíveis fósseis na demanda de energia primária, pela Elasticidade de Substituição de Morishima, no período entre 1970 e 2015. O modelo partiu de uma função de custos do tipo Translog para chegar às equações de demanda condicionada de cada combustível e às equações de participação de custo, aplicando o lema de Shepard. Os parâmetros da regressão econométrica foram estimados pelo método Seemingly Unrelated Regressions e usados para os cálculos das elasticidades da demanda aos preços, de substituição de Allen e de substituição de Morishima. O modelo foi aplicado aos Estados Unidos, dada a significância deste país no contexto mundial de energia. Os resultados mostraram que uma única conclusão para todo o período é estatisticamente insignificante. Com base nas elasticidades aos próprios preços, foi possível identificar três quebras estruturais, estatisticamente significativas, dividindo o período em quatro intervalos. No intervalo 1970-1981, o gás natural se mostrou complementar ao petróleo e, estes dois, substitutos ao carvão. Nos intervalos 1982-1995 e 1996-2008 foi identificada uma relação de substituíbilidade entre o gás natural e o petróleo, apesar de limitada. No mais recente, todos os combustíveis tiveram relações de complementariedade. Aliando estas às interpretações das elasticidades-preço, concluiu-se que fatores externos ao mercado, como interferências de governo, foram mais determinantes para as decisões de demanda. Não ter sido possível encontrar uma relação de substituição entre o gás natural e os outros dois fósseis, de forma contínua e consistente, deixa o alerta de que as preocupações levantadas podem estar sendo negligenciadas e que a transição de uma matriz predominantemente suja e finita para outra mais limpa e renovável, mediada pelo gás natural, não está em curso na maior economia do mundo.

Palavras-chave: Substituíbilidade entre combustíveis. Gás Natural. Função de custo Translog. Elasticidade de Substituição.

ABSTRACT

THE MORISHIMA ELASTICITY OF SUBSTITUTION APPLIED INTO FOSSIL FUEL SOURCES OF PRIMARY ENERGY MIX

The global primary energy mix is mostly composed by nonrenewable resources and the use of which uses contributes to increase the greenhouse gas emissions. The consumption of oil and coal, responsible for attending 60% of the total energy demand between 1970 and 2015, is more likely to enhance the air pollution than the consumption of natural gas. Besides, some authors announce the impossibility of sustaining the demand of oil with conventional type only at around 2050, because of technical and economic constraints over the reserves. Technology has been playing a roll giving more flexibility to the interfuel substitution among fossil fuels, in many applications. That gives the opportunity to increase the share of natural gas in the primary mix, while reducing the consumptions of the other two. Moreover, the reserves of natural gas are larger in comparison with the ones of oil, allowing it to alleviate the pressure over the latter. From those perspectives, increasing the use of natural gas would contribute to reduce the negative environment externality and the extension of a possible shock to be unleashed in the energy supply. The objective of this dissertation is to seek for a substitutability between natural gas and the others fossil fuels in the primary energy demand, using the Morishima Elasticity of Substitution, between 1970 and 2015. The model started with a Translog cost function to obtain the input demand equations of each fuel and their cost share functions, applying Shephard's lemma. The parameters of the econometric regression were estimated by the Seemingly Unrelated Regressions method, as means to measure the price elasticity, the Allen Elasticity of Substitution and the Morishima Elasticity of Substitution. The model was applied to the United States due to their significance in the global context of energy. The results showed that a single conclusion for the period as a whole is statistically insignificant. Based on own-price elasticities, there were clearly three structural brakes, statistically significant, which divided the time series in four intervals. In the interval 1970-1981, the natural gas had a complementary relation with oil and both were substitutes for coal. In the intervals 1982-1995 and 1996-2008, there was substitutability among natural gas and oil, although limited. In the most recent interval, all of the fuels were complements to each other. Putting together the elasticities of substitution and the price elasticities analysis, we conclude that factors exogenous to the free market relations, such as government interventions, were determinants to demand decisions. The lack of a continuous and consistent relation of substitution between natural gas and the other two fossil fuels, warns that the concerns presented in this work may have being neglected and a transition from a polluted and finite mix to another cleaner and renewable, bridged by natural gas, is not occurring in the world's largest economy.

Keywords: Interfuel substitution. Natural gas. Translog cost function. Elasticity of Substitution.

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Média da produção diária de gás natural em (BCF) nos Estados Unidos, por método de extração – 2000 a 2015 | 25 |
| Gráfico 2 - Evolução da reserva provada mundial de gás natural por grandes regiões – 1980 a 2015 | 26 |
| Gráfico 3 - Demanda de energia primária dos Estados Unidos e do resto do mundo – 1971-2014 | 29 |
| Gráfico 4 – Evolução da matriz energética dos Estados Unidos em quatrilhões de BTU, por fonte primária – jul/1973 a out/2016 | 30 |
| Gráfico 5 - Volume de importação de gás natural dos quatro maiores importadores em 2014 – 2006-2014 | 38 |
| Gráfico 6 - Emissão de dióxido de carbono gerado na combustão dos combustíveis fósseis dos 3 países mais poluidores em 2015 – 1965-2015 | 40 |
| Gráfico 7- Representação gráfica de uma Isoquanta | 66 |
| Gráfico 8 - Maiores demandantes de energia primária em 2014..... | 78 |
| Gráfico 9 - Custo médio da energia primária a preços de 2015 nos EUA – 1970 a 2015..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Evolução da matriz energética mundial, de 1800 a 2015 | 19 |
| Figura 2- Destino da energia primária nos Estados Unidos, por setor, em 2015 | 31 |
| Figura 3 - Ilustração do encontro hipotético das regiões possíveis da função objetivo C no problema Primal e da respectiva função C^* no problema Dual..... | 58 |
| Figura 4 - Distribuições <i>t-Student</i> para diferentes graus de liberdade..... | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Síntese dos resultados das regressões econométricas estimadas pelo método SUR | 84 |
| Tabela 2 - Coeficientes de elasticidades-preço da demanda dos combustíveis fósseis..... | 85 |
| Tabela 3 - Agrupamento dos resultados das elasticidades próprias dos combustíveis fósseis, em intervalos..... | 86 |
| Tabela 4 - Coeficientes de elasticidades-preço da demanda dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos | 87 |
| Tabela 5 - Elasticidade de substituição de Allen entre os combustíveis fósseis | 88 |
| Tabela 6 - Coeficientes de elasticidades de substituição de Allen dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos | 89 |
| Tabela 7 - Elasticidade de substituição de Morishima entre os combustíveis fósseis..... | 89 |
| Tabela 8 - Coeficientes de elasticidades de substituição de Morishima dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos | 90 |
| Tabela 9 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1970 a 1981 | 91 |
| Tabela 10 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1982 a 1995 | 92 |
| Tabela 11 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1996 a 2008 | 94 |
| Tabela 12 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 2009 a 2015 | 95 |

LISTA DE ABREVIACOES

| | |
|--------|--|
| ARDL | Autoregressive Distributed Lag |
| BBO | Billions of Barrels of Oil |
| BCF | Billion Cubic Feet |
| BP | British Petroleum |
| BRICTS | Brasil, Rússia, Índia, China, Turquia e África do Sul |
| BTU | British Thermal Unity |
| CES | Constant Elasticity of Substitution |
| EEN | Energy-Economy Nexus |
| EIA | U.S. Energy Information Administration |
| ES | Elasticidade de Substituição |
| ESA | Elasticidade de Substituição de Allen |
| ESM | Elasticidade de Substituição de Morishima |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FBCF | Formação Bruta de Capital Fixo |
| GDP | Gross Domestic Product |
| GN | Gás Natural |
| GNL | Gás Natural Liquefeito |
| IEA | International Energy Agency |
| JB | Teste de normalidade de Jarque-Bera |
| KOE | Kilos of Oil Equilvalent |
| MQ3E | Mínimos Quadrados em Três Estágios |
| MQG | Mínimos Quadrados Generalizados |
| MQO | Mínimos Quadrados Ordinários |
| MTOE | Million tons of oil equivalent |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OPEP | Organização dos Países Exportadores de Petróleo |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PNB | Produto Nacional Bruto |
| QN | Quadrados Normalizados (forma funcional de uma função) |
| SEDS | State Energy Data System |
| SUR | Seemingly Unrelated Regression |
| TCF | Trillion Cubic Feet |
| TCM | Trillion Cubic Meters |
| TMS | Taxa Marginal de Substituição |
| TMST | Taxa Marginal de Substituição Técnica |
| TRC | Texas Railroad Commission |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 16 |
| 2.1 | A energia primária no mundo | 16 |
| 2.1.1 | Evolução da matriz energética mundial | 16 |
| 2.1.2 | O debate sobre as reservas de petróleo e gás | 20 |
| 2.1.3 | Diferenciais do gás natural..... | 24 |
| 2.1.4 | A energia primária nos Estados Unidos | 28 |
| 2.1.5 | O caso particular da China | 36 |
| 2.2 | Revisão de trabalhos empíricos | 42 |
| 3 | METODOLOGIA | 56 |
| 3.1 | Teoria da dualidade | 57 |
| 3.2 | Forma Funcional da Função de Custos | 60 |
| 3.3 | Equações de Demandas Parciais | 63 |
| 3.4 | Cálculo das elasticidades | 65 |
| 3.4 | Modelo econométrico | 70 |
| 3.5 | Fonte dos dados | 77 |
| 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 81 |
| 5 | CONCLUSÃO | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 100 |
| | APÊNDICE A - Síntese dos trabalhos revisados que trataram da substituição entre combustíveis | 109 |
| | APÊNDICE B - Síntese das variáveis usadas no modelo | 110 |
| | APÊNDICE C - Valores da elasticidade-preço da demanda dos combustíveis fósseis nos EUA – 1970 A 2015 | 111 |

1 INTRODUÇÃO

A energia é um insumo fundamental na produção de qualquer economia, presente também no cotidiano de qualquer pessoa. A origem primária é diversa, porém os combustíveis fósseis representam a maior parte no contexto mundial. O petróleo, o gás natural (GN) e o carvão são fontes não-renováveis, cujas reservas são limitadas e finitas. A energia é extraída através da queima destes combustíveis, tornando parte do processo a liberação de poluentes na atmosfera, mais intensa na queima do carvão e do petróleo. A fonte com a quarta maior participação dentro da matriz energética primária mundial é a hidroenergia. Apesar de ser renovável, é limitada por somente ser aproveitada em regiões com cursos d'água em quantidade suficiente e em formações geológicas apropriadas. Em seguida, aparece a energia nuclear, que recebeu muitos investimentos nas décadas de 1980 e 1990, mas que é alimentada por minerais finitos. O acondicionamento do lixo nuclear é motivo de grande preocupação e alvo de críticas, o que contribuiu para diminuir a atenção dispensada a esta fonte nos anos 2000 (BARROS, 2007; SILVA e RODRIGUES, 2015).

Com menor participação, outras fontes de energia conseguem reduzir o impacto ambiental e atender à exigência de renovação. A capacidade instalada dos sistemas que usam fontes renováveis, com destaque para as provenientes do sol e do vento, ultrapassou o potencial de geração total de energia elétrica por carvão em 2015, totalizando 153 *Gigawatts*. Armazenar energia para disponibilizá-la em momentos de intermitência da geração é o gargalo desses sistemas, porque a possibilidade de estocagem das baterias é muito limitada. A restrição tecnológica impede que a participação de tais fontes aumente dentro da matriz mundial de energia primária (HUNT, 2016).

A demanda por energia cresce temporalmente de forma quase ininterrupta. Por mais de meio século, desde a década de 1970, esse crescimento se sustenta pelos mesmos combustíveis. Em 1971, cada habitante do planeta consumiu de energia, em média, o equivalente a 1,34 quilos de petróleo (Koe¹). Em 2013, esse consumo foi 41% maior, chegando a 1,89 Koe por pessoa (THE WORLD BANK, 2014). Neste mesmo período, o consumo dos três combustíveis fósseis, petróleo, carvão e GN, aumentou 132% (BRITISH

¹ Unidade de mensuração de energia que usa como referência a energia gerada com um quilo de óleo de petróleo – *Kilos of Oil Equivalent*, não significando necessariamente que o consumo de energia *per capita* considera apenas o consumo de petróleo.

PETROLEUM, 2016). Da década de 1970 até 2015, a participação dos fósseis, no total da energia primária gerada no mundo, pouco oscilou em torno de 82% ².

A matriz da energia primária mundial em 2015 foi composta por 32,9% de petróleo, 29,2% de carvão, 23,8% de GN, totalizando pouco mais de 85% advindas de fontes fósseis. As demais foram: 6,8% de energia de hidroelétrica, 4,4% de energia nuclear e 2,8% de energias renováveis (BRITISH PETROLEUM, 2016). A demanda crescente por energia, baseada predominantemente numa matriz finita e poluente, resulta em números continuamente crescentes de partículas de poluição sendo liberadas na atmosfera.

A quantidade de dióxido de carbono liberada no ar pela combustão do petróleo, do carvão e do GN, para a produção de energia, aumentou 195% entre 1965 e 2015. A América do Norte e a Europa registraram aumento de 64,1% e 16,2%, respectivamente. O aumento no Oriente Médio foi de 1.448%, de 1.028% na Ásia, de 508% na África e de 367% nas Américas do Sul e Central. As regiões desenvolvidas tendem a atingir uma estabilidade, enquanto que regiões em desenvolvimento aumentam a demanda energética às custas do meio ambiente. A China aumentou o nível desta poluição em 1.773% ao longo deste meio século, se tornando o país mais poluente do mundo em 2006 (considerando apenas o processo de geração de energia). Foi seguida pelos Estados Unidos (EUA), pela Índia, pela Rússia e pelo Japão, considerando os números de 2015 (BRITISH PETROLEUM, 2016).

Somente o carvão é responsável por quase 40% da emissão do dióxido de carbono no processo de geração de energia. Mas o dano ambiental está presente desde a extração. Do processo de mineração, resulta o depósito de materiais tóxicos em áreas naturais, como o mercúrio, e a abertura de enormes clareiras, muitas vezes não regenerada após o período de exploração (WOOLSEY, KLEINFELD e SEXTON, 2010).

Pode-se encontrar na literatura um debate sobre por quanto tempo o petróleo conseguirá suprir a demanda energética. Goldenberg e Lucon (2006) afirmam que o estoque de petróleo deve terminar por volta do ano 2050, mantidos os números de reservas e produção do início dos anos 2000 e a tecnologia da época. Koskinen (2016) sugere que por volta do ano de 2030, a predominância do petróleo será colocada em risco, tanto pela perspectiva técnica, de disponibilidade de reservas economicamente viáveis, quanto pela pressão da demanda, por sistemas energéticos de baixo carbono. Ele lembra que a atmosfera possui uma capacidade limitada de absorver o gás carbônico, há muito extrapolada pelo homem. O resultado disso é o

² Cálculo feito pelo autor, com base no Consumo de Energia Primária Global de Ritchie e Roser (2017)

aquecimento global, causa de danos irreversíveis ao meio ambiente. Porto (2007), na mesma linha de Koskinen (2016), data para 2030 uma redução abrupta da produção de petróleo.

Frente à eminência de esgotamento das reservas de petróleo e aos altos níveis de poluição oriundos da geração de energia, ficam claras duas preocupações, no que tange a energia primária mundial: a) cerca de um terço da demanda é dependente do petróleo, um recurso que irá se esgotar, apesar de não haver um consenso sobre quando isso acontecerá; b) enquanto a matriz se sustenta predominantemente por combustíveis que geram uma cara externalidade ambiental, permanece a intensificação do efeito estufa, através da liberação de poluentes no processo de geração.

Não sendo tecnicamente possível substituir a composição dessa matriz, suja e finita, por fontes mais limpas e renováveis, espera-se uma diminuição da participação dos dois combustíveis mais poluentes, dentre os fósseis (petróleo e carvão), e o aumento da participação do menos agressivo e que possui reserva relativamente maior do que a do petróleo: o GN. Woolsey, Kleinfeld e Sexton (2010) afirmam que as usinas geradoras de energia que utilizam o GN liberam cerca de um terço da quantidade de dióxido de carbono emitido por plantas que utilizam o carvão. Considine et al. (2009) afirmam que o GN gera emissões de carbono 60% menores do que as do carvão e 30% menores do que as do petróleo.

Assumindo que a possibilidade imediata mais viável para minimizar os impactos negativos de longo prazo na economia destes fatores é substituir o petróleo e o carvão por GN, na geração da energia primária, é proposto o problema de pesquisa: é possível identificar uma substituíbilidade em curso entre o petróleo e o carvão, e o gás natural?

O objetivo deste trabalho é responder se há uma relação de substituição entre o GN e os outros dois combustíveis fósseis na demanda de energia primária, valendo-se da Elasticidade de Substituição de Morishima (ESM). Tal objetivo se desmembra nos passos definidos como objetivos específicos:

a) discorrer sobre os combustíveis fósseis com base na literatura e apresenta-los no contexto da matriz de energia primária, dando atenção especial ao GN;

b) modelar as demandas individuais de cada combustível fóssil através de formas funcionais flexíveis, baseadas numa função de custo;

c) modelar as equações da elasticidade de Morishima para testar a substituíbilidade entre combustíveis;

d) aplicar o modelo a um mercado mundialmente representativo para verificar se há relação de substituição entre o GN e os demais combustíveis fósseis.

A hipótese é a de que é possível identificar um processo de substituição ocorrendo dentre os combustíveis fósseis entre os anos de 1970 e 2015, onde o GN supre uma demanda que, de outra forma, seria atendida pelo petróleo ou pelo carvão. A participação deste combustível é crescente, tanto dentro da matriz energética primária, quanto dentro da matriz fóssil. A exploração do GN não-convencional³, principalmente das formações de *shale*⁴, aliada ao menor potencial poluidor, dão ao GN condição de fazer a ponte entre a Era do Petróleo e a seguinte, provavelmente baseada numa combinação das fontes nuclear, solar, eólica e de biomassa. Essas fontes caracterizariam uma matriz com maior possibilidade de renovação e menor geração de externalidade ambiental negativa (BAHIA e LUCZYNSKI, 2004; BARROS, 2007; SILVA e RODRIGUES, 2015; KOSKINEN, 2016).

A metodologia usada para atingir os objetivos segue passos semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Considine (1989) e Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010b). Foram desenvolvidas equações de demanda para os combustíveis petróleo, carvão e GN, usando a forma funcional flexível do tipo Translog. O desenvolvimento partiu de uma função de custo, derivada de uma função de produção, valendo-se da teoria da dualidade. As equações de demanda foram estimadas econometricamente pelo método SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*⁵), cujos coeficientes foram usados no cálculo das elasticidades; elasticidade-preço da demanda (próprias e cruzadas), inicialmente, Elasticidade de Substituição de Allen (ESA) e finalmente ESM. Os sinais da ESM determinam uma complementariedade ou substituíbilidade, quando são estatisticamente significativos.

Apesar da preocupação que motiva este trabalho ser global, ele está limitado pela falta de dados que sejam abrangentes o suficiente para captar um movimento em escala mundial. Optou-se por aplicar o modelo aos EUA, por este país ter, em 2014: a) dados atualizados e gratuitamente disponíveis sobre energia; b) sido o segundo maior demandante de energia primária (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017l); c) sido o maior consumidor de GN; d) sido o maior consumidor de petróleo; e) sido o segundo maior consumidor de carvão. Ele foi também o segundo maior emissor de dióxido de carbono pela combustão dos três combustíveis fósseis, atrás apenas da China neste e no quesito consumo de carvão (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Dentre os quatro maiores demandantes de energia, que em conjunto foram responsáveis pela metade da demanda global em 2014, é o único que disponibiliza dados oficiais sobre consumo, produção e preços. Os

³ Uma definição para este termo é dada na seção 2.1.2 (p.21)

⁴ Tipo de solo argiloso de onde se extrai o gás-natural através do processo de fraturamento hidráulico. O domínio da técnica para esta extração contribuiu significativamente para o aumento da reserva de GN.

⁵ Sistema de equações com regressões aparentemente não relacionadas.

outros três foram China (1º), Rússia (3º) e Índia (4º) (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017). Os preços, consumos e gastos, usados no cálculo das elasticidades, foram adquiridos na Energy Information Administration (EIA), agência ligada ao departamento de energia do governo americano. Os dados anuais cobrem o período de 1970 a 2015, possibilitando 46 observações para cada um dos três combustíveis.

O capítulo seguinte a esta introdução está dividido em duas partes principais. A primeira aprofunda o conhecimento sobre os combustíveis fósseis e a matriz energética primária mundial, dando atenção especial ao GN. A segunda apresenta uma revisão de trabalhos empíricos que analisaram, de forma quantitativa, os combustíveis fósseis na economia. O capítulo 3 detalha a metodologia usada para testar a hipótese, iniciando com a Teoria da Dualidade aplicada à Teoria Microeconômica da Produção, a forma funcional flexível Translog, de onde se definem as equações de demandas parciais, e o método econométrico SUR. Em seguida, apresenta a ESA, referência para o cálculo da ESM. São os sinais dos valores desta elasticidade que permitirão responder se há um processo de substituição entre os combustíveis analisados. O quarto capítulo analisa a aplicação da metodologia no mercado de energia primária norte-americano, desenvolvendo os cálculos das elasticidades e definindo as relações entre os combustíveis fósseis. O último faz a conclusão, respondendo a problemática da pesquisa e recomendando continuações sobre a temática abordada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A energia primária no mundo

2.1.1 Evolução da matriz energética mundial

A decomposição dos seres que habitaram a Terra, principalmente os marinhos, formou uma camada orgânica na superfície que com o tempo foi sendo soterrada. Esse material, hoje encontrado no subsolo, é a origem dos combustíveis fósseis: petróleo, carvão mineral, GN, xisto betuminoso e outros. O processo levou milhões de anos para acontecer. Por isso, essas são consideradas fontes finitas, uma vez que o tempo de renovação do estoque é muito superior ao que se leva para extrair e consumir (GOLDEMBERG e LUCON, 2006).

Determinados tipos de algas e bactérias que se relacionavam com a matéria morta submergiram para o leito dos mares durante as eras de aquecimento global. A decomposição destes organismos formou a base dos depósitos de petróleo. Os resíduos de vegetação que foram sendo carregados para o fundo do mar e submetidos à influência de temperatura elevada e alta pressão, deram origem aos depósitos de gás (CARVALHO, 2009).

Durante a Idade Moderna o carvão começou a ser retirado da terra para aquecer ambientes e abastecer pequenas siderúrgicas. Com o tempo, as aplicações foram sendo aperfeiçoadas, até a criação do motor a vapor, por volta do ano 1875. Com ele, se deu a Revolução Industrial, o que gerou o rápido crescimento econômico de alguns países, a citar a Inglaterra e os EUA. Ele supriu a indústria de base e os transportes, permitindo que grandes distâncias pudessem ser atingidas de forma mais natural. Isso favoreceu principalmente as transações de mercado num primeiro processo de internacionalização do capital. O uso intensivo deste combustível o colocou como principal fonte da matriz primária de energia no final do século XIX (GOLDEMBERG e LUCON, 2006; MILLER e SORREL, 2014).

Foi também nessa época que o petróleo começou a ter uma participação expressiva na matriz mundial. O domínio sobre as tecnologias de extração e uso o transformou em um recurso natural com alta capacidade energética, permitindo a oferta barata de energia à época. Ao longo do século XX esse recurso encontrou aplicação nos setores comercial e industrial, como fonte de aquecimento e geração de energia elétrica, bem como nos transportes; primeiro nas ferrovias, depois suprimindo energia para os motores a combustão dos automóveis (HAMILTON, 2011).

A Primeira Guerra Mundial propiciou o aumento da participação deste combustível na matriz energética. A marinha inglesa, reconhecendo que precisava de uma frota mais poderosa para enfrentar os alemães, investiu no desenvolvimento de embarcações movidas a derivados de petróleo, que eram mais rápidas e tinham maior autonomia do que as movidas a carvão. A maior parte do petróleo era importada dos EUA, o que não garantia uma segurança energética no momento crítico de guerra. Isso justificou a aquisição de uma empresa petrolífera nacional, que mais tarde veio a se tornar a British Petroleum (BP), uma das maiores do mundo. Durante a Segunda Guerra Mundial, o petróleo já tinha consolidado sua importância como fonte primária de energia. O domínio sobre as áreas de extração foi objetivo estratégico de vários conflitos, justificando a invasão dos alemães ao norte da África e ao oeste soviético. A escassez do combustível em que se encontravam os alemães e os japoneses, contrastando com a abundância da qual dispunham os EUA e aliados, é citado por Miller e Sorrel (2014) como um dos fatores determinantes do fim da guerra.

A corrida pela descoberta de grandes reservas e altos níveis de produção foi momentaneamente esfriada com a Grande Depressão no início dos anos 1930, momento também em que regulações governamentais passaram a ser intensificadas. Os principais objetivos destas intervenções de mercado eram o de garantir um fluxo contínuo de suprimento e a preservação do potencial dos campos de extração no longo prazo. Entre as décadas de 1960 e 1970, o petróleo passou a representar a maior parte da oferta de energia primária, superando a cota do carvão. Destacam-se três fatores que contribuíram para tornar esse combustível o mais significativo de todos: a) o custo de extração era relativamente baixo; b) as descobertas de novas reservas durante a primeira metade do século XX o tornou abundante; c) o manuseio do produto era relativamente simples, permitindo que ele cruzasse longas distâncias pela água e por terra (MILLER e SORREL, 2014; HAMILTON, 2011).

A demanda por petróleo foi de 7,1 milhões de barris/dia em 1945. Em 1974 esse número passou para quase 60 milhões de barris/dia, 8,5 vezes maior. A produção respondeu no mesmo ritmo da demanda. Os EUA, além da produção própria, investiram massivamente em países do Oriente Médio, onde se localizam grandes reservas. Inúmeros acordos e disputas para controlar a produção, a logística e os direitos de comercialização, ocorreram entre grandes empresas americanas e europeias, como Exxon, Esso, Mobil, Chevron, BP, e, do outro lado, governos daquela região. Em 1960, como uma resposta defensiva de mercado às pressões dos grandes demandantes, cinco países constituíram a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP): Venezuela, Arábia Saudita, Irã, Iraque e Kuwait. Juntos, respondendo por 80% da oferta à época, conseguiram sustentar o preço internacional do

petróleo. Em 1973 eclodiu uma nova guerra árabe-israelense que fez o preço triplicar. Em decorrência da grave crise internacional gerada, conhecida como Primeiro Choque do Petróleo, houve uma inversão na curva de demanda que alterou o padrão de consumo, tendendo a consumos mais eficientes (TORRES FILHO, 2008).

Nos anos 2000, o consumo mundial de petróleo foi próximo ao registrado na década de 1970. De acordo com os números da BP (2016), em 1979, desconsiderando os países asiáticos, ele foi de 52,9 milhões de barris/dia e de 57,5 milhões de barris/dia em 2003. As grandes economias capitalistas e as ex-repúblicas soviéticas chegaram perto da estabilidade do consumo, enquanto que a América Latina e algumas partes da Ásia registraram aumento. A China multiplicou por seis o seu consumo, entre a década de 1970 (3,05% do total mundial⁶ em 1979) e os anos 2000 (12,98% do total mundial em 2015).

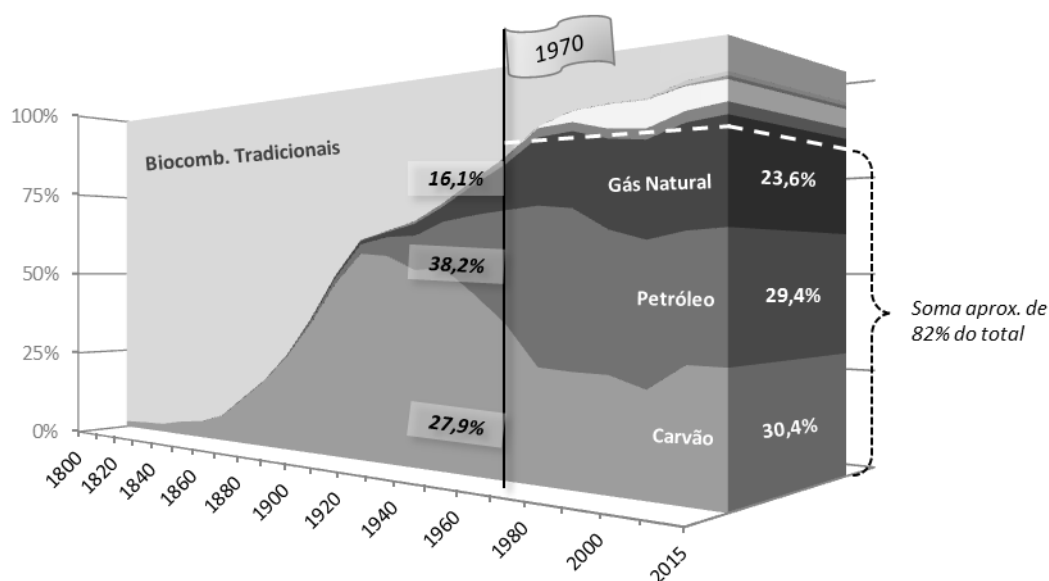
A oferta de petróleo ficou mais pulverizada nos anos 2000. Porém, o Oriente Médio se manteve como o maior ofertante, tendo pouco mais de 65% das reservas oficiais do mundo. A Arábia Saudita guardava sozinha, 25% do total da reserva mundial (TORRES FILHO, 2008).

A demanda mundial de GN aumentou três vezes e meia entre 1970 e 2015, crescendo de forma quase linear. A Figura 1 mostra que, nos anos 1970, o GN contribuía com cerca de 16% na matriz de energia primária. Essa participação foi de 23,6% em 2015, representando um aumento de mais de 46%. O petróleo, que forneceu 38,2% do total de energia no primeiro período, teve a participação diminuída em 23%, contribuindo com 29,4% em 2015. O carvão teve a menor variação no período, 8,8%, passando de 27,9% para 30,4%. A soma dos três combustíveis fósseis, no entanto, permaneceu quase constante: era de 82,2% em 1970 e foi para 83,4% em 2015, com média de 81,8% para o período⁷. Essas participações são ligeiramente diferentes das informadas pela BP (2016) para 2015, mas não mudam a interpretação nem o sentido da análise.

⁶ Consumo de petróleo da China, incluindo Hong Kong. Fonte: BP (2016).

⁷ Calculado pelo autor, com base nos dados de Ritchie e Rose (2017)

Figura 1 - Evolução da matriz energética mundial, de 1800 a 2015



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados de Ritchie e Roser (2017)

A Rússia tinha cerca de 17% de todas as Reservas Provasdas⁸ de GN em 2015. É o segundo país no ranking, apenas atrás do Irã (BRITISH PETROLEUM, 2016). A produção lá é limitada pela idade avançada dos poços, por uma infraestrutura insuficiente para distribuir para a exportação, por interferências políticas e pela característica do mercado de oferta, dominado pela Gazprom, empresa estatal originária do Ministério de Gás Soviético. Essa empresa respondeu por 95% da produção interna e controlava 30% da reserva mundial nos anos 2000, segundo Economides e Wood (2009). Os russos foram superavitários na produção de 2015, tendo consumido 14.794 BCF⁹, equivalente a 11,9% do total mundial, e produzido 22.729 BCF, contribuindo com 14,7% da produção mundial (BRITISH PETROLEUM, 2016; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017e).

As reservas de GN na Europa são muito limitadas. Boa parte do gás consumido no continente é importada. Deste montante, quase a metade foi fornecida pelos russos através de uma longa infraestrutura de dutos, que cruza as terras de leste a oeste, tendo sido esse número de 46% em 2013 (SILVA e RODRIGUES, 2015). É o retrato do grande poder de barganha que a Rússia mantém frente às principais potências econômicas europeias, considerando que os europeus¹⁰ consumiram quase 30% de todo o GN queimado em 2015 (BRITISH PETROLEUM, 2016).

⁸ Uma definição mais específica para esse termo é dada na seção 2.1.2.

⁹ Billion Cubic Feet, ou bilhões de pés cúbicos.

¹⁰ Dados de todos os países do bloco denominado Eurásia.

Os EUA tinham cerca de 5,6% das Reservas Provadas de gás em 2015, porém responderam por quase 20% de todo o consumo mundial daquele ano. Quase a metade foi importada do Canadá, cujas reservas eram apenas um quinto da do vizinho e o consumo foi um décimo do estadunidense (BRITISH PETROLEUM, 2016). Os números deixam clara a desproporção entre os consumos destes dois países do Norte, bem como evidencia uma grande dependência da maior economia mundial em um recurso primário externo. Esta dependência é motivo de preocupação para os americanos, quando se discute a segurança energética.

Segundo Economides e Wood (2009), o Canadá teria um enorme potencial de extração com reservas ainda pouco estudadas no norte ártico, bem como os EUA no Alasca. A exploração deste recurso, no entanto, requer a construção de uma grande infraestrutura de dutos para transportar o gás até as regiões de processamento, tornando o projeto caro, principalmente em função das adversidades climáticas da região. Ainda compete economicamente com a exploração deste recurso a produção de petróleo em Alberta e Saskatchewan (províncias canadenses), que usa o gás no processo de extração, e as importações de gás em forma líquida de outras partes do mundo.

A crescente demanda estadunidense, do ponto de vista de Ersan (2015), deve direcionar os investimentos canadenses e definir quão rápido os projetos nessa área se desenvolverão. Se essa variação positiva da demanda for atendida pela produção nacional, o Canadá deve postergar os projetos e/ou reduzir o tamanho deles.

2.1.2 O debate sobre as reservas de petróleo e gás

De acordo com Considine et al. (2009), um poço foi perfurado intencionalmente para obter GN pela primeira vez em 1821. Até aquele momento, ele era apenas uma parte indesejada da extração de petróleo. O primeiro uso deste combustível foi na iluminação pública e nos usos domésticos. Mas a eletricidade gradualmente substituiu o GN na iluminação a partir dos anos de 1890. A oferta, que se tornou ociosa com tal substituição, encontrou uma nova demanda nos processos siderúrgicos. Longas tubulações foram construídas para levá-lo até os centros industriais, investimento justificado pela descoberta de grandes reservas. Durante os anos de 1950 e 1960, aumentou a capilaridade desta infraestrutura nos EUA e na Europa, permitindo que o carvão fosse substituído em algumas

aplicações. Como a demanda era sazonal, sendo maior no inverno, aumentou também a necessidade de armazenar o combustível.

A crise econômica da década de 1970 provocou o fechamento de várias plantas industriais, que resultou num excesso da produção de GN. Esse montante foi direcionado para a produção de energia elétrica. Nos anos 1990 e 2000, o avanço da tecnologia permitiu explorar o GN não-convencional de forma economicamente viável, possibilitando a oferta de um produto competitivo (CONSIDINE et al., 2009).

Existem, tanto para o GN como para o petróleo, várias classificações que podem ser agregadas, de forma mais genérica, em dois tipos: convencional e não-convencional. Eles são predominantemente diferenciados pela profundidade, características geográficas do local onde são encontrados e extraídos, e pela qualidade do produto. O primeiro grupo possui tipicamente uma qualidade maior. É mais leve, por isso mais fácil e barato de processar. O segundo requer tecnologia específica e exige mais etapas no processamento, por isso tornam-se mais caros. Considera-se que a energia potencial não é integralmente recuperada porque parte é usada na própria extração. A disponibilidade dos combustíveis convencionais vem sendo reduzida pelo ininterrupto fluxo da demanda, fazendo necessário complementar a oferta do convencional com o não-convencional (MILLER e SORREL, 2014; HIRSCH, BEZDEK e WENDLING, 2007).

A discussão sobre os volumes de reservas é menos controversa do que o debate sobre o tamanho da influência que novas tecnologias terão na viabilidade de manter a demanda no futuro. Duas correntes de pensamento possíveis de se encontrar na literatura se distinguem: uma acredita que as melhores reservas de petróleo já foram descobertas e a quantidade restante de combustível economicamente viável é limitada; a outra entende que as reservas são dinâmicas, dependentes do nível da demanda e da tecnologia disponível para extraí-lo. Essa última se apresenta mais otimista do que a primeira. Um argumento usado para criticar o primeiro grupo é o de que, da década de 1970 até os anos 2000, muito pouco petróleo foi realmente descoberto. A maior parte dos aumentos divulgados oficialmente é fruto de revisões técnicas, que passam a considerar viáveis certas áreas que antes não o eram, graças ao desenvolvimento de novas tecnologias e movimentos relativos de preços. Sustentava este argumento o fato de que 90% da produção global em 2000 era oriunda de poços com mais de 30 anos (ROGNER, 2000).

A polarização entre essas correntes é mais nítida quando se discute por quanto tempo será possível manter o consumo, sustentado pela matriz primária predominantemente baseada no petróleo. Enquanto a primeira, mais pessimista, afirma que há de 30 a 40 anos pela frente,

findando próximo ao ano 2050, em condições *coeteris paribus*, a segunda é categórica na defesa de que ainda é cedo para tal preocupação, porque há quase um século assegurado de suprimento. Não se encontrou evidente na literatura uma conclusão definitiva e consensual.

As reservas de combustíveis fósseis reportadas são usualmente classificadas em três categorias principais (BRITISH PETROLEUM, 2016; MILLER e SORREL, 2014):

- a) Reservas Provadas (*Proved*), que dão o maior nível de certeza da capacidade de extração futura em condições físicas e de preços favoráveis. Elas também são conhecidas como 1P ou P90, indicando uma probabilidade de até 90% do volume total podendo ser recuperado;
- b) Reservas Provadas e Prováveis (*Proved and Probable*), ou 2P ou P50. A mesma interpretação de probabilidade, agora de 50%, pode ser feita;
- c) Provadas, Prováveis e Possíveis (*Proved, Probable and Possible*), ou categoria 3P ou P10, com possibilidade de até 10% de recuperação.

Ambas as Reservas Provadas de petróleo e GN dobraram da década de 1980 até 2015. Isso não necessariamente significa que novas reservas foram encontradas. A estimativa se baseia em suposições geológicas, na disponibilidade tecnológica e na viabilidade econômica. Diferentes estimadores podem chegar a distintas conclusões usando o mesmo conjunto de dados. Esses critérios são dinâmicos no longo prazo, por isso são esperadas constantes revisões e atualizações por parte dos países e empresas. Além dos aspectos técnicos, interesses políticos e das próprias empresas podem enviesar as estimativas (MILLER e SORREL, 2014; HIRSCH, BEZDEK e WENDLING, 2007; BRITISH PETROLEUM, 2016).

De acordo com os trabalhos de Rogner (2000) e Porto (2007), a distinção entre os petróleo e GN convencionais dos não-convencionais explica, em parte, a dual expectativa de sobrevivência das reservas, adotada por cada uma das correntes mencionadas. Cerca de 35% do que se estimava que havia nas reservas no final dos anos 1990 era possível de ser extraído com os métodos da época. Considerando a tecnologia disponível nos anos 2000, mas de custo mais elevado e não difundida comercialmente, este percentual subiria para 65%. Para aumentar o investimento nas tecnologias de extração deve haver um aumento no preço do produto no mercado internacional, para financiá-lo. A quantidade abundante de petróleo convencional que se consegue extrair ainda não permite a extração do petróleo não-convencional em larga escala, porque o torna relativamente caro, não viável economicamente. Mas há expectativa que em 2030, segundo estes autores e aceito também por Koskinen

(2016), seja necessário usá-lo para complementar a oferta do petróleo convencional, ao risco de não ser possível atender a demanda integralmente.

Defensores da segunda corrente de pensamento, simpáticos à ideia de que as reservas são dinâmicas, contam com o desenvolvimento de tecnologias que viabilizarão a extração dos combustíveis não-convencionais a baixo custo, concomitantemente à diminuição da disponibilidade dos convencionais, neutralizando a expectativa negativa nos preços (ODELL, 1998; POLIKAR, CYR e SADLER, 1998). Eles ilustram esta posição com o argumento de que a perspectiva de sobrevivência de 20 a 40 anos para as reservas, principalmente as de petróleo, são dadas desde a metade do século XX. Se fossem confirmadas, todo o recurso já haveria se esgotado há muito tempo. As antigas previsões não se confirmaram por causa do aumento da demanda. Se relacionando no mercado através dos preços, ela permitiu investimentos que resultaram nos avanços da geociência e das tecnologias de mensuração dos poços e de extração. Em fria análise, isso aumentou o tamanho das reservas.

As Reservas Provadas de GN têm crescido quase linearmente desde a década de 1970, a uma taxa média anual de 5% ao ano¹¹. Mais países têm aparecido na lista de ofertantes. Considerando as reservas de 2007, a produção se sustentaria por mais 60 anos a partir dali. Como esta categoria considera a tecnologia do presente, é sugestivo que este período se estenda por mais alguns anos. Espera-se que haja um aumento nas reservas de GN proporcionalmente maior do que aumentos nas reservas de petróleo (ECONOMIDES e WOOD, 2009).

Também lembrado por estes autores, as reservas do ártico ainda não eram totalmente conhecidas até o início do século XXI e podiam representar um potencial desconhecido. Johnston (2010) aponta que o degelo daquela região tem permitido encontrar GN e petróleo antes inacessíveis. O tamanho da reserva de petróleo do ártico, em terras do Canadá, dos EUA, da Finlândia, da Dinamarca, da Noruega, da Rússia e da Suécia, deve ser de 44 BBO¹², na categoria 1P, e de 157 BBO se considerar as chances de até 5% de recuperação. Esse montante representa 13% da média global de petróleo ainda não mensurado no mundo. Para o GN, o tamanho estimado da Reserva Provada foi de 770 TCF¹³ e de 2.990 TCF, considerando 5% de chance de recuperação. Esse montante é mais significativo do que o do petróleo porque representa 30% do que se estima do volume global de gás ainda não mensurado. Vale

¹¹ Projeção feita pelo autor, com base nos dados da BP (2016)

¹² *Billions of Barrels of Oil*, ou bilhões de barris de petróleo.

¹³ *Trillion Cubic Feet*, ou trilhões de pés cúbicos.

ressaltar que esses valores desconsideraram reservas de petróleo inferiores a 50 milhões de barris e reservas de GN inferiores a 300 BCF, além dos tipos não-convencionais.

As condições geológicas e climáticas adversas da região e a tecnologia disponível em 2010 ainda tornavam a exploração dessas reservas caras, não economicamente viáveis aos preços de mercado à época. Por isso, o principal valor destas descobertas está no potencial incremento da oferta destes dois combustíveis no futuro, podendo aliviar a pressão do mercado e aumentar a segurança energética daqueles países (JOHNSTON, 2010). Vale a observação de que, ironicamente, a consequência ambiental da poluição causada em parte pela queima dos combustíveis fósseis (o degelo) foi o que permitiu descobrir uma enorme fonte para aumentar a oferta destes mesmos combustíveis.

2.1.3 Diferenciais do gás natural

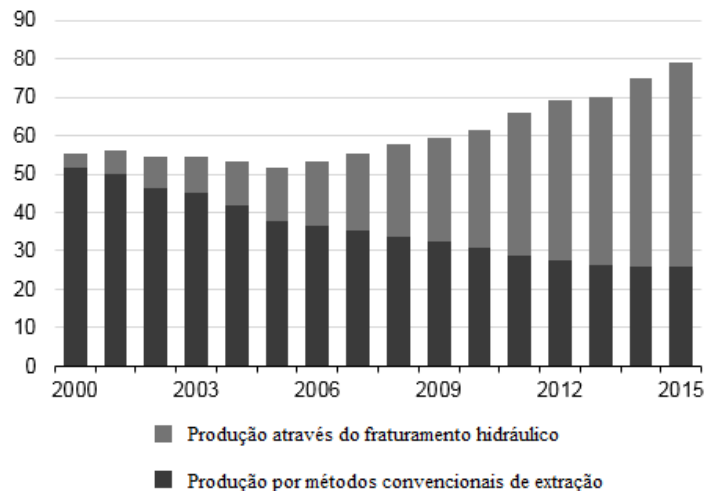
O setor de petróleo ganhou relevância para o crescimento econômico depois da 2ª Guerra Mundial. As petrolíferas, na busca por atingir economias de escala e de escopo, intensificaram a exploração de subprodutos do petróleo. Dentre eles, o GN recebeu atenção especial. O *core business* dessas empresas expandiu e muitas delas passaram de empresas de petróleo para empresas de energia (MENEZES, 2005).

O *Fracking* é uma tecnologia de extração que usa o fraturamento hidráulico e que normalmente se estende no subsolo de forma horizontal. É uma técnica não-convencional, que permitiu um significativo aumento da produção do GN e do petróleo. Uma combinação de água, gases e pequenos sedimentos, como areia, é injetada na terra em altíssima pressão, provocando a fratura da rocha. Quando a injeção é interrompida, a pressão dentro da terra tende a voltar à condição normal, o que acontece quando parte da massa subterrânea é expulsa para a superfície. Essa massa é composta por parte do que foi injetado, GN, petróleo e outros compostos naturais da formação geológica. Esse material é segregado, dando origem aos produtos finais, como o GN e o petróleo (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2016).

Nos EUA, o *Fracking* representou um grande avanço tecnológico na extração do petróleo e do GN, em especial deste último. No ano 2000, havia 26 mil pontos de extração de GN utilizando a técnica, produzindo 3,6 BCF por dia. Esse volume representou menos de 7% da produção total de GN do país. Em 2015, havia mais de 300 mil pontos produzindo 53 BCF por dia. Naquele ano, a produção utilizando essa técnica representou 67% da produção

estadunidense. Para o petróleo, a técnica de *Fracking* contribuiu com cerca da metade da produção total de petróleo naquele país em 2015. Isso faz com que essa técnica seja relativamente mais impactante para o GN do que para o petróleo (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2016; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017f). O Gráfico 1 mostra a participação do *Fracking* na produção de GN nos EUA. Nele, fica nítido que, se não fosse o domínio desta técnica, a produção teria decrescido continuamente ao longo dos anos 2000, deixando o país mais dependente da oferta externa.

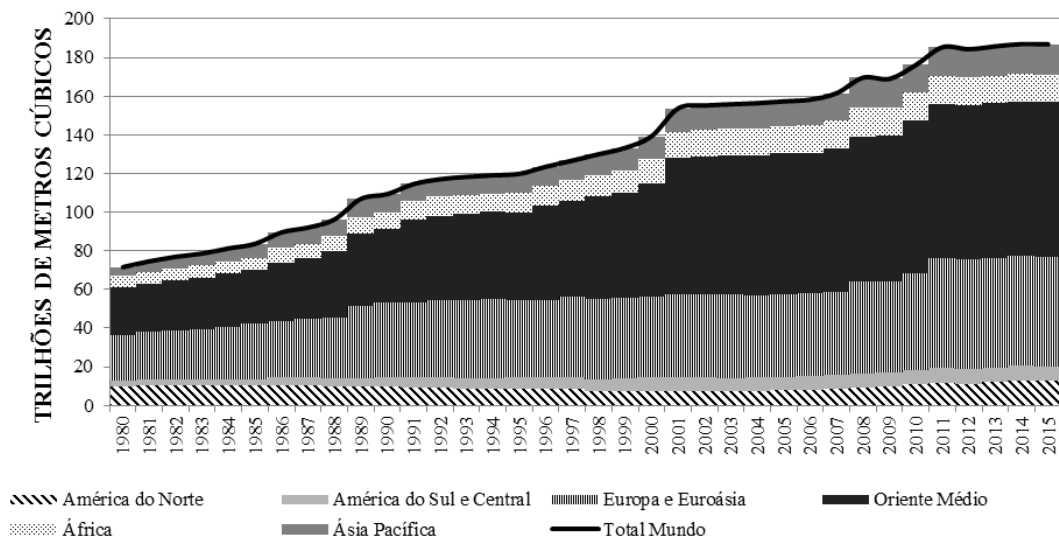
Gráfico 1 - Média da produção diária de gás natural em (BCF) nos Estados Unidos, por método de extração – 2000 a 2015



Fonte: U.S. Energy Information Administration (2016), com base dos dados de IHS Global Insight and Drilling Info Inc.

O domínio sobre a técnica do *Fracking* ilustra como o desenvolvimento tecnológico é capaz de influenciar as reservas. O aumento verificado na reserva mundial 1P, mostrado no Gráfico 2, sofreu grande influência da introdução do *Fracking*, principalmente em meados dos anos 2000 (INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH, 2012). Na mesma época, o processo de transformar o GN em líquido passou a ser utilizado em larga escala. O Catar tornou-se um dos maiores produtores de Gás Natural Liquefeito (GNL). Naquele país, a reserva 1P aumentou 79% entre 2000 e 2001, representando quase toda a variação do Oriente Médio. Lá, a variação da produção foi de 13% por três anos consecutivos, entre 1998 e 2000. Em 2004, a produção aumentou 25% e até 2011 teve aumentos percentuais de dois dígitos (BRITISH PETROLEUM, 2016).

Gráfico 2 - Evolução da reserva provada mundial de gás natural por grandes regiões – 1980 a 2015



Fonte: British Petroleum (2016)

O GN pode ser transportado da extração ao consumo através de dutos (*pipelines*), na forma gasosa, ou de *containers*, na forma líquida. Os dutos são impostos às restrições físicas e econômicas. São instalações permanentes que cruzam grandes distâncias e custam caro para serem instaladas e mantidas, exigindo uma relação longa e rentável entre todas as partes envolvidas ao longo do caminho percorrido. Isso é um grande desafio quando envolve países localizados em regiões politicamente instáveis. A oferta ainda sofre com a sazonalidade da demanda e de diferenciais de pressão ao longo do sistema, fatores que causam oscilação na renda, afetando tanto o retorno sobre o investimento quanto a manutenção. Essas fraquezas, intrínsecas deste tipo de distribuição, proporcionam, em sentido contrário, a robustez GNL, ou *Liquefied Natural Gas* (CONSIDINE et al., 2009; KUMAR et al., 2011).

A tecnologia que converte o GN em GNL em larga escala, a custos razoáveis para a oferta ao mercado, foi sendo conquistada nos anos 2000. A primeira tentativa atingiu o sucesso no século XIX, na Alemanha. Em 1958, uma embarcação experimental transportou GNL dos EUA para o Reino Unido. A primeira comercialização aconteceu em 1964, numa entrega da Argélia para o Reino Unido e a França. No final dos anos de 1990, havia nove plantas de produção de GNL no mundo. Em 2010, eram vinte e seis plantas produtivas em dezessete países. Na forma líquida, o gás é entregue a mercados para os quais o transporte por dutos seria impraticável. Essa forma de oferta também aumenta a segurança energética dos países consumidores, reduzindo o nível de dependência de um só fornecedor. A liquefação do

GN reduz o volume em 630 vezes e permite que ele seja manejado como o petróleo. Essa técnica se dá pelo resfriamento do gás a uma temperatura de -161°C . Ao final, o produto é menos denso do que a água. O processo como um todo é mais barato do que a construção de uma infraestrutura de dutos, tornando o GNL viável e competitivo. Como resultado, espera-se que a demanda dele cresça mais do que a do GN seco, como apontou Kumar et al. (2011).

O Japão é o maior importador de GNL. O país é carente de reservas naturais que sejam capazes de suprir a energia necessária para sustentar a demanda. A energia nuclear respondia por quase metade da produção própria. Após o acidente em Fukushima em 2011, quando as plantas nucleares foram desligadas, o índice de autossuficiência em energia primária caiu de 20% para 9%. A infraestrutura de dutos é limitada. Uma solução desejada é uma ligação direta com a Rússia, porém ela esbarra em restrições técnicas devido ao risco oriundo das instabilidades naturais da região. Com a demanda crescendo e a produção em rumo contrário, o país é obrigado a importar todo o GN na forma líquida. Essa condição é similar a da Coreia do Sul, que não tem nenhum gasoduto internacional. Apesar de não figurar entre os maiores demandantes de energia, é o segundo maior importador de GNL, justamente entre o Japão e a China, 3º colocado. Os países do leste asiático responderam por três quartos do consumo total de GNL em 2015 (CHUNPING et al., 2016).

O GN, ainda que um combustível fóssil e finito, produz menos gases do efeito estufa (*greenhouses gas*) ao gerar energia, comparativamente com o petróleo e o carvão. Sendo um combustível de baixo carbono, é reconhecido como aquele que fará a transição entre a Era do Petróleo, caracterizada por ter uma matriz primária composta por combustíveis poluidores, finitos e baratos, e uma era mais limpa e sustentável (CONSIDINE et al., 2009; ECONOMIDES e WOOD, 2009; HOWARTH, SANTORO e INGRAFFEA, 2011).

Apesar disso, o processamento do GN não é livre de riscos. Parte da água usada no processo de *Fracking* retorna com o gás, acompanhada de metano, que acaba solto no ar. Durante o processo de secagem, outros gases não desejados e nocivos ao meio ambiente são separados do produto final, quando também há a possibilidade de perdas para a atmosfera. Estes gases fazem parte dos denominados *greenhouses gas*, ou gases do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global. A extensão do dano para o meio-ambiente pode ser grande o suficiente para anular o benefício que o gás representa em relação ao carvão. Existem poucos trabalhos disponíveis que se propuseram a examinar os impactos negativos. É mais provável encontrar publicações que evidenciem os benefícios do GN (CONSIDINE et al., 2009; ECONOMIDES e WOOD, 2009; HOWARTH, SANTORO e INGRAFFEA, 2011).

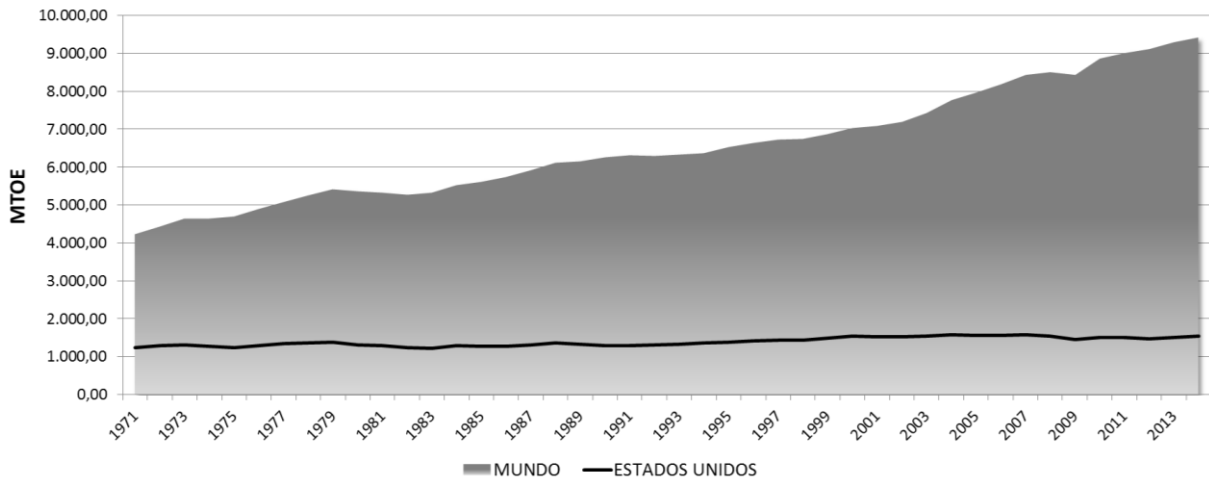
Howarth, Santoro e Ingraffea (2011) são dos poucos que tentam mensurar essa externalidade negativa. No artigo, estimam a perda total no processo de liquefação do GNL entre 3,6% e 7,9% do que se extrai das formações de *shale*, numa abordagem conservadora, segundo eles. Esses são números significativamente maiores do que os do GN convencional, que ficam entre 1,7% e 6,0%. Os impactos gerados para o efeito estufa, com base nos números divulgados por esses autores, são comparáveis com os causados pelo carvão e são maiores do que os do petróleo. Tecnologias têm sido desenvolvidas com o propósito de reduzir as externalidades do processo, mas ainda não são mundialmente difundidas nem comercialmente usadas, porque os custos ainda são significativos para o processo como um todo. Espera-se que instituições regulatórias atuem nesta questão, forçando as empresas a internalizar esses custos.

2.1.4 A energia primária nos Estados Unidos

Os Estados Unidos formam o país com a demanda por energia primária mais significativa mundialmente, com relativa estabilidade nos últimos 50 anos. Entre 1971 e 2014, o aumento do consumo americano foi de 25%, enquanto que a variação do consumo mundial foi de 122%¹⁴. O crescimento da demanda de outros países fez a participação do consumo americano no mundo cair de 29%, em 1971, para 16,3% em 2014, como ilustra o Gráfico 3 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

¹⁴ Os dados da IEA não contemplam os consumos dos países que compunham a União Soviética, anteriores a 1990, nem o consumo da China anterior ao ano 2000. Também não eram disponíveis informações posteriores a 2014, que permitissem comparação mais recente.

Gráfico 3 - Demanda de energia primária dos Estados Unidos e do resto do mundo – 1971-2014

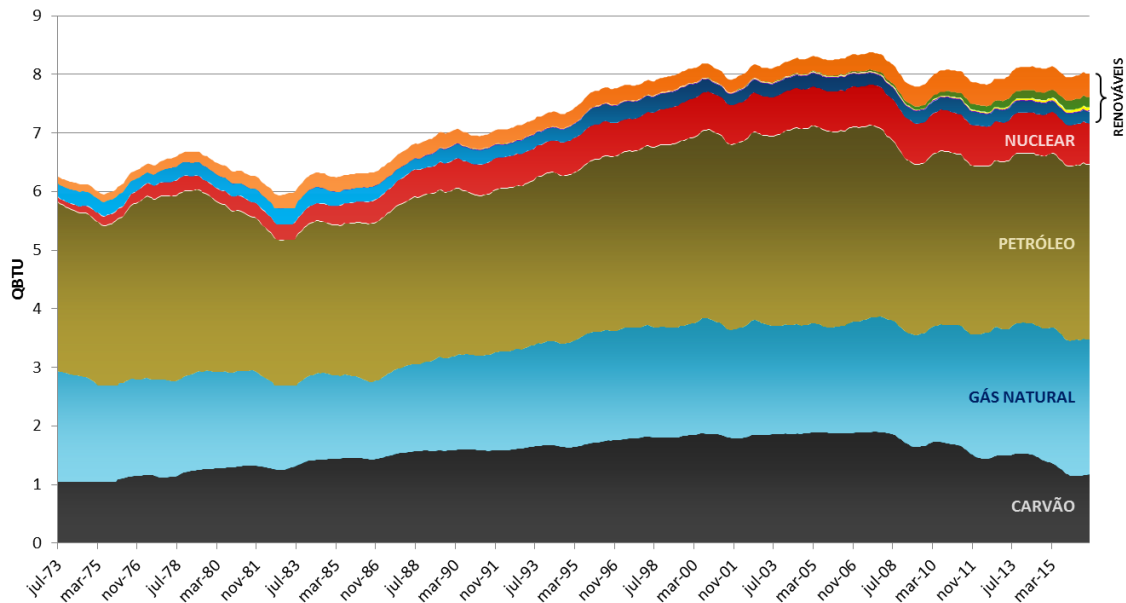


Fonte: International Energy Agency (2017)

Até 2008, os EUA eram o maior demandante de energia primária do mundo. Após uma queda de 5,2% em 2009, em relação ao ano anterior, a China ultrapassou os americanos. A amplitude da variação da demanda americana entre 2001 e 2014 foi de 9,4 pontos percentuais, com metade das observações no período sendo de variações negativas, demonstrando a tendência de oscilações em torno de um valor médio. Já a amplitude da variação chinesa, no mesmo período, foi de 13,2 pontos percentuais, com variações positivas em todos os anos, demonstrando ininterrupto crescimento. Esses dois movimentos colocados lado a lado, sugerem que a diferença entre os números dos dois maiores demandantes de energia primária do mundo deve aumentar. Em 2014, o consumo chinês já era 29,3% maior do que o americano, de acordo com os dados da IEA. Ainda que tenha perdido a primeira colocação, é exacerbada a diferença dos Estados Unidos para os demais países. Também em 2014, o consumo americano foi 420,3% maior do que o japonês, terceiro colocado, e 610,8% maior do que o alemão, quarto país no ranking.

As fontes primárias que supriram a demanda americana por energia são predominantemente fósseis, como fica claro no Gráfico 4. Em 1973, 93% dela foi atendida pelo petróleo, GN e carvão. Dentre os fósseis, o petróleo respondeu pela metade.

Gráfico 4 – Evolução da matriz energética dos Estados Unidos em quadrilhões de BTU, por fonte primária – jul/1973 a out/2016 ¹⁵



Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados da EIA (2017i)

A participação dos fósseis esteve em queda até o final dos anos de 1980. De agosto de 1989, quando esse percentual baixou de 86% pela primeira vez, até janeiro de 2008, ela teve um mínimo de 84,4% e um máximo de 86,5%, demonstrando grande rigidez nos fatores que supriram a demanda, considerando os números da EIA (2017i), dessazonalizados pela média geométrica móvel do período. Em julho de 2009, a participação foi de 82,9%. A queda mais significativa foi no consumo de carvão, que caiu ininterruptamente entre janeiro de 2008 e julho de 2009, em quase 14%. O consumo do petróleo seguiu o mesmo movimento, com queda de 9% ao longo dos dezoito meses. O GN teve pouca variação, com redução de 3%, porém alternando meses de queda com meses de alta. O consumo de energias renováveis não sentiu o impacto da crise econômica presente no período, registrando altas de 10%, 5%, 11%, 58% e 6%, para as fontes hídrica, geotermal, solar, eólica e de biomassa, respectivamente.

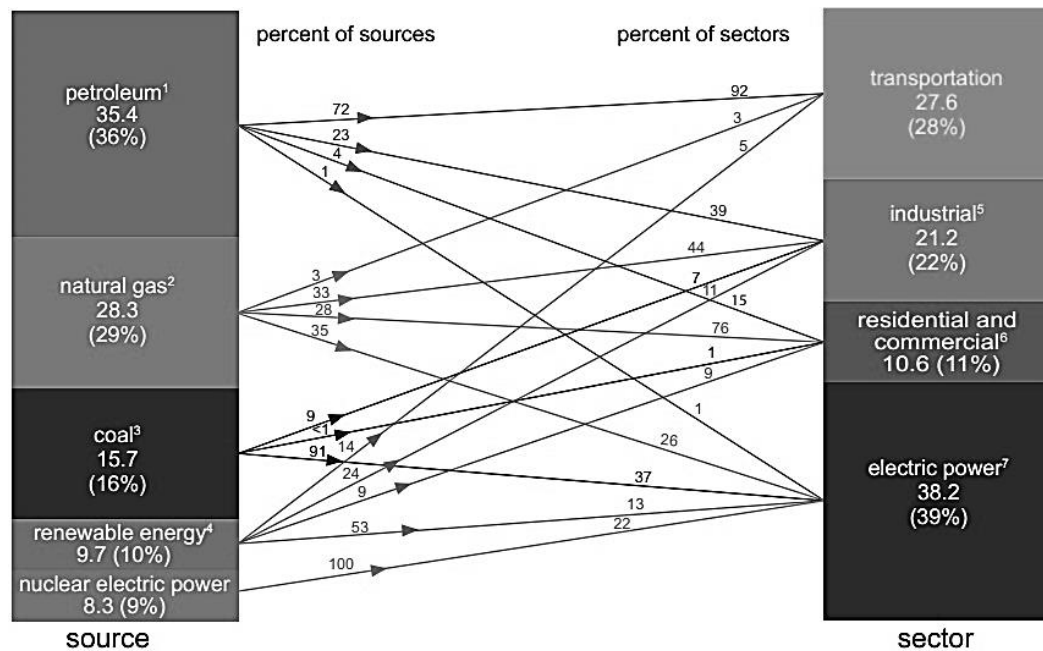
Dentre as fontes renováveis, a energia provinda de biomassa é a mais significativa. Ainda com base nos números da EIA, de 2003 a 2016, a participação desta fonte aumentou de 3% para quase 5%. Em seguida, a energia adquirida de recursos hídricos teve uma média de 2,6% no atendimento da energia primária entre 2000 e 2016. Essa participação era um ponto percentual maior ao longo da década de 1990. O crescimento da demanda verificado entre

¹⁵ Série temporal do consumo de energia primária por fonte da EIA, dessazonalizada pela média geométrica móvel, conforme metodologia sugerida por Hoffmann (2013).

1994 e 1997 foi neutralizado por uma queda de mais de 60% até 2001, quando passou a ficar relativamente estável até o final de 2016, próximo da demanda registrada no final dos anos 1980. A energia eólica teve a terceira maior participação dentre as renováveis, respondendo por 2,25% da demanda em outubro de 2016. Porém esse número é rigorosamente crescente ao longo da série, especialmente a partir de 2003. A energia solar possui modesta participação, inferior a 1% ao longo de toda a série, porém apresentando uma curva de crescimento com comportamento exponencial a partir de 2007. Em janeiro daquele ano, respondia por 0,06% de toda a energia consumida pelo país. Quase 10 anos depois, a demanda se multiplicou por cinco e a participação chegou a 0,64%. Finalmente, a energia geotermal respondeu por 0,23% da energia consumida em 2016.

Os destinos da energia gerada com fontes primárias podem ser vistos na Figura 2. A maior parte do petróleo (72%) consumido em 2015 teve como destino o setor de transportes. O GN teve o consumo bem distribuído entre os setores industrial, residencial e comercial, e de geração de energia elétrica. O carvão foi quase todo consumido na geração de energia elétrica, mesmo destino que tiveram as energias renováveis (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017).

Figura 2- Destino da energia primária nos Estados Unidos, por setor, em 2015



Fonte: Extraído de EIA (2017)

O início do século XX foi relativamente confortável para os EUA, quanto ao atendimento das necessidades de petróleo. O excesso de oferta era o problema, o que levou a criação da Texas Railroad Commission (TRC) em 1931, agência que determinava cotas de produção para os estados americanos e esteve ativa até 1971. O modo de funcionamento desta agência serviu de inspiração na criação da OPEP. Em 1965, a produção de petróleo norte-americano foi a maior do mundo, superando em quase duas vezes a produção soviética, segunda colocada, e em quase três vezes a produção da terceira colocada Venezuela. Isso representava um grande poder de barganha para os EUA no mercado internacional, bem como dava certa tranquilidade aos países europeus, que podiam contar com as reservas americanas para garantir o suprimento e a estabilidade dos preços. Em 1970, a produção atingiu um pico, com 11,297 milhões de barris por dia e declinou a partir dali, evidenciando um espaço entre a oferta e demanda internas, que passou a ser preenchido por produto estrangeiro, principalmente árabe (BRITISH PETROLEUM, 2016; TORRES FILHO, 2008).

Torres Filho (2008) destaca vários pontos significativos na linha histórica das relações que envolveram o principal combustível da energia primária mundial, o petróleo, na qual os EUA figuram com papel determinístico. Alguns deles são apresentados a seguir, contextualizando o cenário onde as preocupações do presente trabalho se desenvolvem.

Após a saída das tropas inglesas do Oriente Médio, depois do fim da Segunda Guerra Mundial, a liderança na região passou a ser disputada entre as forças locais. Irã e Arábia Saudita ganhavam força política com suas respectivas capacidades de extração. Foi também no início da década de 1970 que a produção iraniana chegou ao máximo, enquanto que a saudita manteve-se em constante crescimento, de acordo com os dados da BP (2016). Como maior fornecedora de petróleo para o ocidente, a Arábia Saudita conquistou força política que se mostrou decisiva nas negociações com os Estados Unidos, principalmente nas questões de desavenças entre países árabes e Israel. Em 1973, o Egito e a Síria lançaram ataques contra os israelenses, aliado dos EUA. Como consequência da guerra, os países árabes impuseram um embargo à exportação de petróleo para o ocidente e o preço no mercado internacional quadruplicou em menos de três meses. Os EUA se viram forçados a voltar novamente às mesas de negociação e buscar acordos emergenciais. No final daquele ano, conseguiram retomar os embarques do produto para a América. Esta fratura na economia mundial, causada pelo desabastecimento de petróleo, ficou conhecida como Primeiro Choque do Petróleo.

Com o suprimento normalizado, as transações de petróleo encontraram estabilidade sob o acordo firmado e mantido entre EUA, Arábia Saudita e Irã. Em 1978 a Revolução Iraniana desestabilizou o mercado internacional, diante da posição antiamericana dos líderes

xiitas que assumiram o país. A oferta iraniana, cerca de 5% do mercado mundial, foi subitamente cortada. As tentativas dos demais exportadores de conter os danos foram insuficientes. A demanda reagiu de forma mais do que proporcional, aumentando em 10%, dadas as medidas desesperadas das empresas em aumentar os estoques diante do momento de grande incerteza. O aumento no preço internacional foi inevitável e ali se instituiu outra grande crise econômica, denominada Segundo Choque do Petróleo.

Outros resultados dessa crise foram a busca por produtos substitutos ao petróleo, a racionalização do uso através de consumos mais eficientes e a entrada de fornecedores independentes. A própria crise econômica fez a demanda pelo recurso fóssil desacelerar, aliviando a pressão sobre a oferta. Esses resultados se tornaram mais tarde razões para que um terceiro choque do petróleo não se instaurasse em 1980, com o início da guerra entre Irã e Iraque. “Uma parte da redução da demanda do petróleo tinha origem estrutural. Era decorrente das políticas de conservação de energia desenvolvidas ao longo dos anos 1970. O aumento na eficiência em petróleo entre 1973 e 1985 atingiu 32% dos EUA” (TORRES FILHO, 2008, p. 207).

Após o Primeiro Choque do Petróleo, os EUA tiveram como ponto central das políticas públicas a independência energética. Em 1973 o projeto de ligar por gasoduto a extração de petróleo do Alasca até a baía de Prudhoe foi aprovado e materializado em cinco anos. Os quase 1.300 Km de extensão tem um potencial de transportar quase 2 milhões de barris de petróleo diariamente (U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, [S/D]). Este foi um dos incentivos para aumentar a produção nacional, que contemplava também a produção de GN, o desenvolvimento de pesquisa para a conservação de energia e o uso de combustíveis artificiais, principalmente a base de carvão.

A principal meta das políticas públicas sobre energia dos anos 1970, mais claras nos governos dos presidentes Ford e Carter, era estimular a produção nacional e frear a demanda, para conseguir o equilíbrio do mercado sem a dependência das importações. “[...] *Carter's National Energy Plan explained that his administration sought mechanisms to raise energy prices so that the 'price of energy should reflect its true replacement cost as a means of bringing supply and demand into balance over the long run'*” (BORDOFF, 2016, p. 187). Esta meta, porém, era combustível para debates interno. Muitos congressistas se opuseram à ideia, por temerem aumento dos preços internos. A desregulamentação dos preços só foi plenamente conquistada no início dos anos 1980, com o presidente Reagan continuando o plano do antecessor. O objetivo era fazer a mesma coisa com o GN, mas as resistências foram maiores. A desregulamentação e a eliminação dos subsídios, que levaram ao aumento dos preços,

foram conquistadas gradativamente e passaram por caminhos diferentes e mais complexos do que o petróleo.

O mercado de GN é historicamente mais complexo do que o mercado de petróleo. Duas razões importantes são o fato de o GN ser um subproduto do petróleo, por isso submetido aos movimentos do mercado desta *commodity* internacional, e as restrições físicas impostas à comercialização. As tecnologias que flexibilizam essa última restrição, como a liquefação do gás, sem a imposição de uma infraestrutura fixa, têm permitido ao GN desenvolver o seu próprio mercado. No início da década de 2000, quase todo GNL comercializado tinha o preço indexado ao do petróleo. Em 2015, essa indexação caiu para cerca de 70% do volume comercializado na Ásia e 60% na Europa. Nos EUA, os preços do GNL têm se relacionado com os preços *spot* Henry Hub. Este é o preço de entrada do produto nos EUA. Isso torna o GNL americano barato e competitivo no mercado internacional. Há uma tendência de aumentar as exportações americanas, numa abordagem diferente da que era encarada nos anos 1970 e 1980 (BORDOFF, 2016).

Outro ponto que destaca Torres Filho (2008) é a mudança que sofreu o mercado de energia. O governo americano se envolveu em um processo de desregulamentação do mercado interno. O petróleo passou a ser negociado na bolsa de mercadorias de Nova Iorque a preços futuros. Muitas empresas pequenas perderam competitividade e saíram do mercado, fechando as portas ou sendo incorporadas a outras maiores. Os produtores americanos não eram tão competitivos quanto os do Oriente Médio e sofreram mais quando os preços caíram. A flexibilização do mercado refletiu em uma volatilidade dos preços nos anos de 1980. A OPEP não conseguia mais manter controle sobre o preço internacional. A Arábia Saudita mudou a estratégia em 1985, deixando de ajustar a produção em função da manutenção do preço, para manter um nível fixo de produção, independente do preço de mercado. Como a grande volatilidade era indesejada, tanto para ofertantes como para demandantes, os EUA pressionaram para um acordo com a OPEP, onde um teto e um piso foram definidos para o preço do petróleo. Dentro deste intervalo, o preço poderia variar livremente¹⁶.

O fim da União Soviética consolidou a influência dos Estados Unidos no Oriente Médio. A invasão do Iraque ao Kuwait, em 1990, mostrou qual seria o papel dos americanos na região. Em resposta imediata à invasão, o preço internacional do barril dobrou quando a

¹⁶ Os EUA, buscando preservar os produtores nacionais, ameaçaram aumentar as taxas de importação do petróleo estrangeiro. Como resultado, os países da OPEP, os produtores independentes – especialmente a Inglaterra – e a União Soviética acordaram o preço de US\$18 por barril, baixo o suficiente para reaquecer o crescimento econômico mundial, e alto o suficiente para remunerar os produtores, especialmente americanos (TORRES FILHO, 2008, p. 213).

produção do Kuwait foi suprimida, mesmo com a tentativa de outros países de compensar o déficit, aumentando a produção. Mas foi em 1991, quando os EUA invadiram o Iraque, que o mercado voltou a normalidade e os preços voltaram aos patamares do ano anterior. Bases militares americanas se espalharam pela região, especialmente na Arábia Saudita, para garantir a fluência do suprimento deste combustível para o maior consumidor do mundo.

Em 1996 a demanda de petróleo americana teve a maior variação da década, aumentando em 3,3% em relação a 1995. Ao longo de toda a década, a demanda mundial cresceu mais do que a oferta, contribuindo para que em 1996 o mercado estivesse quase sem capacidade ociosa. Isso refletiu no aumento do preço, que já ultrapassava o teto da banda de variação. Como respostas, a Venezuela viu a oportunidade de aumentar a exportação para os Estados Unidos, indo contra as determinações da OPEP. Os demais países da organização também aumentaram a produção, na tentativa de reduzir o preço. Também nessa época, o petróleo Iraquiano, sob o controle da Organização das Nações Unidas (ONU), voltava a integrar o mercado. A quantidade de petróleo entregue ao mercado se deparou com a crise econômica dos países asiáticos que tomou proporções mundiais, e a crise russa logo na sequência. Como consequência do súbito desbalanceamento do mercado, o preço do barril despencou em quase 60% no final de 1998.

Após os ataques ao World Trade Center em 2001, nos EUA, a economia americana estagnou, com um crescimento real de 0,98%, interrompendo altas superiores a 4% que vinham desde 1997 (THE WORLD BANK, 2017). Com o consumo desacelerado, a variação da demanda de energia primária dos EUA se descolou do movimento mundial. Em decorrência do ataque, os EUA invadiram o Iraque em 2003 e se mantiveram fiéis à estratégia de manter controle direto sobre as regiões produtoras de petróleo. No entanto, a ocupação oficialmente encerrada em 2011, não conseguiu garantir a exportação do petróleo iraniano, segundo Oliveira (2012). A produção daquele país em 2003 caiu quase 40% em relação ao ano anterior. A recuperação, porém, ocorreu, ainda que lentamente. Em 2015, a produção foi a maior desde 1979, tendo sido quase o dobro em relação a 2002 (BRITISH PETROLEUM, 2016).

A crise de 2008 agravou a situação, levando a uma redução de 2,1% da demanda americana de energia primária em relação ao ano anterior (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017e). A demanda de petróleo acumulou queda de quase 11% entre 2008 e 2012, mesmo movimento seguido pela demanda de carvão, com variação negativa de 25% no mesmo período (BRITISH PETROLEUM, 2016). A demanda por GN não se mostrou sensível a crise, mantendo os movimentos de alta praticamente inalterados. A crise também

foi refletida nas importações. Em 2009 houve a maior variação negativa das importações desde a década de 1980, diminuindo 10% em relação a 2008, quando já tinha ocorrido uma queda de 4% em relação a 2007. É interessante observar nas importações que a partir deste ano, houve uma constante redução da participação dos membros da OPEP, tendo atingido a cota de 31% em 2015, frente a uma participação de 46% destes países nas importações de 2008 (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017k).

As estratégias das políticas energéticas dos EUA têm mudado em relação às dos anos 1970. Em vez de buscar a independência, há o reconhecimento de que a interdependência e a globalização dos mercados garante a segurança energética, segundo Bordoff (2016). O mercado é bem mais flexível do que era durante os dois choques do petróleo, quando os contratos eram de longo prazo e um choque externo causava transtorno imediato na economia do comprador. A redução nas exportações da Venezuela para os EUA entre 2002 e 2003, mostrou que o mercado americano consegue facilmente substituir certo volume de petróleo de outro fornecedor. A retirada de um ator importante do mercado em 2015, como aconteceu com o Irã no Segundo Choque do Petróleo, levaria a severos danos tanto para o comprador quanto para o vendedor, diminuindo as chances de isso acontecer. As políticas americanas têm buscado tirar as barreiras do mercado de energia impostas no passado, como a proibição da exportação americana de petróleo decretada em 1975 e retirada em 2015¹⁷ (WINGFIELD, 2015).

A interdependência também se aplica entre demanda e oferta nos EUA. Como maior produtor e maior consumidor de petróleo e GN em 2015 (BRITISH PETROLEUM, 2016; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017j), precisam conciliar as políticas econômicas dos dois lados, a dos produtores e dos consumidores, e essas com outras políticas ambientais e geoeconômicas, em relações de *tradeoff* e análises de custo e benefício. Como ilustração, quedas no preço do petróleo se relacionavam com aumentos no PNB americano em escala maior quando o saldo líquido das importações do país era maior. Em 2015, a queda nos preços deu pouca contribuição para o incremento do produto, porque os benefícios para os consumidores foram parcialmente anulados pelas perdas dos produtores.

2.1.5 O caso particular da China

¹⁷ Licenças especiais permitiam a exportação de alguns tipos de petróleo para países específicos antes de 2015, como para o Canadá.

Em 2009 a China se tornou o maior consumidor de energia primária no mundo, quando consumiu 2.378 MTOE¹⁸, contra os 2.375 MTOE que consumiu os EUA. Em 2014, o consumo dos chineses foi 22% maior do que o dos americanos, segundo a EIA, e 29% maior, segundo a IEA. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017e). Bildirici e Bakirtas (2014) já lembravam que 90% de todo o acréscimo mundial de energia primária em 2012 se concentrou na China e na Índia. A China sozinha consumiu em 2014 21,9% de toda a energia primária gerada no mundo, sendo 50,2% de todo o consumo mundial de carvão, 11,7% de todo o petróleo e 4,3% de todo o GN. Porém, além desses números, o que mais chama a atenção no caso da China é potencial de consumo futuro, em todos os combustíveis.

Em 2013, o consumo de GN seco ultrapassou o do Irã e o país se tornou o terceiro maior consumidor, apenas atrás dos EUA e da Rússia. Dez anos antes, figurava na 17ª posição do ranking mundial (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017f). Essa subida mostra a magnitude da aceleração da demanda, principalmente nos anos 2000. O crescimento percentual do consumo interno de GN, entre 2000 e 2014, foi de pelo menos 3 dígitos em todas as áreas: 129% no setor de construção, 960% no uso doméstico, 2.334% nos transportes e 514% na indústria. Esse último é o consumo mais significativo, tendo representado 65% do consumo total no país em 2014. Esse mesmo setor representou 81% do consumo total no ano 2000, mostrando que houve uma disseminação da possibilidade de uso deste combustível por outros setores da economia (NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA, 2017).

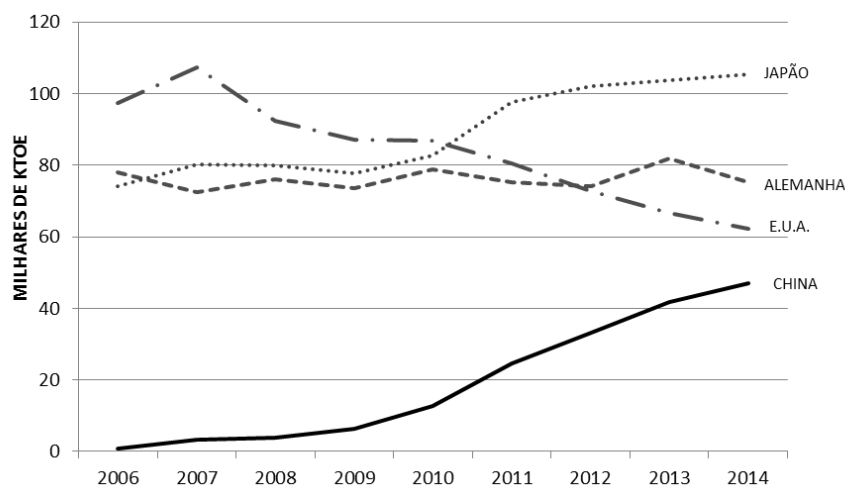
A busca pelo modelo soviético no final da década de 1970 fez com que o país perdesse a vantagem comparativa que vinha desenvolvendo na indústria desde a década de 1950, passando a privilegiar a produção intensiva em mão de obra, principalmente no campo, em detrimento da intensiva em energia. A atividade econômica no ano 2000 utilizava dois terços menos de energia por unidade de produto econômico em relação ao ano de 1978. Em 2002, a tendência da intensidade energética, medida em toneladas de carvão por milhão de RMB¹⁹ reais, se inverte e passa a ser crescente. A demanda de energia, puxada pelo crescimento da atividade econômica, aumentou em mais de 50% entre 2002 e 2006. A indústria pesada foi o principal motor desse crescimento, sendo as mais intensivas em energia a indústria de cimento e vidro, a metalúrgica e a química, respectivamente (ROSEN e HOUSER, 2007).

¹⁸ *Million Tons of Oil Equivalent*, ou milhões de toneladas equivalentes de petróleo.

¹⁹ Renminbi, moeda oficial chinesa.

Para atender a demanda, a China tornou-se um dos maiores importadores de GN, tanto na forma gasosa, através de gasodutos, quanto de GNL. Em 2014, ocupou a quarta colocação, atrás do Japão, da Alemanha e dos Estados Unidos, respectivamente. Foi o país que teve o maior crescimento a partir de meados dos anos 2000, bem ilustrado no Gráfico 5 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). Porém, tais números não significam que o país não possui reservas próprias.

Gráfico 5 - Volume de importação de gás natural dos quatro maiores importadores em 2014 – 2006-2014



Fonte: International Energy Agency (2017)

A China possui a maior reserva de *Shale Gas* do mundo, com uma reserva tecnicamente recuperável de aproximadamente 31,57 TCM²⁰ em 2014. Englobando todos os tipos de GN, possui a 13ª maior reserva provada do mundo e a maior na região asiática do Pacífico. Até 2006, o país era um exportador líquido deste combustível. A distância entre o consumo e a produção é crescente ao longo do tempo em função das distintas velocidades de crescimento entre um lado do mercado e o outro. Em 2015, foi a 6ª maior produtora deste combustível. A produção, no entanto, não consegue crescer com a mesma aceleração que o consumo, devido a gargalos internos. O futuro da demanda de gás neste país é motivo de preocupação mundial porque, apesar dos números volumosos com grande significância mundial, o GN representou apenas 5% da demanda chinesa por energia primária em 2015 (CHUNPING et al., 2016).

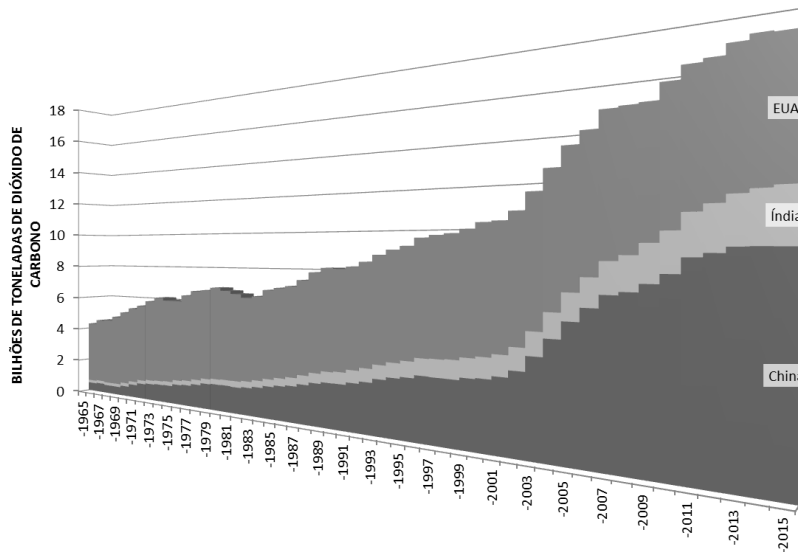
²⁰ Trillion Cubic Meters, ou trilhão de metros cúbicos.

O carvão é o principal combustível chinês, responsável por 63% da energia primária, segundo Nakhle (2016), 70%, segundo Chunping et al. (2016) e Silva e Rodrigues (2015), e 66%, estimado pelo autor²¹. Há uma grande disponibilidade deste recurso no país. Em 2015, a China tinha uma reserva provada de 114,5 bilhões de toneladas, o que corresponde a quase 13% do total mundial. Apenas os EUA tinham reserva maior, com 237,3 bilhões de toneladas (BRITISH PETROLEUM, 2016). Como principal consequência deste consumo, a China se tornou o maior emissor de dióxido de carbono no processo de queima dos combustíveis fósseis em 2006.

Nakhle (2016) sugere que a intensificação do uso do GN, em substituição ao carvão, é algo almejado no país como forma de reduzir os efeitos negativos desta externalidade ambiental. Um dos resultados, possivelmente motivado pela redução do preço do GN, foi um declínio – apesar de modesto – na emissão de CO₂ em 2015, o primeiro desde 1998. Neste ano mais recente, a maior redução de emissões aconteceu nos EUA. Na contramão desta tendência, a Índia, terceiro maior poluidor em 2015, foi o país com o aumento mais significativo das emissões deste poluente. Esses movimentos estão ilustrados no Gráfico 6. Outra possível explicação para a redução da poluição chinesa, segundo o mesmo autor, é uma desaceleração do crescimento econômico, atribuída à produção industrial, intensiva em energia. Em contraposição à primeira, essa justificativa não sugere uma modificação estrutural na forma de uso das fontes energéticas, mas um efeito colateral de uma pontual diminuição das atividades que demandam a queima de combustíveis sujos em relação aos anos anteriores. Para o futuro, o autor espera que o crescimento econômico chinês passe a se sustentar mais em serviços, menos intensivos no uso de energia, mantendo a tendência de redução das emissões de poluentes.

²¹ Com base no consumo de energia primária da EIA (2017e) e no consumo de carvão da BP (2016), ambos em MTOE, para o ano de 2013.

Gráfico 6 - Emissão de dióxido de carbono gerado na combustão dos combustíveis fósseis dos 3 países mais poluidores em 2015 – 1965-2015



Fonte: British Petroleum (2016)

A China mostra sinais de que pretende diversificar a matriz primária e ser menos dependente de uma única fonte. Silva e Rodrigues (2015) afirmam que a degradação ambiental é a principal ameaça ao desenvolvimento econômico, com base em uma declaração do ministro de meio ambiente chinês. Segundo esses autores, o país deve aumentar a participação de fontes limpas, através do estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias e pela redução dos preços das energias renováveis. Alguns números apresentados por Nakhle (2016) confirmam essa tendência: a China foi o maior produtor de energia a partir de fontes hídricas em 2015. Respondeu por quase a totalidade da variação positiva de hidroenergia no mundo naquele ano. Também foi lá que houve o maior aumento da produção de energia solar, levando o país a ocupar a terceira posição, atrás da Alemanha e dos EUA. Foi o segundo maior produtor de energia eólica, atrás dos EUA. O quinto maior produtor de bioenergia, atrás dos EUA, Brasil, Alemanha e França, respectivamente.

O desejo de substituir o carvão por outras fontes pode não se limitar às opções renováveis. Em 2008, a China tinha vinte e oito instalações nucleares em construção e em 2012 já contava com quinze reatores em funcionamento, segundo Antunes (2014). Ele entende que o crescimento econômico dos anos 2000 motivou o direcionamento de parte do programa nuclear militar para atender a fins civis. Dentre os benefícios da energia nuclear, estão o menor custo de manutenção em relação as usinas de extração mineral e a menor quantidade de urânio, em comparação com a quantidade de carvão ou petróleo, para gerar

uma mesma quantidade de energia. Os números da BP (2016) mostram que em 2015, enquanto o consumo de carvão teve uma contração de 1,5%, houve aumento no consumo de GN, com variação positiva de 4,7% em relação ao ano anterior, e de petróleo, que aumentou 6,3%. A última vez que o consumo de petróleo variou negativamente foi em 1990.

Zhang (2012), demonstrando grande preocupação com a segurança energética chinesa, defende que o país deve se intensificar no uso do combustível mais abundante, de forma a diminuir a dependência externa. Neste caso, o carvão. A estrutura produtiva na China, segundo ele, se desenvolveu tecnologicamente com base no uso do carvão e tem nessa fonte o principal pilar de sustentação da indústria. Os investimentos devem perseguir a substituição do petróleo e do GN por carvão, estimulando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar o carvão em gás e líquido, e que reduzam o potencial poluidor nas aplicações: “[...] *we need to work hard on coal gasification, liquefaction, clean coal technology, coal processing, a new application of liquid and gaseous fuels, etc.*” (p. 1410). Esta posição mostra que o debate interno sobre qual estratégia será perseguida pelo país ainda não está fechado.

As ações da China devem influenciar o setor de energia no mundo todo. O potencial de consumo futuro é imenso. A rápida aceleração na demanda de todas as fontes de energia mostra que o maior consumidor de energia primária em 2015 ainda tem muito espaço para aumentar suas influências. Chunping et al. (2016) apontam que a meta do governo chinês é que, até 2020, 10% da necessidade energética do país seja suprida pelo GN. Isso significa dobrar o consumo de GN registrado em 2015. Torres Filho (2008) afirma que “[...] uma aproximação entre os russos e a China, até mesmo o Japão pode [...] gerar temores ou aflições nos demais países; em particular nos EUA” (p. 223). Ersan (2015) lembra que as sanções impostas à Rússia, após a anexação da Criméia, estreitaram a relação entre eles e os chineses²², principalmente na questão energética. A Rússia tem uma grande dependência da energia que exporta. O projeto russo, denominado Power of Siberia, tem o objetivo de construir um gasoduto ligando a Sibéria até a região metropolitana de Pequim, podendo se estender para o Japão, Coréia do Sul e outros mercados asiáticos. Esse projeto estimularia enormemente o consumo de GN na China e, do outro lado, diminuiria a dependência que a oferta russa tem na demanda europeia.

O objetivo deste subcapítulo foi o de esboçar um cenário em escala global, com definições e interações entre países e os três combustíveis fósseis, objetos deste estudo.

²² A China foi o maior parceiro comercial da Rússia em 2014, com um volume de US\$88 bilhões negociado naquele ano (ERSAN, 2015).

Mostrou que o carvão foi o primeiro, dos três, a ter um papel significativo na matriz de energia primária, tendo sido o combustível da Revolução Industrial no final do século XIX. O aumento da demanda por petróleo se aliou ao aumento das reservas descobertas, o baixo custo relativo do processo de extração e a facilidade de transportar essa *commodity* por todo o mundo. Essas características fizeram do petróleo a principal fonte da energia mundial nos anos de 1970. Argumentou que o GN apresenta vantagens sobre os outros dois. Uma delas é o menor potencial poluidor. Outra, se refere às reservas, quando o avanço da tecnologia permitiu explorar o gás não-convencional, aumentando o tamanho delas relativamente às de petróleo. Permitiu também manuseá-lo na forma líquida, desatrelando a demanda de uma infraestrutura cara, complexa e obrigatória, a preços competitivos. Isso aumentou a segurança energética e criou a possibilidade deste combustível mediar a transição de uma matriz finita e suja para outra, mais limpa e renovável. Traçou um histórico sobre o papel da energia nos EUA, dos movimentos de mercado às estratégias geopolíticas nas relações internacionais. Essa revisão permitiu observar que o setor energético é visto com grande atenção pelos governos e que as políticas públicas são mutáveis ao longo do tempo. Por fim, mostrou que um país específico tem potencial para modificar todo o cenário de energia primária no mundo. A China, com um consumo extremamente acelerado por todas as fontes de energia, será determinante para o rumo político, econômico e ambiental, que o mundo seguirá no longo prazo, mas já sendo decisiva também no curto prazo. O subcapítulo seguinte faz um apanhado de trabalhos empíricos que trataram desses combustíveis de formas similares às que se propõe o presente trabalho.

2.2 Revisão de trabalhos empíricos

A energia possui duplo papel na cadeia de suprimentos, porque é tanto um bem de consumo final quanto um insumo no processo de produção de vários setores. É aproximando o foco na relação entre energia e produto econômico que Sari, Ewing e Soyta (2008) examinaram a relação entre o uso de energias desagregadas e a produção industrial nos EUA. Usando um modelo de vetores ARDL²³, identificaram uma relação direta entre o produto e as fontes de energia, com dados mensais entre 2001 e 2005. O produto e o trabalho se mostraram variáveis determinantes no consumo de petróleo e carvão, mas não de GN. Apergis e Payne

²³ Autoregressive Distributed Lag, ou vetores autoregressivos com defasagens distribuídas.

(2010), num painel de 67 países, identificaram a FBCF²⁴ e o crescimento econômico como variáveis explicativas do consumo de GN, com dados anuais entre 1992 e 2005. Houve uma relação bidirecional de causalidade entre o GN e o crescimento econômico, no curto e no longo prazo. Bildirici e Bakirtas (2014) concluíram que o petróleo e o carvão eram bens necessários para a China entre 1980 e 2011, com relações bidirecionais de causalidade. Para a Rússia, o petróleo apareceu como um bem normal e o GN como um bem necessário. Para este último, a relação de causalidade foi unidirecional, no sentido do PIB para o consumo de GN.

Hajko (2017) usou o termo Energy-Economy Nexus (EEN) para denominar trabalhos que fazem análises empíricas da relação entre energia e crescimento econômico. É uma área da literatura cujos resultados das pesquisas são, para autores desta linha, de importância fundamental no desenvolvimento de políticas que buscam mitigar o aquecimento global. Hajko teceu uma crítica aos trabalhos de EEN, partindo da ideia de que a base científica de qualquer teste de hipótese é o uso de uma teoria para fazer previsões que possam ser generalizadas para qualquer fonte de dados. Ele buscou identificar se existia alguma relação fundamental na EEN, ou se os resultados encontrados na literatura eram essencialmente amostras solitárias de peculiaridades estatísticas, nas palavras dele.

A principal preocupação da literatura da EEN é identificar relações de causalidade entre o consumo de energia e o crescimento econômico. O autor argumentou que os resultados empíricos nesta área são contraditórios e frequentemente irregulares, quando mesmo pequenas mudanças no período de tempo considerado levam a diferentes conclusões. Ele identificou a falta de uma teoria consensual para tratar do assunto e a falta de um padrão metodológico para lidar com os dados. A teoria microeconômica da produção não forneceria, segundo ele, uma explicação para a questão energética, porque não existe um consenso sobre a substituíbilidade da energia por outro fator. São encontrados muitos resultados empíricos diferentes, dificilmente comparáveis e com pouco ou nenhum embasamento teórico.

Para suportar a crítica, o autor criou um modelo de meta-análise, uma técnica estatística focada na agregação de resultados de estudos individuais independentes, para identificar – ou não – padrões de resultados na literatura da EEN. Um dos resultados do trabalho foi que a limitação por falta de dados é comumente citada nos trabalhos de EEN. O pequeno número de observações é muitas vezes contornado com o uso de dados em painel. Mas isso supõe uma homogeneidade dos grupos que nem sempre é verificada na prática, podendo causar viés na conclusão quando o recurso não for devidamente tratado. Outro ponto

²⁴ Formação Bruta de Capital Fixo

identificado foi que não havia consenso na especificação do modelo, quanto aos fatores considerados. Alguns usaram, além do fator energia, o trabalho, o capital e o preço. Outros, combinações bivariadas destes três ou apenas um deles acompanhou o fator energia. Dos 104 artigos, apenas 24 não omitiram preços e 60 deles não controlaram o resultado com a variação populacional. Apenas 13 fizeram abertura por setor, enquanto os demais trabalharam com dados agregados. Foram 72 os que usaram apenas um tipo de energia. Foi também constatado um viés de publicação, quando 91% dos trabalhos identificaram alguma forma de causalidade entre energia e crescimento econômico. Os outros 9% afirmavam a não existência de causalidade, levando o autor à sugestão de que trabalhos que apresentam resultados favoráveis têm mais chance de serem publicados, do que aqueles que concluem resultados desfavoráveis à hipótese. Um padrão sobre o sentido da causalidade entre as variáveis não ficou evidente. As outras conclusões foram as de que a maioria usa dados anuais, podendo ocultar/simplificar/desvirtuar os processos realísticos, que não é feito o tratamento de problemas estatísticos e que muitos trabalhos só funcionam com o consumo de energia agregado em unidades termais. O levantamento da dúvida sobre a validade dos resultados de trabalhos de EEN, como base da elaboração de políticas, foi mais no sentido de evidenciar que existe um déficit na coleta de dados, que deveria receber atenção especial dos governos, e que as especificações dos modelos deveriam ser mais bem trabalhadas. Ele frisa que não foi um objetivo diminuir a relevância da questão.

A maioria dos trabalhos que tratam da substituição entre combustíveis (*interfuel substitution*) utiliza o modelo Translog. Considine (1989) partiu da observação de que muitos apresentam resultados contra intuitivos, como valores positivos de elasticidade própria, o que denota uma relação direta entre preço e quantidade demandada. A primeira justificativa que ele apontou para tal constatação, foi a agregação demasiadamente genérica de vários tipos de combustíveis, geralmente forçada pela disponibilidade – ou falta – de dados. A agregação petróleo, por exemplo, acaba por englobar diversos tipos de produtos, de químicos a combustíveis. Outro fator muito negligenciado nesta temática são as políticas regulatórias, que são interferências fora das relações de mercado. O autor citou, como exemplos: as políticas de incentivo do governo americano na década de 1970, estimulando a substituição de combustíveis fósseis por alternativos, mesmo com o preço do GN sendo controlado; a meta de emissão de poluentes imposta para o petróleo e o carvão sem necessariamente haver taxaço sobre o preço. Outra justificativa a que ele dispensa grande atenção foi à seleção da forma funcional do modelo matemático. Ressalta que a teoria não prevê uma forma específica para lidar com o tema, mas que as formas funcionais flexíveis conseguem contornar a limitação

associada ao modelo de elasticidade de substituição constante (Constant Elasticity of Substitution, ou CES). Para mais de dois fatores (*inputs*), o modelo CES é muito restritivo, requerendo que a elasticidade parcial de substituição seja igual para todas as entradas, par a par. A função de custo Translog consegue eliminar tal restrição e por isso é muito utilizada na literatura para analisar a substituição entre combustíveis. No entanto, ela apresenta um comportamento coerente em apenas algumas relações relativas de preços, visto que em muitos casos as condições de quase-concavidade e a não-negatividade não são satisfeitas.

O objetivo do trabalho de Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010a) foi o de entender como o crescimento econômico, as políticas de governo e a implementação de novas tecnologias afetam a substituição entre os combustíveis petróleo, GN, carvão e eletricidade, nos setores Industrial, Residencial, de Transporte e de Geração de Energia Elétrica, em um painel de quinze países. Para tal, eles se valem da teoria da dualidade e de formas funcionais flexíveis, consistentes com a condição de regularidade da teoria microeconômica clássica.

Os autores partem de uma função de produção, onde o produto se dá em função dos insumos energia, trabalho, materiais, capital e tecnologia. Usam a teoria da dualidade para estimar a função de custos até desenvolverem equações de demanda para cada combustível. Para manter a comparação com outros trabalhos da literatura, utilizam uma função agregadora de preço tipo Translog, mas rejeitam o uso dessa metodologia por identificarem que ela viola a condição de regularidade. Resolvem esse problema utilizando o modelo Quadrático Normalizado (QN), que permite impor a condição de curvatura (concavidade) globalmente, diferente do modelo Translog, que só permite que isso seja imposto localmente. A base dos dados foi a International Energy Agency (IEA), identificada no presente trabalho como não sendo disponibilizada gratuitamente. O número de observações para cada país analisado foi de 27, do período compreendido entre 1980 e 2006. Os autores tiveram dificuldade em conseguir alguns dados para determinados países, como o preço do GN para a China, Índia, Itália, África do Sul, Tailândia e Turquia, ou o preço do carvão para o Canadá e a Venezuela. Nesses casos, eles optaram por eliminar do modelo o combustível cuja informação não era disponível. Eles também mencionaram a dificuldade de usar as 27 observações para a Alemanha, em função da unificação do país nos anos 1990. Testaram dois tipos de elasticidade de substituição, a ESA e a ESM. Alegam que a ESA se torna complexa quando há mais de dois fatores. Para este tipo de modelo, a ESM é mais adequada. Alguns dos resultados que eles observaram:

a) houve forte relação de substituição entre a eletricidade e o carvão quando variou o preço do carvão no setor industrial do Reino Unido;

b) houve fraca relação de substituição entre a eletricidade e o carvão quando variou o preço da eletricidade no setor industrial do Reino Unido;

c) houve fraca relação de substituição entre petróleo e GN, independente de qual preço variou, no setor industrial do Canadá, Japão e EUA;

d) houve forte relação de substituição entre o carvão e o petróleo quando variou o preço do petróleo no setor residencial da África do Sul;

e) houve fraca relação de substituição entre petróleo e GN, independente de qual preço variou, no setor residencial do Canadá, França e Reino Unido;

f) houve fraca relação de substituição entre a eletricidade e o petróleo quando variou o preço do petróleo no setor residencial do Canadá, da França, do Japão, dos EUA, da Turquia e da África do Sul.

De forma geral, observaram que houve evidências de substituição entre os insumos energéticos no setor industrial, mais nos países desenvolvidos do que nos em desenvolvimento. Nenhuma das relações de complementariedade indicadas por elasticidades negativas foram estatisticamente significativas, dando consistência às conclusões, que caminharam conforme eram esperadas. Concluíram que políticas de governo que foquem uma ação num setor específico (indústria, por exemplo) tendem a ser mais efetivas do que ações que foquem na economia de forma geral. Finalmente, apontaram que a substituição entre combustíveis fósseis ainda é bastante restrita, sugerindo que eles continuarão sendo fundamentais e de grande importância na matriz energética como um todo no futuro próximo.

Os mesmos autores (2010b) analisaram, num outro trabalho, a substituição entre combustíveis dentro da economia dos EUA. Os caminhos metodológicos seguidos foram os mesmos, partindo de uma função de custos conseguida aplicando a teoria da dualidade e estimando a função de demanda individual para cada combustível, através do Lema de Shephard. Os combustíveis analisados também foram os mesmos, petróleo, GN, carvão e eletricidade, para os setores Industrial, Residencial, Comercial, de Transporte e de Geração de Energia Elétrica. A forma funcional, diferente do anterior, foi o modelo Translog, dando atenção especial às condições de regularidade teórica, incluindo as restrições de positividade, monotonicidade e curvatura. A ESM também foi utilizada por ser mais adequada ao modelo com quatro insumos, mesmo caso do trabalho anterior. A fonte de dados desta vez foi a EIA, que por ter séries mais completas, permitiu que o modelo tivesse 48 observações anuais, de 1960 a 2007.

Os valores de elasticidade própria ao preço foram todos negativos, como esperado, e menores do que um, indicando que a demanda de todos os combustíveis é inelástica. A única

exceção foi vista na demanda de petróleo do setor residencial. O fato de os valores terem sido negativos validou o uso do modelo Translog, para os autores. Os valores da ESM entre os combustíveis foram todos positivos (exceção para a relação entre carvão e GN no setor industrial), apesar de baixos, sugerindo substituíbilidade entre os combustíveis. Houve evidência de forte substituição no setor industrial entre o carvão e a eletricidade, e o GN e a eletricidade, em respostas às variações de preço da eletricidade. Nos setores comercial e residencial, também houve forte evidência de substituição entre petróleo e eletricidade, independentemente de a variação no preço ter sido de um ou outro. Nos setores de energia elétrica e transportes, houve padrões de fraca separabilidade entre as séries, provavelmente explicada pela rigidez tecnológica de como as máquinas operam. Concluem que os combustíveis fósseis ainda terão papel importante no futuro próximo e que, no curto prazo, a transição para uma economia de baixo carbono dependerá de mudanças relativas de preços destas fontes de energia.

Serletis, Timilsina e Vasetsky (2011) investigaram a substituição entre o petróleo, o carvão, o GN e a eletricidade, tendo como diferencial nesse trabalho a análise de curto e de longo prazo, para um total de 15 países. Foram montados três painéis, distintos pelo nível de riqueza dos países, identificados por países de alta renda²⁵, países entre média-alta e alta renda e países entre baixa e média-baixa renda²⁶ (*high-income, upper-middle to high-income* e *lower-middle to low-income*). Eles utilizaram uma função QN de custos, afirmando que esta possui algumas vantagens em relação a uma função Translog. Os dados usados são anuais, entre 1980 e 2006, da IEA.

Para o cálculo da elasticidade, além das elasticidades-preço próprias e cruzadas, valeram-se da ESA e ESM para medir a substituíbilidade entre combustíveis. O método econométrico foi o de Mínimos Quadrados em 3 estágios (MQ3E), mas afirmam que os resultados obtidos foram os mesmos conseguidos com o método iterativo de Zellner. Os autores ignoraram as questões de regularidade econométrica, principalmente a exigência de estacionaridade das séries, entendendo que atendê-las significaria perder as exigências de regularidade da teoria econômica. Por exemplo, as equações de entrada e saída do produto econômico (*input-output*) não se mostraram estacionárias em nível. Mas diferenciá-las, ocultaria a relação de longo prazo (cointegração), captada se elas fossem rodadas em nível. "*For these reasons, in this paper we ignore econometric regularity issues and only pay attention to economic regularity.*" (p. 212). Para a análise de curto prazo, os autores

²⁵ Incluindo os EUA, o Japão e o Canadá.

²⁶ Incluindo a China.

estimaram equações temporais individuais para cada país. Agrupando os países nos painéis, conseguiram capturar os efeitos de longo prazo.

As elasticidades aos próprios preços foram todas negativas, indicando uma relação inversa entre demanda e preço. Elas também foram, na maioria, menores do que um nas análises de curto prazo, indicando inelasticidade da demanda. Quanto às elasticidades de substituição, no curto prazo, todas as relações para o Canadá foram de substituição. Houve uma fraca substituição entre eletricidade e petróleo (entre 0,10 e 0,29), independente de em qual combustível foi o choque de preço. A maior relação de substituição foi entre petróleo e GN (0,22), quando houve variações no preço do GN. Ainda para este país, o carvão não entrou no modelo pelo preço não estar disponível. Para o Japão, apenas entre o GN e o carvão, quando houve variações nos preços do carvão, e entre o petróleo e a eletricidade, quando houve variações nos preços da eletricidade, foi notada uma relação de complementariedade. Todas as outras relações foram de substituição, tendo sido as maiores entre o GN e o petróleo, 0,218 quando as variações foram no preço do petróleo, e 0,222 quando as variações foram no preço do GN. Nos EUA, apenas a relação entre GN e eletricidade, quando variações ocorrem no preço da eletricidade, são de complementariedade. Todas as outras são de substituição, sendo as maiores nas relações com o carvão e todos os outros combustíveis (entre 0,361 e 0,366), quando variaram os preços do carvão. Para a China, o GN não entrou no modelo por não ter sido possível encontrar os preços. Lá, o carvão e o petróleo apresentaram uma relação de complementariedade, e todas as outras indicaram substituíbilidade entre combustíveis. As maiores foram entre eletricidade e os outros dois combustíveis, quando as variações ocorreram no preço da eletricidade.

As relações de longo prazo apresentaram elasticidades maiores do que as respectivas de curto prazo. Nos EUA, por exemplo, houve forte substituíbilidade entre o carvão e o petróleo (1,137), quando variou o preço do petróleo. No outro extremo, forte relação de complementariedade entre o carvão e a eletricidade (-1,185)²⁷, quando a variação se deu no preço da eletricidade. Neste caso, os autores lembram que o carvão é um importante combustível para a geração de energia elétrica, o que justifica tal complemento. A relação de complementariedade entre GN e eletricidade, vista na análise de curto prazo desse país, se tornou uma relação de substituíbilidade no longo prazo.

Concluíram que a elasticidade no longo prazo tende a ser maior do que as respectivas de curto prazo. O carvão mostrou ser um combustível complementar a eletricidade, mas teve

²⁷ O valor negativo da ESM indica relação de complementariedade, enquanto que valores positivos indica substituíbilidade.

uma relação de substituíbilidade com os demais combustíveis. Todos os outros, petróleo, GN e eletricidade, tiveram coeficientes consistentemente inferiores a unidade, mostrando limitada possibilidade de substituição. Dessa constatação, os autores concluíram também que os combustíveis fósseis continuarão a suprir a maior parte da energia no futuro próximo. Finalmente, a substituição entre combustíveis parece depender mais da estrutura econômica do que do nível de renda e desenvolvimento dos países, já que diferenças significativas entre os painéis não foram notadas. E, pela substituição entre combustíveis ser limitada, a transição para economias de baixo carbono dependerá de grandes mudanças nos preços relativos.

Steinbuks e Narayanan (2015) organizaram o artigo de forma semelhante a Serletis, Timilsina e Vasetsky (2011). A diferença estava no critério para a formação dos painéis, onde a capacidade ou não de produzir os combustíveis internamente, sem a necessidade de importar, foi o ponto de determinação. Estimaram um modelo com dados em painel para 63 países, anuais de 1978 até 2008. Calcularam as elasticidades próprias, cruzadas e de substituição do carvão, GN, derivados de petróleo e eletricidade. Um diferencial desse trabalho é a exclusão de toda a energia consumida sem o propósito direto da geração de energia. Com essas elasticidades, responderam se havia substituição entre os combustíveis no setor industrial das economias, induzidas pelas variações de preços. Outro objetivo foi o de testar a influência dos fatores, além dos preços, com especial atenção ao potencial da produção de energia com recursos próprios.

Os autores afirmaram que é possível notar políticas de subsídios estimulando o uso da energia gerada pelo recurso mais abundante em cada país, bem como menores taxações sobre o consumo, em relação aos países que precisam importar, e menores preços da energia elétrica para o consumidor final. Esse tipo de política estimula o consumo e direciona os investimentos e o desenvolvimento tecnológico, para aqueles combustíveis que se tornam relativamente mais disponíveis e baratos. Por outro lado, cria uma rigidez à substituição por outras fontes ou a torna cara para ser implementada.

O modelo parte de uma função de produção com as entradas (*inputs*) carvão, GN, derivados de petróleo e eletricidade, assumindo que os custos com tais fatores correspondem a uma função de custos que atenda as exigências de regularidade. Utilizam a versão dinâmica de um modelo Logit, defendendo que este se ajusta melhor do que a forma Translog. O método econométrico foi o de Estimção Aparentemente não Relacionada com Interações não Lineares (Nonlinear Iterative Seemingly Unrelated Estimation).

Identificaram que o grupo dos países que possuem potencial para produzir energia com os três combustíveis fósseis próprios apresentam preços finais mais baixos para o

consumidor final do que o grupo que precisa importar. E o grupo que possui potencial de produzir energia com um combustível fóssil próprio ou dois, apresenta preços intermediários. O grupo dos que produzem os três combustíveis é mais intensivo no uso do carvão, do GN e da eletricidade, comparado aos que não possuem nenhum dos três. Não verificaram diferença significativa na intensidade do uso de derivados de petróleo ao longo dos painéis. De forma geral, a demanda por combustível respondeu às variações de preços no curto prazo, com cerca de dois terços das respostas ocorrendo dentro de um ano. Com exceção do grupo que não produz nenhum dos três combustíveis fósseis, os outros dois apresentaram reduções nas participações do carvão, do GN e dos derivados de petróleo, na matriz energética industrial, quando aumentou o nível do produto econômico. Dentre os que não produzem nenhum dos combustíveis fósseis, o aumento da produção industrial resultou no aumento da participação dos fósseis na matriz industrial. Os autores afirmaram que as mudanças tecnológicas seguem a direção dos derivados de petróleo para a eletricidade e o GN.

A demanda de todos os combustíveis se mostrou inelástica aos próprios preços, tendo os derivados de petróleo uma rigidez ainda maior do que o carvão e o GN. As elasticidades foram maiores nos grupos de países que produzem pelo menos um combustível fóssil do que no grupo que não produz nenhum. O coeficiente do carvão variou significativamente ao longo do painel. Apesar de não ter sido mencionado pelos autores, essa constatação mostra significativa não-homogeneidade nos usos dos recursos entre os países, crítica comum direcionada a trabalhos que utilizam dados em painel, como fez Hajko (2017). Quanto às elasticidades cruzadas, o GN e o carvão se mostraram mais flexíveis do que os derivados de petróleo e a eletricidade.

Concluíram que países que produzem pelo menos um dos três combustíveis fósseis apresentaram maior elasticidade de substituição e esse coeficiente aumenta ao longo do tempo. O tempo, neste caso, aparece como uma *proxy* do desenvolvimento tecnológico, com significância estatística para a conclusão de que tal avanço contribui para as possibilidades de substituição. Deixam claro que reduções nos subsídios relacionados ao petróleo levam a uma redução no consumo industrial deste combustível e dos derivados, o que acaba por estimular a substituição por outros combustíveis, sem afetar – ou afetando em menor magnitude – a produção industrial.

Steinbuks (2012) investigou a substituição entre combustíveis em quinze setores da indústria britânica. As delimitações de tais setores são processos de manufatura que utilizam derivados de petróleo, GN, carvão e eletricidade, unicamente para a geração de energia, e processos industriais que operem com pelo menos dois combustíveis, permitindo a

substituição. Com esses critérios, ele contemplou próximo de 50% do consumo de energia no setor industrial da Grã-Bretanha. O período da análise foi de 1990 até 2007. Ele a distingue em duas: uma utilizando dados agregados para todas as indústrias e outra considerando apenas indústrias com processos de aquecimento termal.

O autor apontou duas metodologias possíveis. A primeira aplica o lema de Shephard numa função de custos para extrair as funções de demanda e estimá-las em modelos Translog. A segunda vale-se de uma versão dinâmica do modelo Logit Linear. É essa opção que ele adota, defendendo que, por este caminho, consegue atender a condições da teoria econômica e ajustes mais realísticos com o estoque de capital e variações nos preços dos insumos. Ele utiliza o método econométrico Interativo não Linear de Estimações Aparentemente não Relacionadas.

De acordo com o autor, existem duas possibilidades dentro da teoria econômica que podem explicar a não substituição entre combustíveis. Uma, é uma restrição de oferta ou da tecnologia. Seria o caso, por exemplo, da infraestrutura de distribuição de GN que não alcança todas as indústrias, ou quando certo processo só opera com um combustível específico. A outra admite a possibilidade de substituição entre todos os combustíveis, em todos os processos. Quando o consumo de algum é zero, significa que houve a opção deliberada da firma por um comportamento que visasse à minimização de custos, levando-a a exercer uma solução de canto. Essa pode ser uma razão para que o padrão de consumo seja rígido em determinados segmentos.

Dentre os resultados, identificou que a demanda de combustível responde a variações dos preços, sendo 74% da resposta de longo prazo acontecendo no período de um ano. Viu que aumentos no produto econômico fizeram diminuir a participação do carvão e do GN na matriz energética industrial. A direção da mudança tecnológica leva à escolha por combustíveis a abandonar o GN e o carvão e à adoção de derivados de petróleo e eletricidade. Percebeu que os derivados de petróleo e a eletricidade são mais inelásticos às mudanças nos próprios preços do que o GN e o carvão, tanto no curto quanto no longo prazo. Já as elasticidades cruzadas mostraram que todos os combustíveis apresentaram relações de substituíbilidade, porém com valores muito próximos de zero. A demanda por carvão é inelástica no curto prazo, mas elástica no longo prazo. Serletis, Timilsina e Vasetsky (2011) também chegaram a resultados onde as elasticidades do carvão foram maiores do que os outros combustíveis. Já a demanda por carvão, apresenta-se inelástica ao preço no curto prazo, mas elástica no longo prazo. A demanda do GN foi inelástica, tanto no curto, quanto no longo prazo. As maiores elasticidades cruzadas são as do carvão, em resposta às variações

do preço do petróleo, e da eletricidade, em resposta às variações do preço do petróleo. A menor elasticidade ao próprio preço foi a do petróleo.

As elasticidades aos próprios preços e cruzadas foram maiores nas indústrias que usam aquecimento termal do que nos dados agregados de todas as indústrias. A eletricidade não aparece como uma opção aos combustíveis fósseis, nem nos dados agregados nem nos processos de aquecimento. As elasticidades de substituição, em resposta a aumentos nos preços, foram altas na análise dos dados agregados e baixas na análise de aquecimento termal. A conclusão é de que a substituição é mais favorável nos processos eletroquímicos, de geração de energia elétrica e de abastecimento de maquinário. O aumento dos preços dos combustíveis fósseis tem um efeito maior na substituição das fontes intensivas em carbono, petróleo e carvão, e um pequeno efeito na substituição entre combustíveis fósseis por eletricidade. O aumento de preços também impactará a substituição entre combustíveis de forma individualizada, se for acompanhada de algum avanço tecnológico no processo consumidor de energia. O autor ressalva que a análise do efeito que variações nos preços dos combustíveis fósseis causam na relação de substituição, carece de precisão, dada a limitação temporal dos dados disponíveis.

Zhang (2012) teve como objetivo analisar a substituição entre o capital, o carvão, o petróleo e o GN na China, no período de 1978 a 2005. O trabalho foi motivado pela preocupação com a segurança energética chinesa. Para o autor, a China deve buscar formas mais eficientes e limpas de aproveitar o carvão e usá-lo em substituição ao petróleo e GN, o que diminuiria a dependência externa nas fontes primárias de energia. Além disso, ele defende que, com o eminente esgotamento do petróleo e do GN, o carvão irá figurar como única alternativa.

O autor aponta uma ausência de trabalhos locais que tratem de medir a elasticidade de substituição, que ele tenta suprir, atribuindo razão às imperfeições do mecanismo de preços presente neste setor. O modelo usa uma função de produção do tipo Translog, onde o Produto (GDP²⁸) se dá em função do capital, carvão, petróleo e GN. Também é inclusa uma variável de tendência, cumprindo o papel de *proxy* dos avanços tecnológicos. Ele defende o uso da forma translogaritmica por ela conseguir se ajustar melhor ao sistema econômico do que uma função do tipo Cobb-Douglas, com elasticidade constante. Uma alta colinearidade entre as variáveis o direcionou a usar o método de regressão Ridge, que ele considera adequado para tratar esse problema. Ele identificou que a elasticidade de substituição do capital para o

²⁸ *Gross Domestic Product*, ou Produto Nacional Bruto.

carvão foi maior do que 1, indicando forte relação de substituição. A elasticidade de substituição do capital com o petróleo e o GN ficaram entre 0 e 1, indicando fraca relação de substituição, tendo sido a relação com o GN maior do que a com o petróleo. A elasticidade de substituição do carvão substituindo o petróleo foi maior do que 1, igual resultado para a relação do carvão substituindo o GN, sendo ligeiramente maior na relação com o petróleo. Ele identificou que uma unidade de capital pode substituir mais unidades de GN do que de petróleo. A TMST²⁹ entre carvão e petróleo, e carvão e GN, é crescente entre 1978 e 1995 e cai dali até 2005.

Como conclusão, ele identificou que o capital tem maior facilidade de substituir o carvão do que o petróleo ou o GN. Uma mesma quantidade de carvão substitui o petróleo mais facilmente do que o GN. Na interpretação da TMST, concluiu que uma unidade de capital substitui mais unidades de GN (entre 9 e 28 unidades) do que de carvão (entre 0,5 e 1,4 unidades), e mais unidades de petróleo (entre 1,2 e 2,7) do que de carvão. Uma unidade de carvão substitui mais do que duas unidades de petróleo (entre 1,88 e 3,05); e uma unidade de carvão substitui muitas unidades de GN (entre 15,5 e 30,4). Finalmente, ele sugere que o custo para substituir o petróleo com o carvão, ou o GN com carvão, deve diminuir com o rápido avanço científico e progresso tecnológico.

O objetivo do trabalho de Xingang e Pingkuo (2013) foi o de analisar o mercado de energia chinês, com dados anuais entre 1987 e 2009, na tentativa de identificar uma substituição dentre os tradicionais combustíveis fósseis, carvão e petróleo, por energia de biomassa. Utilizaram para isso as elasticidades de Allen e Morishima. Dentre os fósseis, não consideraram o GN. Essa opção levou em consideração que o carvão e o petróleo são os principais responsáveis pela poluição enfrentada pelas pessoas daquele país e representam o maior desafio para o atingimento das metas de emissão de carbono, com as quais a China se comprometeu na Conferência de Mudanças Climáticas de Copenhague em 2009. A metodologia partiu de uma função de custos do tipo Translog.

O modelo sofreu algumas modificações, não especificadas pelas autoras, para resolver o problema de autocorrelação nos resíduos. Esse tratamento foi necessário, dada a opção de utilizar o método de MQO³⁰. Calcularam a elasticidade ao próprio preço do carvão e do petróleo e encontraram uma grande volatilidade dos coeficientes ao longo da série, inclusive valores positivos, o que denota uma relação direta entre preço e quantidade demandada. Os coeficientes da energia de biomassa foram muito estáveis e coerentes (valores

²⁹ Taxa Marginal de Substituição Técnica. Esse conceito é apresentado na seção 3.1 (p. 48)

³⁰ Mínimos Quadrados Ordinários. A introdução desse conceito é feita na seção 3.4.

negativos). Em função da falta de relevância estatística e considerando também o desenvolvimento da indústria de biomassa, optaram por analisar a elasticidade-preço própria apenas no intervalo de 1997-2009, desconsiderando os dados anteriores. Identificaram características de bens inferiores na demanda do carvão e do petróleo, cujo aumento de preço foi acompanhado de aumento na demanda. Justificaram tal observação com: uma possível inércia da série temporal; possíveis restrições próprias ao modelo Translog; o padrão de crescimento econômico chinês, movido principalmente pelo investimento. Afirmaram que a demanda de petróleo e de carvão entram numa área não-econômica, por não terem o comportamento significativamente afetado por variações nos preços.

Observaram também que o aumento do preço do petróleo faz a demanda de petróleo aumentar, mas faz diminuir a demanda por energia de biomassa. Quando o preço da energia por biomassa diminui, a demanda por ela aumenta e a demanda por petróleo diminui, indicando que o setor industrial realiza a substituição do petróleo pela energia de biomassa. Essas mesmas relações foram observadas com o carvão, concluindo que a energia por biomassa é substituta do petróleo e do carvão. Essa relação de substituição, segundo elas, se torna mais intensa após 2008.

Concluíram que as demandas de petróleo e carvão apresentam características de bens inferiores e os preços sozinhos não são capazes de alterá-las. A energia por biomassa se caracteriza como um bem normal, indicando uma relação inversa entre preço e demanda. O carvão e petróleo se mostraram sensíveis às variações de preços da energia por biomassa, indicando que é possível promover uma substituição entre os dois combustíveis sujos por energia mais limpa, induzida pela redução do preço da biomassa. Essa sensibilidade é maior na demanda do petróleo do que na do carvão. A política chinesa de subsídios, favorecendo energias limpas, se mostra efetiva para esse processo de substituição, pelo menos no curto prazo. No longo prazo, a artificialidade do preço pode porventura mascarar ineficiências do processo de geração.

Chunping et al. (2016) testaram a substituição entre os combustíveis petróleo, carvão, GN e eletricidade, na China, no Japão e na Coreia do Sul. O modelo partiu de uma função de produção do tipo Translog, onde o produto (GDP) é função de seis insumos: capital, trabalho, carvão, petróleo, GN e eletricidade. Os dados contemplam o período de 1985 a 2012 para a maioria das variáveis.

A equação Translog apresentou um problema de multicolinearidade, o que levou os autores a utilizarem o método Ridge Regression, ao invés do MQO. Dentre os resultados, perceberam que o carvão e o GN apresentaram alta elasticidade de substituição na China e no

Japão; o carvão e a eletricidade apresentaram baixa elasticidade de substituição na China e no Japão; o carvão e o GN se apresentaram substitutos na Coreia do Sul; o carvão e a eletricidade se mostraram substitutos na Coreia do Sul, com valores maiores do que o par carvão - GN.

Os autores concluíram que, para cumprir o compromisso assinados por esses países, de reduzir a emissão de gases do efeito estufa, será necessário atender a demanda crescente de energia sem aumentar o uso do carvão e sem comprometer o crescimento econômico. É possível atender a estas condições através da substituição entre combustíveis. A elasticidade de substituição entre o carvão e o GN foi maior na China do que no Japão ou Coreia do Sul. Esse é um indicativo de que os chineses devem se tornar um consumidor de GN ainda maior do que já são. Ainda neste país, o GN apresentou valores de elasticidade de substituição maiores do que outros combustíveis, indicando que este é o caminho mais provável a ser seguido. Para o Japão e a Coreia do Sul, o aumento do uso do GN significa um aumento da dependência externa, um risco para a segurança energética deles. Essa pode ter sido a razão principal de terem observado valores menores da elasticidade de substituição em comparação com os da China. E, por isso, estes dois países devem focar mais na diversificação das fontes energéticas do que na redução do uso do carvão.

Este subcapítulo mostrou que a relação do GN com o crescimento econômico vem sendo objeto de estudo de autores do mundo todo, mas é possível encontrar crítica quanto a eficácia dos métodos mais utilizados, como apresentado em Considine (1989) e Hajko (2017). Se o fator energia é uma pequena fração do produto econômico – por isso difícil distinguir a real contribuição marginal dos efeitos meramente estatísticos – então buscar uma relação de substituição entre combustíveis parece prover resultados mais consistentes.

Sob a perspectiva ambiental, onde é desejada a diminuição do uso de combustíveis que contribuem para o aquecimento global, essa relação tem importância no contexto da busca por uma composição mais limpa da matriz energética. Sob a perspectiva econômica, a substituíbilidade se relaciona com a prudência em diminuir a dependência do consumo sobre um combustível, cuja limitação da reserva pode desencadear efeitos negativos severos na economia. A substituição entre combustíveis também é utilizada para se discutir a segurança energética dos países. Uma síntese dos trabalhos que analisaram a substituição entre esses fatores é apresentada no Apêndice A.

3 METODOLOGIA

Seguindo os autores Serletis; Timilsina; Vasetsky (2010a; 2010b) e Considine (1989), a metodologia para a determinação da elasticidade entre os fatores parte de uma função de produção da microeconomia clássica, em que o produto econômico se dá em função dos fatores de produção energia, trabalho, materiais e capital. A teoria da dualidade permite chegar à função de custos a partir de uma função de produção. A função de custos relaciona o preço dos insumos e o valor total da produção, dado um nível de tecnologia. Com ela, é possível captar as características das tecnologias da firma através dos movimentos de preços em um mercado livre, incorporando dados reais em modelos econométricos.

Do ponto de vista econômico, uma empresa que busca atingir determinado nível de produção adotará uma combinação de fatores que reduza o custo total ao mínimo. Esse é o primeiro pressuposto do qual partem os trabalhos citados e que se adota aqui. As empresas buscam produzir a maior quantidade pelo menor custo, presumindo a livre flutuação de preços dos fatores e do produto. Matematicamente, isso implica a minimização da função restrita de custo, condicionada a um nível específico de produto, expresso pela função produção. A condição para haver ponto de mínimo é que a derivada de primeira ordem seja zero e a matriz da derivada de segunda ordem seja negativa semidefinida (BARBOSA, 1985).

O custo total é determinado, na teoria clássica, em função dos preços unitários e quantidades dos insumos. A função de custo é homogênea de grau 1 nos preços, que são supostamente variáveis em um mercado competitivo e dados de forma exógena à firma. A quantidade de insumo (x_i) aplicada à produção, estando em função dos próprios preços (P_i), torna a quantidade do produto (Q) uma variável endógena: $Q = f(x_i)$ e $x_i = f(P_i)$, logo $Q = f(P_i)$.

O custo total é dado em função dos custos parciais de cada fator. Através do Lema de Shephard, é possível extrair a função de demanda parcial de cada um dos insumos (SANTOS, FIGUEIREDO e CASTRO, 2009, p. 151). Neste trabalho, eles são os combustíveis petróleo, carvão e GN.

A estimação econométrica do sistema de equações de demandas parciais fornece os parâmetros que serão incorporados nas equações da ESM. Os resultados destas elasticidades classificam a relação entre cada fonte, par a par, como substitutos, complementares ou independentes.

Os subcapítulos seguintes detalham os métodos resumidos acima.

3.1 Teoria da dualidade

A maximização de uma função implica encontrar o valor mais alto de uma variável endógena num comportamento determinado por variáveis exógenas, local ou globalmente. Da mesma forma, um problema de minimização consiste em encontrar o menor valor de uma variável endógena dentro de uma função. Problemas de otimização podem também estar condicionados a restrições denotadas por outras equações. Por exemplo, uma firma, objetivando o lucro e operando em situações normais de um mercado competitivo, busca maximizar a produção, porém tem à disposição uma quantidade finita de capital para custear o processo. Neste caso, o valor mais alto possível de ser atingido na produção estará limitado pela função renda da empresa.

Quando a função restrição deixa de ser uma igualdade e é apresentada por uma inequação, utiliza-se a programação matemática para encontrar a solução ótima. Essa programação pode ou não ser linear nas restrições, dando origem aos termos Programação Linear e Programação Não-Linear. Seguindo o desenvolvimento da ideia apresentada por Chiang (1982) e considerando que Q denote a quantidade de um produto que se deseja produzir ao máximo, utilizando para isso dois fatores de produção x_1 e x_2 , pode-se representar matricialmente:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar:} & Q = q'x \\ \text{Sujeito a:} & Ax \leq r \\ & x \geq 0 \end{array}$$

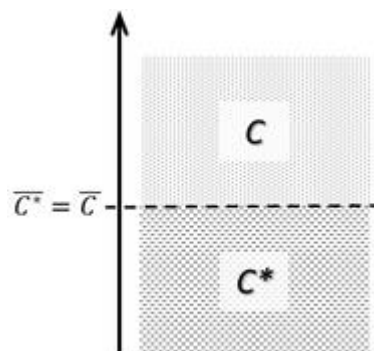
O vetor q indica os coeficientes da função objetivo, ou as quantidades utilizadas de cada insumo x_i , sendo x o vetor das variáveis de escolha. A matriz A indica os coeficientes das inequações de restrição e o vetor r os valores máximos que cada inequação está possibilitada a atingir, ou as quantidades de fatores disponíveis para a produção de bem. A última inequação impõe a condição de não-negatividade, fazendo com que a solução do problema ocorra no ortante não-negativo do espaço de n -ésima dimensão. A letra n , portanto, indica a quantidade de variáveis de escolha e denominar-se-á m a quantidade de restrições impostas ao programa, fazendo com que A seja uma matriz $m \times n$. Como a restrição é uma inequação, é permitida uma folga (num problema de maximização) ou um excesso (num problema de minimização) de algum fator no ponto da solução ótima. Pode-se utilizar toda a quantidade em estoque de um insumo ou qualquer quantidade inferior a este valor. Quando se abre a matriz A , verifica-se que $a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \leq r_1$. Simplificando para $a_{11}x_1 \leq r_1$, pode-se incluir uma variável auxiliar (s_i), que expressa o tamanho da folga/excesso, e representar a última sentença por

$a_{11}x_1 + s_1 = r_1$. Ou, matricialmente, $Ax + s = r$. Se toda a quantidade do fator x_1 for utilizada, $s_1 = 0$ e $a_{11}x_1 = r_1$.

Pensando graficamente, uma restrição divide o espaço E em dois. No exemplo da produção limitada a um valor finito de fatores em estoque, a restrição divide o espaço bidimensional ($n = 2$) em dois: um espaço E' acima da linha de restrição e outro espaço E'' abaixo da linha de restrição. O mesmo ocorrerá para m funções de restrição, o que definirá uma região possível F , onde estará contida a melhor solução para o problema. Essa região é um conjunto convexo fechado, ou seja, não apresenta buracos e pode-se ligar quaisquer dois pontos desta região por uma linha inteiramente contida dentro deste mesmo espaço. O objetivo da programação matemática é encontrar um ponto extremo da região F que tenha interseção com o minimando/maximando da função objetivo.

Para cada problema de maximização, existe um respectivo problema de minimização, e vice-versa. O problema original chama-se Primal, enquanto que o seu respectivo chama-se Dual. “[...] correspondendo a qualquer problema de minimização (minimização de C), sempre existe um programa de maximização (maximização de uma nova variável C^*) que é a sua contrapartida e que tem a propriedade de que $\bar{C}^* = \bar{C}$ ” (CHIANG, 1982, p. 585), e vice-versa. Ilustrativamente, pode-se pensar que as duas regiões fazem fronteira num espaço hipotético e que o valor mais baixo de C será igual ao valor mais alto de C^* , como demonstra a Figura 3. Esta é a teoria da Dualidade, que permite relacionar um problema de maximização com um problema de minimização, permitindo a resolução pelo caminho menos complexo.

Figura 3 - Ilustração do encontro hipotético das regiões possíveis da função objetivo C no problema Primal e da respectiva função C^* no problema Dual



Fonte: elaborado pelo autor

Na Teoria Microeconômica da Produção, uma função produção permite encontrar o valor máximo de produto que pode ser atingido a partir da relação mais eficiente entre os fatores de produção, limitado pela disponibilidade de capital para financiá-la. Por expressar

tal relação, diz-se que a função produção descreve a tecnologia da firma. Segundo Pindyck & Rubinfeld (2006), tecnologia pode ser definida como “[...] determinado grau de conhecimento a respeito dos diversos métodos que poderiam ser utilizados para transformar insumos em produtos” (p. 161). Como há custos para adquirir os fatores, alcançar o valor máximo de produção terá, por outro lado, a busca pelo menor custo possível, limitada pela quantidade mínima de fatores necessários para realizar a produção ao nível máximo. A função de custo total se dará em função do nível de produto e dos preços dos insumos.

Se a função produção é contínua, ou seja, todos os níveis de produto puderem ser atingidos com a tecnologia vigente, então é possível encontrar a solução para o problema de custo mínimo. Em outras palavras, a partir da Teoria da Dualidade, a maximização de uma função de produção está intimamente ligada a minimização de uma função de custo (DIEWERT, 1998). Desta forma, como ressaltado por Pindyck e Rubinfeld (2006), a função de custo será também capaz de representar o nível de tecnologia da firma, tanto quanto a respectiva função produção.

Para que a Teoria da Dualidade seja aplicada na Teoria da Produção, uma função de produção f que tenha como quantidade de produto Q , precisa atender a três pressupostos (DIEWERT, 1998; FARIAS, FIGUEIREDO e ARAÚJO, 2014):

- a) o volume de produção Q deve ser possível de ser atingido pela tecnologia corrente, ou a função de produção f deve ser contínua para todo Q ;
- b) a função de produção f deve ser não-decrescente nos fatores; para aumentos nas quantidades dos insumos x_i , o produto Q não deve diminuir;
- c) a função de produção f deve ser quase-côncava; para todas as possibilidades de Q dentro da função f , a quantidade de insumos $f(x)$ deve ser igual ou maior que Q .

Se a respectiva função dual de custos c atender aos sete pressupostos seguintes, ela expressará o custo mínimo com os fatores dado pelos seus preços unitários (DIEWERT, 1998; BRAGAGNOLO et al., 2009; FARIAS, FIGUEIREDO e ARAÚJO, 2014):

- a) c é uma função não-negativa;
- b) c é linearmente homogênea nos preços dos insumos;
- c) dados aumentos nos preços dos insumos, o custo mínimo para produzir a quantidade Q não diminuirá;
- d) c é côncava nos preços para todo Q dentro da função f ;
- e) c é contínua nos preços para todo $Q \in f$;
- f) c é não decrescente em Q para preços fixos dos insumos;
- g) para aumentos nos preços dos insumos, c será contínua na segunda derivada.

A função de custos cumpre as condições de regularidade necessárias para se derivar as funções de demanda dos fatores, encontradas diferenciando c pelos respectivos vetores de preços dos fatores, sem a necessidade de computar a recíproca função de produção. Este lema, apresentado inicialmente por Shephard em 1953 (por isso carrega o seu nome), é mais factível do ponto de vista econométrico do que definir e estimar a função produção Primal e dela derivar a função de custo Dual (DIEWERT, 1998; SANTOS, FIGUEIREDO e CASTRO, 2009). Em outras palavras, é possível ir direto à função Dual de custo, restrita a uma função produção, para obter as demandas parciais dos insumos.

3.2 Forma Funcional da Função de Custos

As funções do tipo CES são as mais usadas nas análises econômicas, sendo o tipo específico Cobb-Douglas o mais difundido e explorado na literatura (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004; CHIANG, 1982). A elasticidade de substituição (ES) entre os fatores em uma função Cobb-Douglas é constante e unitária. No caso de uma função mais genérica de CES, a ES (σ) depende da constante (ρ), ou $\sigma = f(\rho)$, sendo o parâmetro ρ oriundo da formulação geral da função CES (BARBOSA, 1985). As variáveis K e L representam dois fatores de produção, como capital e trabalho, respectivamente:

$$Q = \gamma[\delta K^{-\rho} + (1 - \delta)L^{-\rho}]^{-\nu/\rho} \quad (01)$$

As formas funcionais CES ainda assumem que os insumos sejam separáveis. Uma função é dita separável se a Taxa Marginal de Substituição (TMS)³¹ entre dois insumos for independente da quantidade empregada em outro arranjo de combinações (BERNDT e CHRISTENSEN, 1973). A separabilidade está relacionada com a independência da relação de substituição de um conjunto de insumos em relação a outro conjunto. Os insumos i e j são separáveis do insumo k se a TMS entre i e j for independente da utilização de k (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004). Formas funcionais flexíveis não apenas eliminam tal restrição, como permitem testá-la. Matematicamente, pode-se testar a separabilidade derivando a TMS em função do preço do insumo k , que se espera exógeno. Se a derivada retornar zero, significa que o conjunto $[i, j]$ é separável de k .

³¹ TMS é a razão entre as variações na demanda de cada fator dentro de uma função de produção, ou $-\Delta x_2/\Delta x_1$ (CASTRO, FIGUEIREDO, et al., 2009), que adaptando a uma função custo, poderia ser expressa por $\frac{\partial c/\partial p_j}{\partial c/\partial p_i}$.

A Função Transcendental Logarítmica, ou Translog, é a função flexível mais utilizada para testar a relação de substituíbilidade entre fatores (CONSIDINE, 1989; GREENE, 2002; SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010a; SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010b). Ela permite que todas as equações estimadas sejam lineares nos logaritmos, proporcionando uma facilidade computacional. Ela não impõe restrição na possibilidade de substituição entre os fatores, possibilitando que a curva de custo assuma o formato de “U” (FARIAS, FIGUEIREDO e ARAÚJO, 2014). É formada aplicando-se a expansão de Taylor em torno de um ponto $x = x_0 + \delta$, sendo δ o desvio em relação à origem (x_0), tornando a função generalizada $f(x) = \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n$ para o polinômio de n -ésimo grau (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004; CHIANG, 1982).

Tomando uma função de produção onde a quantidade é determinada por dois fatores (K e L), é possível ilustrar a função Translog de forma genérica (BARBOSA, 1985):

$$Q = e^{f(K,L)} \quad (02)$$

Christensen (1971, p. 255) mostrou que funções do tipo CES são particularidades de uma função do tipo Translog, mais genérica e flexível. Considerando uma função de produção (f), dada pelos fatores consumo (S), investimento (I), capital (K) e trabalho (L), e por um índice de produtividade (A), ele fez a primeira menção a este tipo de função:

$$\begin{aligned} \ln f = & \alpha_0 + \alpha_I \ln I + \alpha_S \ln S + \beta_K \ln K + \beta_L \ln L + \alpha_A \ln A + \frac{\gamma_{AA}}{2} (\ln A)^2 + \\ & \frac{\gamma_{II}}{2} (\ln I)^2 + \frac{\gamma_{SS}}{2} (\ln S)^2 + \gamma_{IS} \ln I \ln S + \gamma_{IA} \ln I \ln A + \gamma_{SA} \ln S \ln A + \frac{\varepsilon_{KK}}{2} (\ln K)^2 + \\ & \frac{\varepsilon_{LL}}{2} (\ln L)^2 + \varepsilon_{KL} \ln K \ln L + \varepsilon_{KA} \ln K \ln A + \varepsilon_{LA} \ln L \ln A + \delta_{IK} \ln I \ln K + \\ & \delta_{IL} \ln I \ln L + \delta_{SK} \ln S \ln K + \delta_{SL} \ln S \ln L = 0 \end{aligned} \quad (03)$$

A ilustração a partir dessa função de produção é útil para mostrar a origem da função de custo (c) Translog. De acordo com Barbosa (1985), expressando c na forma Translog, com n fatores de produção e desenvolvendo a matemática, chega-se à expressão genérica:

$$\begin{aligned} \log c = & \log \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \log P_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \log P_i \log P_j + \sum_{i=1}^n \delta_i \log q \log P_i \\ & + \beta_1 \log q + \frac{1}{2} \beta_2 (\log q)^2 \end{aligned} \quad (04)$$

A variável P_i (ou P_j) é o custo unitário do i -ésimo (ou j -ésimo, sendo $i \neq j$) fator de produção, q é o nível de produção e as letras α , γ , δ e β representam os parâmetros alvos das estimações e análises.

Além de homogênea de grau 1 nos preços, a função de custo deve ser contínua para que seja diferenciável. Derivando a função custo pelo fator i , obtém-se a demanda condicionada desse fator. Isso é conseguido aplicando o Lema de Shephard. A função de demanda condicionada é homogênea de grau 0, implicando que uma variação nos preços dos fatores, mantida a relação entre eles, não altera a demanda. A função de custo deve atender também a função de monotonicidade, quando a curva de custo é não-decrescente nos preços, o mesmo que dizer que as parcelas de custos são não-negativas. No entanto, é possível e esperado que um aumento no custo do fator leve a aumentos decrescentes no custo total por causa da possibilidade de substituição entre fatores. Essa é a condição de concavidade, verificada com a matriz Hessiana Orlada, composta das derivadas de primeira e segunda ordem em função dos preços, sendo negativa semidefinida. Ela também é simétrica, onde $\frac{\partial x_i}{\partial P_j} = \frac{\partial x_j}{\partial P_i}$ sendo x_i e x_j as demandas condicionais dos fatores i e j , e P_i e P_j os respectivos preços, para $i \neq j$ (BRAGAGNOLO et al., 2009; CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004).

Sejam os retornos de escala constantes em uma função de custo total indireto $c = f(p, Q)$, onde p é o vetor de preços e Q denota a quantidade produzida, a função pode ser reescrita por $c = f(p) * Q$. Dividindo-se os dois lados da equação por Q , obtém-se (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004):

$$C = f(p) \quad (05)$$

A variável C agora representa o custo unitário ou custo médio mínimo de longo prazo. Representado numa função Translog genérica, custo médio em função dos preços dos fatores, tem-se:

$$\ln C = \beta_0 + \sum_i \beta_i \ln P_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} \ln P_i \ln P_j \quad (06)$$

Tornando a equação mais específica para três fatores e considerando a condição de simetria, a função torna-se:

$$\begin{aligned}
\ln C = & \beta_0 + [\beta_1 \ln P_1 + \beta_2 \ln P_2 + \beta_3 \ln P_3] \\
& + \left[\frac{1}{2} \beta_{11} (\ln P_1)^2 + \beta_{12} (\ln P_1) (\ln P_2) + \beta_{13} (\ln P_1) (\ln P_3) \right] \\
& + \left[\frac{1}{2} \beta_{22} (\ln P_2)^2 + \beta_{23} (\ln P_2) (\ln P_3) \right] + \left[\frac{1}{2} \beta_{33} (\ln P_3)^2 \right]
\end{aligned} \tag{07}$$

Se a condição de simetria não for imposta previamente, acrescentar-se-ia o termo $\beta_{21} (\ln P_2) (\ln P_1)$ dentro do terceiro colchetes, podendo-se testar se $\beta_{21} (\ln P_2) (\ln P_1) = \beta_{12} (\ln P_1) (\ln P_2)$. Da mesma forma, no quarto colchetes, acrescentar-se-ia o produto dos logaritmos naturais de P_1 e P_3 , vezes a constante β_{31} e o produto dos logaritmos naturais de P_2 e P_3 , vezes β_{32} . Neste caso, testar-se-ia se $\beta_{31} = \beta_{13}$ e se $\beta_{32} = \beta_{23}$. Se os testes sugeridos mostrarem que os coeficientes são iguais par a par, a equação (07) é suficiente e a condição de simetria é confirmada.

3.3 Equações de Demandas Parciais

Partindo da análise dual, que considera a minimização de uma função de custo restrita a um volume de produção, chega-se à função de demanda condicionada dos fatores aplicando o Lema de Shephard. Matematicamente, a função de demanda é obtida derivando a função custo em função do preço do fator (CASTRO, TEIXEIRA, et al., 2009). Considerando a equação (07), tem-se que:

$$\frac{\partial C}{\partial P_i} = x_i \tag{08}$$

A variável x_i representa a demanda condicionada do fator i . Tomando as funções em logaritmos, de forma alternativa, obtém-se a parcela de custo do fator, desde que assumindo que os retornos de escala são constantes (GREENE, 2002).

Como $\partial \ln C = \frac{1}{C} \partial C$ e $\partial \ln P = \frac{1}{P} \partial P$, chega-se a parcela de custo do fator x_i , indicada por S_i (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004):

$$\frac{\partial C}{\partial P_i} \frac{P_i}{C} = \frac{x_i P_i}{C} = S_i \tag{09}$$

Tornando o caso específico para três fatores, é possível identificar a parcela de custo de cada um:

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_1} = S_1 = \beta_1 + \beta_{11} \ln P_1 + \beta_{12} \ln P_2 + \beta_{13} \ln P_3 \quad (10.1)$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_2} = S_2 = \beta_2 + \beta_{21} \ln P_1 + \beta_{22} \ln P_2 + \beta_{23} \ln P_3 \quad (10.2)$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_3} = S_3 = \beta_3 + \beta_{31} \ln P_1 + \beta_{32} \ln P_2 + \beta_{33} \ln P_3 \quad (10.3)$$

Estas são equações de parcelas de custo, o que significa que $\sum S_i = 1$. Também se deduz que $\sum \beta_{ij} = 0$ em cada equação e que $\sum \beta_i = 1$ dentro do sistema. É mais fácil entender tal dedução observando que β_i é o intercepto e, neste ponto, o valor dos parâmetros β_{ij} é zero. Essas restrições impõem a condição de homogeneidade linear da função de custos no preço dos fatores. Pela condição de simetria, conclui-se que $\sum \beta_{ij} = \sum \beta_{ji} = 0$.

Castro, Teixeira e Figueiredo (2004) lembram que, como $\sum \beta_i = 1$, a matriz de covariância será singular, o que impede estimar as equações como apresentadas acima. Uma solução é eliminar uma delas, utilizando um sistema de $n - 1$ equações.

Sustentando pela condição de homogeneidade, em que $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$, pode-se dizer que $\beta_3 = 1 - \beta_1 - \beta_2$. E, de forma mais geral, que $\beta_{i3} = -\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \beta_{ij}$. As equações de participação dos três fatores se expressam em duas equações normalizadas pelo preço do terceiro fator:

$$S_1 = \beta_1 + \beta_{11} \ln P_1 + \beta_{12} \ln P_2 - (\beta_{11} \ln P_3) - (\beta_{12} \ln P_3) \quad (11.1)$$

$$S_2 = \beta_2 + \beta_{21} \ln P_1 + \beta_{22} \ln P_2 - (\beta_{21} \ln P_3) - (\beta_{22} \ln P_3) \quad (11.2)$$

Como, pela regra do logaritmo, $\beta_{11} \ln P_1 - \beta_{11} \ln P_3 = \beta_{11} \ln \left(\frac{P_1}{P_3} \right)$ (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004), as equações tomam a forma:

$$S_1 = \beta_1 + \beta_{11} \ln \left(\frac{P_1}{P_3} \right) + \beta_{12} \ln \left(\frac{P_2}{P_3} \right) + \varepsilon_1 \quad (12.1)$$

$$S_2 = \beta_2 + \beta_{21} \ln\left(\frac{P_1}{P_3}\right) + \beta_{22} \ln\left(\frac{P_2}{P_3}\right) + \varepsilon_2 \quad (12.2)$$

Os termos estocásticos ε_i , ruídos brancos com distribuição normal, variância constante e média igual a zero, permitem que as equações sejam estimadas num modelo econométrico.

3.4 Cálculo das elasticidades

Assumindo que para produzir todo e qualquer produto são necessários fatores de produção, pode-se indicar matematicamente que $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde Q expressa a quantidade máxima de produto que pode ser produzida num período, dados os usos de x_i unidades dos fatores $i = 1, 2, \dots, n$, sendo o vetor x as quantidades dos mesmos. As firmas são demandantes dos fatores no mercado e por isso a produção torna-se sensível a variação nos preços desses insumos. Sendo a demanda individual de cada insumo sensível ao próprio preço e indicada por $x_i = f(P_i)$, espera-se que variações nos preços dos fatores causem impacto no nível de produto, já que unindo as equações deste parágrafo, tem-se que $Q = f(P_i)$.

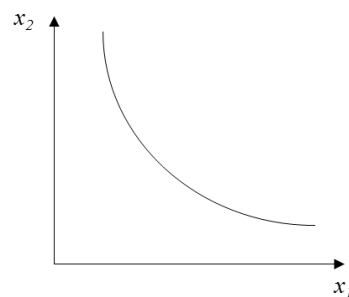
A elasticidade-preço (η) direta capta a sensibilidade da resposta da demanda do fator, dada uma variação no próprio preço. A elasticidade-preço cruzada capta a variação na demanda de um fator dada a variação no preço de outro. Matematicamente, é a razão entre a variação percentual da quantidade e a variação percentual do próprio preço ou do preço de outro insumo.

Os fatores podem ser combinados de diversas maneiras e o produto responderá de formas diferentes a cada combinação. Havendo uma resposta mais do que proporcional às variações nos insumos, haverá retorno crescente na produção. O retorno será decrescente se a resposta do produto for menos do que proporcional às variações nos insumos. E será constante o retorno se o produto variar na mesma proporção dos insumos (PINDYCK e RUBINFELD, 2006).

É possível também que variações nas relações dos fatores aconteçam sem causar alteração na quantidade do produto final. Se um fator se torna relativamente mais caro do que outro, é interessante haver a possibilidade de substituí-lo (ou parte dele) por outro relativamente mais barato e manter a produção no nível corrente, sem grandes impactos no custo total. O Gráfico 7 mostra a relação de usos de um insumo x_1 e outro x_2 , com

possibilidade técnica de substituição entre eles, para produzir uma quantidade constante de produto Q . Os pontos que formam a curva, chamada de Isoquanta, são todas as possíveis combinações de x_1 e x_2 que mantêm a produção num mesmo nível. A taxa de substituição entre esses dois chama-se Taxa Marginal de Substituição Técnica (TMST) e pode ser calculada pela razão negativa das variações das quantidades de um insumo e do outro, ou $TMST = -\Delta x_2 / \Delta x_1$ (CASTRO, FIGUEIREDO e SANTOS, 2009, p. 245).

Gráfico 7- Representação gráfica de uma Isoquanta



Fonte: elaborado pelo autor

A facilidade de substituir um insumo por outro é expressa pela ES. Chunping et al. (2016) a definem como a variação relativa da proporção dos fatores de produção causada por mudanças na TMST. Para Castro, Figueiredo e Santos (2009), ela “[...] corresponde à variação percentual na razão dos fatores de produção, dada uma variação percentual na taxa marginal de substituição técnica” (p. 258), como indicado pela Equação 13. Ainda segundo esses autores, a ES pode ser entendida graficamente como a curvatura da Isoquanta. Quanto maior for a possibilidade de substituição entre os fatores, ou quanto maior o valor da ES, menor será a variação no custo total do produtor para manter o nível corrente de produção. Ou, maior será a possibilidade de alternar entre os insumos.

$$\sigma_{x_2x_1} = \frac{\Delta\% \left(\frac{x_2}{x_1} \right)}{\Delta\% TMST_{x_2x_1}} \quad (13)$$

Uma Isoquanta expressa por uma reta estará representando uma relação entre insumos que são substitutos perfeitos e, neste caso, a ES estará compreendida entre zero (intervalo aberto) e o infinito. No caso de uma produção cujos insumos são complementares

perfeitos, como em uma função de produção do tipo Leontief, a ES será igual a zero e a Isoquanta terá um formato de “L”.

A forma de cálculo da ES mais conhecida é a ESA. A principal característica desta forma é que as elasticidades são simétricas, o que por um lado facilita a análise, mas por outro deixa o modelo restrito (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004). Quando há mais do que dois fatores, a relação de substituição ou complementariedade se torna dependente de informações mais específicas, como a direção que se toma em relação ao ponto de aproximação, tornando o desenvolvimento matemático mais trabalhoso e complexo (SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010b). No entanto, a ESA é base para outros métodos assimétricos, como a ESM e a Elasticidade de Substituição de McFadden, justificando iniciar a explanação a partir dela.

O desenvolvimento que se faz da ESA é baseada em Castro, Teixeira e Figueiredo (2004). A função da parcela de custos do fator i , dada na forma da Equação (9), é de onde se parte para o cálculo da elasticidade-preço direta da demanda (η_{ii}). Como $\partial \ln x_i = 1/x_i \partial x_i$ e $\partial \ln P_i = 1/P_i \partial P_i$, nota-se:

$$\eta_{ii} = \frac{\partial \ln x_i}{\partial \ln P_i} = \frac{\partial x_i P_i}{\partial P_i x_i} \quad (14)$$

Aplicando-se o logaritmo em (9) é possível isolar o $\ln x_i$ e substituí-lo na equação acima. Avançando um pouco na manipulação matemática, chegar-se-á em:

$$\frac{\partial \ln S_i}{\partial \ln P_i} = \frac{1}{S_i} \frac{\partial S_i}{\partial \ln P_i} \quad (15)$$

É possível perceber, a partir de uma das Equações (10), que derivando a parcela de custo do fator (S_i) em função do preço do fator (P_i) o resultado será β_{ii} . Da dedução de que $\partial \ln C / \partial \ln P_i = S_i$ (10) e da manipulação que resultou na Equação (14), expressa-se a elasticidade-preço da demanda do fator i :

$$\eta_{ii} = \frac{\beta_{ii}}{S_i} + S_i - 1 \quad (16)$$

Perpassando pelos mesmos passos, mas agora considerando o preço do fator j e a parcela de custos de i , chega-se a elasticidade-preço cruzada da demanda do fator i com relação ao preço do fator j , considerando que $\frac{\partial \ln P_i}{\partial \ln P_j} = 0$:

$$\eta_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{S_i} + S_j \quad (17)$$

A ESA (σ_{ii}^A) é obtida dividindo a elasticidade-preço da demanda do fator pela parcela de custo do fator.

$$\sigma_{ii}^A = \frac{\eta_{ii}}{S_i} \quad (18)$$

Substituindo a elasticidade-preço direta da demanda por (16), tem-se que a ESA é:

$$\sigma_{ii}^A = \frac{\beta_{ii}}{S_i^2} - \frac{1}{S_i} + 1 \quad (19)$$

Tomando-se a elasticidade-preço cruzada da demanda ao invés da direta por base, como indicado na Equação (17), tem-se que:

$$\sigma_{ij}^A = \frac{\eta_{ij}}{S_j} = \frac{\beta_{ij}}{S_i S_j} + 1 \quad (20)$$

A condição de simetria faz com quem $\sigma_{ij}^A = \sigma_{ji}^A$, já que $\beta_{ij} = \beta_{ji}$. Neste modelo, é mandatório que haja tal condição. Se, pelo teste de simetria, isso não ocorrer naturalmente, a condição deve ser imposta.

Ainda de acordo com Castro, Teixeira e Figueiredo (2004), os bens podem ser considerados substitutos quando o sinal da elasticidade-preço cruzada for positivo. O sinal negativo indica relação de complementariedade. O resultado da ESA vai depender do ponto da amostra e é comum o resultado ter inconsistências, como um valor positivo da elasticidade-preço direta do fator. Mas é possível usar essa característica do método para, por exemplo, verificar a evolução da elasticidade ao longo do tempo.

O fato de ser calculada a elasticidade para cada ponto de observação implica fazer uma opção para considerar qual é a elasticidade do período. Autores como Greene (2002) e Manhães (2011) sugerem o uso da média, mas não restringem outros critérios, ficando a decisão a cargo do pesquisador.

A partir das ES é também possível testar a separabilidade entre conjuntos de insumos. Se as elasticidades cruzadas entre o par formado com o insumo que se espera exógeno (k) e um reconhecidamente endógeno (i), e o par do insumo exógeno (k) com o outro endógeno (j), forem iguais entre si, então o conjunto de i e j é dito separável do insumo (ou conjunto) k . Esquemáticamente, serão separáveis se $\sigma_{ik} = \sigma_{jk}$. Se, além de iguais entre si, forem iguais a 1, é dito que os grupos de insumos possuem uma condição de separabilidade linear e a função Translog se transforma numa função Cobb-Douglas (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004; GREENE, 2002).

A ESA, quando aplicada para mais de dois fatores, perde a capacidade de medir a curvatura da Isoquanta na função de custos. A análise de substituição perde o sentido e informações sobre a participação relativa dos fatores são imprecisas. Como medida quantitativa, não acrescenta nenhuma informação. Em resumo, a ESA perde a capacidade de fornecer informações confiáveis (BLACKORBY e RUSSEL, 1989).

A ESM (σ_{ij}^M) pode ser considerada um aprimoramento da elasticidade de Allen, sendo possível explicá-la a partir da ESA. Pode-se dizer que (BRAGAGNOLO et al., 2009; CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004; SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010a; SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010b):

$$\sigma_{ij}^M = S_j(\sigma_{ij}^{ESA} - \sigma_{jj}^{ESA}) = \eta_{ij} - \eta_{jj} \quad (21)$$

A ESM corrige a deficiência da ESA quando consegue representar a curvatura da Isoquanta. Ela também permite a assimetria dos parâmetros, diferente da ESA, onde essa é uma condição necessária, demonstrada anteriormente. Significa que, para a ESA, a facilidade de substituir um insumo A por B é a mesma de substituir B por A, dadas variações nos preços de A ou B. A ESM, possibilitando a assimetria, permite que as facilidades sejam distintas para cada sentido, dando maior aderência do modelo teórico ao comportamento econômico real. As diferenças entre as duas podem levar a conclusões distintas entre substitutos ou complementares (FARIAS, FIGUEIREDO e ARAÚJO, 2014; MANHÃES, 2011).

A interpretação que se faz a partir do valor da ESM é a mesma da ESA: quando se verificam valores positivos, entende-se que há substituição entre os fatores. Valores negativos denotam complementariedade (SERLETIS, TIMILSINA e VASETSKY, 2010b; FARIAS, FIGUEIREDO e ARAÚJO, 2014).

Quando dois insumos são substitutos pela ESA, espera-se chegar à mesma conclusão pela ESM. Mas quando a relação dada pela ESA é de complementariedade, a ESM pode

indicar tanto uma relação de substituição quanto de complementariedade. O que determinará uma ou outra é a magnitude dos efeitos cruzados e diretos (BRAGAGNOLO et al., 2009).

3.4 Modelo econométrico

No modelo clássico de regressão linear (MCRL), os estimadores de mínimos quadrados são não-tendenciosos e eficientes quando o estimador é uma combinação linear das observações e a variância é a menor, comparada com qualquer outro estimador linear não-tendencioso. Kmenta (1978) aponta sete pressupostos básicos a que o MCRL deve atender (p. 219-222):

- a) A relação entre as variáveis dependente e independente deve ser linear nos parâmetros;
- b) Os termos estocásticos devem estar simetricamente distribuídos em torno da média e essa distribuição deve ser determinada pela média e a variância (normalidade);
- c) A esperança dos termos estocásticos deve ser igual a zero;
- d) A variância das observações da variável dependente deve ser a mesma para qualquer magnitude de valor da variável independente; condição de homocedasticidade;
- e) O valor de um erro estocástico não pode estar influenciado pelo valor de outro; a covariância entre dois resíduos quaisquer deve ser igual a zero, implicando na ausência de autocorrelação;
- f) O valor do erro estocástico não pode estar relacionado ao erro estocástico de outra regressão;
- g) Os valores da variável independente devem ser valores finitos, diferentes de zero, fixados em amostras (não estocásticos) e não correlacionados com os termos de erro.

Gujarati e Porter (2011) apontam os mesmos pressupostos e deixam claro outros três:

- a) O número de observações deve ser maior do que o número de parâmetros;
- b) O modelo deve ser corretamente especificado, sem a presença de variáveis irrelevantes, a ausência de variáveis relevantes nem a adoção de uma forma funcional equivocada, e as variáveis devem ser expressas nas medidas corretas;

- c) Quando houver mais do que uma variável independente, não deve haver relação linear perfeita entre elas (ausência de multicolinearidade).

É comum ocorrer na economia que a correta especificação de um modelo precise trabalhar simultaneamente com mais de uma equação. Um consumidor que possui uma renda limitada e consome uma cesta de produtos, responderá com mudanças relativas na demanda de vários bens, caso o preço de um único item se altere ou haja uma alteração na utilidade. Neste caso, a parte estocástica que explica variações na demanda de um bem A , poderá estar relacionada com a parte estocástica da equação de demanda de outro bem B . Neste caso, a análise individual de cada equação leva à quebra do pressuposto (f) apontado por Kmenta. Apesar das equações se manterem não-tendenciosas e consistentes individualmente, a eficiência do sistema estará comprometida.

Quando se conhece a matriz de variância-covariância das perturbações da regressão (Ω), é possível regressar o modelo por meio dos Mínimos Quadrados Generalizados (MQG) de Aitken e este método será tão mais eficiente em relação ao MQO quanto maior for a correlação entre os termos estocásticos entre as equações de um sistema (KMENTA, 1978, p. 566). Quando os elementos da Ω não são conhecidos, uma solução é estimar as variâncias e covariâncias dos resíduos, por MQO, e compor uma matriz Ω' estimada. Esta foi a proposta feita por Zellner (1962).

Este processo possui dois estágios. O primeiro é estimar os parâmetros de cada equação por MQO e usar os resíduos para estimar as variâncias e covariâncias dos termos estocásticos. O segundo é criar uma matriz Ω' com os dados do primeiro estágio e aplicá-la na estimação por MQG. Como resultado, o parâmetro será não-tendencioso e eficiente em amostras assintóticas.

Parks (1967) observou que o estudo de Zellner oferecia solução para casos de um sistema de equações que apresentasse correlação contemporânea dos resíduos. Ao se trabalhar uma série temporal, no entanto, a autocorrelação pode se dar tanto numa seção cruzada quanto no tempo. Ele complementa que uma matriz Ω' mais geral deve incluir as correlações entre os distúrbios não contemporâneos, ou defasados. Kmenta dá suporte a essa ideia e sugere que quando há correlação contemporânea entre os erros estocásticos e o modelo é autorregressivo, os coeficientes de autocorrelação devem ser inserido na matriz Ω' (Kmenta, 1978, p.567).

Quando as equações de um sistema satisfazem os pressupostos do modelo clássico de regressão linear individualmente, mas em conjunto apresentam uma relação verificada na matriz Ω , dá-se o nome de Sistema de Equações de Regressão Aparentemente Não-Correlacionadas, ou *Seemingly Unrelated Regressions* (SUR). A denominação de

aparentemente não-correlacionadas considera o fato de o vínculo entre duas equações ser muito sutil, estando esta sutileza na correlação dos termos estocásticos entre equações (KMENTA, 1978, p. 559).

Este é o método econométrico mais utilizado para estimar as funções de participação dos custos a partir de funções de custos do tipo Translog (CASTRO, TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2004; GREENE, 2002). Foi utilizado por Manhães (2011), Bragagnolo et al. (2009), Castro (2008) e Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010a) em suas análises de elasticidade de substituição, apesar deste último trabalho não ter partido de uma função Translog, mas sim de funções QN.

Um sistema SUR toma forma ao considerarmos um conjunto de n equações, que podem ser apresentadas por uma notação vetorial comum a todas, do tipo:

$$y_i = \beta_i X_i + \varepsilon_i \quad (22)$$

Neste sistema, a i -ésima equação tem o β representando um vetor $K \times 1$ dos coeficientes das K variáveis independentes X , sendo X uma matriz $N \times K$, e ε representando o vetor dos termos estocásticos da equação, sendo $\varepsilon = [\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \dots, \varepsilon'_n]$ $N \times 1$, com média igual a zero e distribuição normal. O vetor y $N \times 1$ representa os valores da variável endógena. É necessário que o número de observações (T , em referência ao tempo) seja maior do que o número de regressores do sistema. Seguindo o desenvolvimento feito por Kmenta (1978), a matriz de variância-covariância da n -ésima equação pode ser notada por $E(\varepsilon_n \varepsilon'_n) = \sigma_{nn} I_T$, sendo I uma matriz identidade de ordem $T \times T$. Dada a consideração de que há correlação entre os termos estocásticos das equações, a matriz de variância-covariância entre uma equação p e a n -ésima equação será $E(\varepsilon_n \varepsilon'_p) = \sigma_{np} I_T$. Dentro do sistema, a matriz de variância-covariância dos termos estocásticos da regressão será:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \sigma_{11} I_T & \sigma_{12} I_T & \dots & \sigma_{1N} I_T \\ \sigma_{21} I_T & \sigma_{22} I_T & \dots & \sigma_{2N} I_T \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{N1} I_T & \sigma_{N2} I_T & \dots & \sigma_{NN} I_T \end{bmatrix} \quad (23)$$

Em posse da matriz Ω , é possível encontrar o melhor estimador linear não-tendencioso do coeficiente β pela fórmula dos MQG de Aitken:

$$\tilde{\beta} = (X' \Omega^{-1} X)^{-1} (X' \Omega^{-1} y) \quad (24)$$

Este β estimado ($\tilde{\beta}$) se difere do estimado por MQO ($\hat{\beta}$) pela incorporação da matriz Ω , visto que $\hat{\beta} = (X'X)^{-1}(X'Y)$. Quando não houver correlação entre os termos de erro e $\sigma_{np} = 0$, para todo $n \neq p$, o resultado da estimação por MQG será equivalente ao resultado encontrado por MQO, já que $\tilde{\beta} = \hat{\beta}$. Outra condição que proporciona resultados equivalentes pelos métodos MQG e MQO, observado por Zellner (1962) e ressaltado por Kmenta (1978) e por Suganuma (2000), é quando todas as equações do sistema usam exatamente as mesmas variáveis independentes.

Quando há correlação entre os termos de erro de uma mesma equação ao longo do tempo e ela se apresenta como autorregressiva de primeira ordem, a matriz de variância-covariância de cada equação deve incluir o coeficiente de autocorrelação (ρ). Considerando a n -ésima equação:

$$E(\varepsilon_n \varepsilon_n') = \sigma_{nn} \begin{bmatrix} 1 & \rho_n & \dots & \rho_n^{T-1} \\ \rho_n & 1 & \dots & \rho_n^{T-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_n^{T-1} & \rho_n^{T-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

A matriz de variância-covariância entre duas equações, p e n , será:

$$E(\varepsilon_n \varepsilon_p') = \sigma_{np} \begin{bmatrix} 1 & \rho_p & \dots & \rho_p^{T-1} \\ \rho_n & 1 & \dots & \rho_p^{T-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_n^{T-1} & \rho_n^{T-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Considerando que o coeficiente de autocorrelação estimado seja $\hat{\rho}_n$, o sistema de regressões aparentemente não-relacionadas com vetores autoregressivos é dado por:

$$(Y_{nt} - \hat{\rho}_n Y_{nt-1}) = \beta_{n1}(X_{it,1} - \hat{\rho}_n X_{1,t-1,1}) + \dots + \beta_{nK_n}(X_{nt,K_n} - \hat{\rho}_n X_{n,t-1,K_n}) + \varepsilon_{nt} \quad (27)$$

Quando não se conhece a matriz Ω , deve-se buscar um estimador consistente das variâncias e covariâncias dos erros estocásticos da regressão. No primeiro estágio, estima-se cada equação individualmente por MQO para obter-se os resíduos ε_{nt} da equação n no período t . Com estes valores, estima-se as covariâncias (s) entre os resíduos das equações,

sendo a fórmula para as equações n e p dada por $s_{np} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \epsilon_{nt} \epsilon_{pt}$ ³², de modo que s_{np} será um estimador não-tendencioso e consistente de σ_{np} . Agora é possível encontrar um estimador de Ω , dado por:

$$\hat{\Omega} = \begin{bmatrix} s_{11}I_T & s_{12}I_T & \dots & s_{1N}I_T \\ s_{21}I_T & s_{22}I_T & \dots & s_{2N}I_T \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{N1}I_T & s_{N2}I_T & \dots & s_{NN}I_T \end{bmatrix} \quad (28)$$

No segundo estágio, incorpora-se $\hat{\Omega}$ no estimador de Aitken, agora chamado de estimador de Aitken de duplo estágio, para encontrar o valor de β , dado por $\tilde{\beta} = (X' \hat{\Omega}^{-1} X)^{-1} (X' \hat{\Omega}^{-1} Y)$.

Para o ganho de eficiência na resolução de um sistema de equações simultâneas, é adequado o uso da técnica de MQ3E. O primeiro estágio constitui a estimação das equações por MQG, na forma reduzida. Os valores estimados de cada variável endógena são usados para obter soluções para todas as equações do sistema, por mínimos quadrados em dois estágios. Destas equações, são obtidos os resíduos e, com eles, estimadas as variâncias e covariâncias entre as equações, como mostrado acima. No terceiro estágio, são obtidas as estimações por MQG. De forma compacta, “[...] a estimação por regressões aparentemente sem relação é meramente a aplicação da técnica de mínimos quadrados generalizados a um grupo de equações que aparentemente não têm relação” (PINDYCK e RUBINFELD, 2004, p. 431).

Uma variável amostral é um estimador não tendencioso de uma variável populacional se a primeira possui uma distribuição normal ou, alternativamente, se ela não possui uma distribuição normal, mas o número de amostras é suficientemente grande (HOFFMANN, 2013).

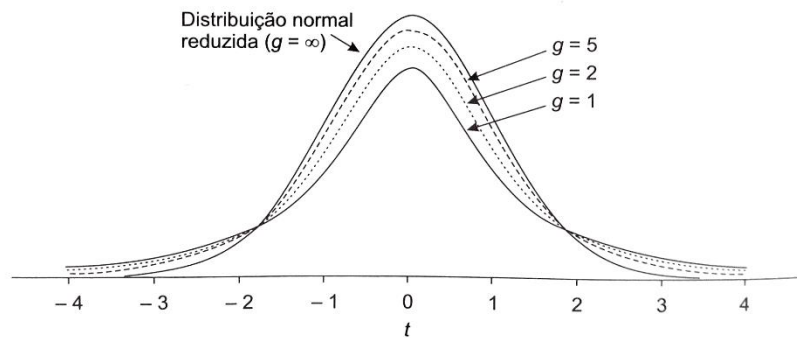
A distribuição normal é caracterizada quando os resíduos da estimação possuem uma distribuição simétrica em torno da média e a curva é assintótica ao eixo das abscissas. A assimetria (S) pode ser medida por $S = \frac{E(X-\mu)^3}{\sigma^3}$, onde X indica a média da função $f(x)$, μ indica o valor médio populacional e σ representa o desvio padrão populacional. Para uma distribuição normal, o valor de S deve ser estatisticamente igual a zero. O prolongamento da cauda da curva da distribuição é medido pelo coeficiente de curtose (K), dado por $K =$

³² O denominador da fração é dado por $(T - K_m)$. Porém, é possível utilizar apenas (T) , “Uma vez que só estamos preocupados com a consistência, [...] sem afetar as propriedades assintóticas do estimador de β ” (KMENTA, 1978, p. 567).

$\frac{E(X-\mu)^4}{[E(X-\mu)^2]^2}$. A distribuição normal terá $K = 3$, sendo esse tipo de distribuição de frequência denominado mesocúrtica. Um dos testes que determina se a distribuição de uma estimação é normal ou não é o de Jarque-Bera (JB), dado por $JB = n \left[\frac{s^2}{6} + \frac{(K-3)^2}{24} \right]$, sendo n o número de observações da amostra. JB possui uma distribuição como uma estatística qui-quadrado e possui como hipótese nula a normalidade (HOFFMANN, 2013; GUJARATI e PORTER, 2011).

A significância estatística dos valores calculados pode ser testada pelo Teste t de Student. Se \hat{X} (o chapéu denota valor estimado) é um estimador não tendencioso de uma variável qualquer X real, então a média de \hat{X} (\bar{X}) será um estimador não tendencioso da média do X real (μ) e a variância deste estimador (s^2) será um estimador não tendencioso da variância real de X (σ^2). A variância amostral é encontrada em $s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n-1}$, sendo o denominador o número de graus de liberdade. Quando este último aumenta, a distribuição de s^2 tende a se concentrar em torno da σ^2 , de modo que quando $(n - 1) \rightarrow \infty$ (que no limite seria o mesmo que $n \rightarrow \infty$; na prática, denotando que o número de observações da amostra tende ao número total da população), $s^2 \rightarrow \sigma^2$. Essa concentração é vista graficamente com uma redução da largura da curva da distribuição de frequência, como ilustra a Figura 4. De forma inversa, menores graus de liberdade serão vistos graficamente com uma maior dispersão dos pontos, deixando a curva mais alargada. Se X possui distribuição normal e a variância populacional é desconhecida, pode-se calcular o valor de $t = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{s^2_{\bar{X}}}}$ (HOFFMANN, 2013).

Figura 4 - Distribuições t-Student para diferentes graus de liberdade



Fonte: Extraído de Hoffmann (2013, p. 146)

O valor calculado t é considerado uma variável aleatória com distribuição t de Student, diretamente afetada pelo desvio padrão (s , sendo $s = \sqrt{s^2}$) e o número de observações. O valor tabelado de t , ou valor crítico, faz uma relação entre o nível da significância estatística e o grau de liberdade. Esse valor irá delimitar a área da curva onde as observações serão estatisticamente iguais ao valor do ponto central. Essa área é chamada de intervalo de confiança. As observações fora dela serão estatisticamente diferentes do valor do ponto central. Se a distribuição for normal e a amostra assintótica, pode-se identificar na tabela o valor correspondente ao grau de liberdade e uma significância estatística, por exemplo, de 5%. Isso significa que 95% das observações estarão compreendidas dentro do intervalo delimitado pelo valor crítico, negativo, à esquerda, e positivo, à direita. Como supõe-se simetria da distribuição, costuma-se usar apenas o lado positivo da distribuição, justificando estar na tabela apenas o valor em módulo (ou positivo). Considerando uma significância de 1%, encontrar-se-á um valor que delimitará a área da distribuição para compreender 99% das observações.

Considerando uma função do tipo $y = \beta x + \varepsilon$, onde y é uma variável endógena qualquer, x é uma variável explicativa e ε representa um valor aleatório com média igual a zero e variância constante (caracterizando um ruído branco), usa-se um modelo econométrico para testar se o coeficiente $\hat{\beta}$ é um valor significativo. Se for significativo, ele representará a magnitude com a qual variações na variável x afetam variações na variável y . Se não for significativo, será dito que x não tem a capacidade de explicar variações de y , o que pode ser representado por $\beta = 0$ ($y = 0 * x + \varepsilon$, logo $y = \varepsilon$). Por isso, geralmente define-se a hipótese nula (H_0) como sendo o coeficiente igual a zero. Rejeitar H_0 significa dar significância estatística para o coeficiente estimado (GUJARATI e PORTER, 2011).

Ao se testar $\beta = 0$, define-se como ponto central da distribuição de frequência o zero. O valor de t calculado continua tendo no numerador a diferença entre o valor estimado e o valor real, mas, agora, não mais a média. O denominador continua tendo o desvio padrão das observações. O valor $t = \frac{\hat{\beta} - \beta}{s(\hat{\beta})} = \frac{\hat{\beta}}{s(\hat{\beta})}$ será comparado com o valor crítico de t , dado o nível de significância estatística desejado. Se o valor calculado de t estiver compreendido dentro do intervalo de confiança, entende-se que o $\hat{\beta}$ é igual ao valor do ponto central, ou seja, zero. Desta forma, ele não é estatisticamente significativo no contexto da função $y = \beta x + \varepsilon$. Se o valor calculado de t for maior do que o valor crítico, o $\hat{\beta}$ estará fora do intervalo, o que implica em $\hat{\beta}$ ser estatisticamente diferente de zero, ou estatisticamente significativo ao nível de confiança determinado pelo pesquisador.

Para testar a significância estatística das elasticidades, usa-se esta mesma lógica. A hipótese nula é de que o valor encontrado é igual a zero. Se H_0 for rejeitada, considera-se que o valor é estatisticamente significativo.

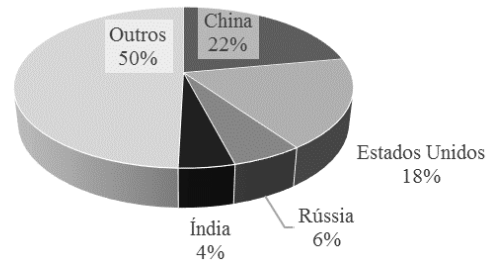
3.5 Fonte dos dados

Para aplicar o modelo são necessárias séries temporais dos preços dos combustíveis, das quantidades consumidas de cada um e dos gastos com energia. A preocupação do presente trabalho se dá no âmbito global, uma vez que as reservas não se limitam ao abastecimento do local onde se encontram e os efeitos do aquecimento global são sentidos em todo o planeta. Mas, para captar uma única relação, válida para todas as econômicas, faria-se necessário utilizar preços internacionais. Isso não é possível porque apenas o petróleo é uma *commodity* internacional. O carvão e o GN possuem preços que podem variar de país para país, até mesmo dentro de um país. Essa limitação de dados conduz este trabalho a escolher um mercado mundialmente representativo.

Os 227 países, para os quais há informação disponível sobre consumo e produção de energia, foram ordenados conforme o consumo total da energia primária em 2014, ano mais recente com dados disponíveis para todos, do maior demandante para o menor, dentro das bases da IEA e da EIA. O Gráfico 8 mostra que os quatro primeiros consumiram metade da energia naquele ano: China (22%), Estados Unidos (18%), Rússia (6%) e Índia (4%) (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017). Destes, apenas os Estados Unidos possuem séries históricas fornecidas por instituição oficial do governo, com acesso gratuito ao público geral. A disponibilidade de dados e o fato de ter sido o segundo maior demandante de

energia primária constituem as principais razões que levaram os EUA a ser o delimitador geográfico deste trabalho.

Gráfico 8 - Maiores demandantes de energia primária em 2014



Fonte: U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2017k)

A EIA é a responsável por administrar as informações oficiais sobre energia daquele país. Criada em 1977 pelo congresso americano, é uma agência de estatísticas ligada ao departamento de energia do governo. Ela coleta, analisa e dissemina informações sobre energia de forma independente, com o objetivo de suprir governos e empresas, privadas e públicas, no que tange ao desenvolvimento de políticas públicas, aumento de eficiência dos mercados e à promoção do entendimento da relação entre economia e meio-ambiente. Os dados seguem critérios metodológicos definidos em atos públicos e leis, para garantir a transparência e a qualidade/confiabilidade da informação (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017a).

O SEDS (State Energy Data System) é um sistema criado e mantido pela EIA, com o objetivo de criar séries históricas da produção, consumo, preços e gastos com energia, por estado, por fonte e por setor econômico norte-americano. Anualmente, são divulgados relatórios e tabelas, com dados brutos e análises para todos os estados e a federação (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017j).

A agência sugere discricção na análise dos dados, argumentando que dados confiáveis, copilados de diversas fontes e em tão vasta área, são raros de se obter. Todo o trabalho segue metodologias bem definidas e detalhadamente explicadas, buscando conseguir o menor desvio possível da realidade. Essa limitação dos dados se estende como uma limitação do presente trabalho.

Os gastos com energia primária são estimados a partir do consumo e preços estimados no SEDS e apresentados em milhões de dólares correntes. O objetivo desta variável

é contabilizar o gasto na ponta, ou seja, o somatório de todo gasto que os consumidores finais de energia têm para comprá-la. Isso implica identificar e subtrair os combustíveis de processo³³, energia necessária para o processo de gerar energia para o consumidor final, e os produtos intermediários³⁴, energia incorporada como matéria-prima de outro produto energético. Também são retiradas do cálculo a eletricidade exportada para o Canadá e México e a quantidade estimada de energia usada sem custo de aquisição, como a madeira no setor residencial e a madeira e o material orgânico (bioenergia) nos setores comercial e industrial.

Os usos mais comuns de energia no setor residencial são aquecimento do ambiente, aquecimento da água, iluminação, refrigeração do ambiente e uso de pequenos equipamentos elétricos. O setor comercial apresenta usos similares. Nele, estão inclusas as edificações públicas e as organizações sem fins lucrativos. Diferente do setor residencial, no comercial é considerado o uso de combustíveis para alimentar geradores próprios de eletricidade e aquecimento para fins inerentes à atividade do estabelecimento. O setor industrial contempla atividades de manufatura, agricultura, caça e pesca, mineração³⁵ e construção. Os usos mais comuns da energia são para processos de aquecimento ou resfriamento, no processo produtivo, e energização de maquinário. Em menor proporção, iluminação, aquecimento e resfriamento de ambientes. O setor de transporte contempla toda a energia necessária para o transporte de pessoas e/ou cargas de um ponto a outro. São os automóveis, caminhões, ônibus, trens, aeronaves, navios e qualquer outro meio com tal propósito. Veículos que tenham outros fins, como grandes veículos usados em minas, veículos agrícolas, tratores, têm a energia que os move computada no setor da atividade fim. Finalmente, o setor de energia elétrica consiste nas plantas que geram energia e/ou aquecimento, desde que tenham como propósito final vender eletricidade e/ou aquecimento ao público. Com exceção deste último, os outros quatro são considerados setores de consumo final de energia.

Os preços de energia são expressos em dólar americano corrente por milhão de BTU³⁶, ou MBTU. A coleta, no entanto, é normalmente feita em unidades físicas. É aplicado um fator para converter a quantidade em unidades termais, para facilitar a comparação. São considerados os valores pagos pelo consumidor, o que inclui os impostos.

³³ São exemplos: consumo de combustíveis fósseis nas refinarias, combustíveis que alimentam os dutos de transporte de GN e petróleo, perdas do setor de geração de energia elétrica.

³⁴ São exemplos: componentes de mistura para o combustível de aviação e de veículos automotores, óleos não-acabados, gasolina natural.

³⁵ Nesta categoria estão as atividades de extração de petróleo e gás, consumidoras de parte significativa da energia intermediária.

³⁶ British Thermal Unit – medida de calor contida em fontes de energia. 1 BTU é a quantidade de energia necessária para aumentar em 1 grau Fahrenheit a temperatura de 1 libra de água (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017c).

As variáveis usadas no modelo estão sintetizadas no Apêndice B. As variáveis monetárias, preços e despesas, foram deflacionadas pelo autor utilizando o deflator implícito do produto nacional bruto americano do Bureau of Economic Analysis (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2017). O índice foi ajustado para ter como referência os preços de 2015. O mesmo índice foi usado por Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010b).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O produto econômico norte-americano pode ser expresso matematicamente por $y_{EUA} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde um conjunto de vetores de insumos x_i é usado para atingir um certo nível de produto y , num certo tempo. Assumindo que esta função atende as condições de regularidade, pode-se calcular a função de custo mínimo do produto como sendo o mínimo de $CT_{EUA} = f(x_1P_1, x_2P_2, \dots, x_nP_n)$, onde P_i expressam os preços dos insumos i e x_i são as quantidades empregadas, de cada insumo, para atingir a quantidade y de produto.

Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010b) agruparam os insumos que formam o produto norte-americano em cinco, sendo este em função de energia (E), trabalho (L), materiais (M), capital (K) e tecnologia (T). Desta forma, a função custo total para um determinado valor de produto se escreve por $CT_{EUA} = f(x_E P_E, x_L P_L, x_M P_M, x_K P_K, x_T P_T)$. Esta função pode ser lida como sendo o custo total em função do custo parcial de vários insumos. Dentre eles, o custo total com energia ($x_E P_E$). Este, por sua vez, é a soma dos custos com as diferentes fontes. No caso dos Estados Unidos, segundo a EIA (2017g; 2017j):

$$CT_{ENERGIA} = f(CT_{PT}, CT_{GN}, CT_{CV}, CT_{IE}, CT_{NC}, CT_{WW}, CT_{ET}) \quad (29)$$

Onde:

- a) CT_{PT} : Custo total com derivados do petróleo;
- b) CT_{GN} : Custo total com GN;
- c) CT_{CV} : Custo total com carvão;
- d) CT_{IE} : Custo total líquido com importação de energia elétrica;
- e) CT_{NC} : Custo total com energia nuclear;
- f) CT_{WW} : Custo total com madeira e biomassa;
- g) CT_{ET} : Custo total com etanol.

O custo total com energia primária é composto em mais de 97% pelo custo dos três primeiros. Assume-se a simplificação de que a energia primária norte-americana é atendida pelo petróleo, GN e carvão, permitindo a análise de substituição apenas dentre os fósseis.

$$CT_{ENERGIA} = f(CT_{PT}, CT_{GN}, CT_{CV}) \quad (30)$$

Esta é a função indireta de custos com energia, já que $CT_i = f(x_i, P_i)$. Ela é formada pelas variáveis 1-5, 10, 11 e 12 do Apêndice B. Assumindo o retorno constante de escala, transforma-se o custo total em custo médio, dividindo ambos os lados da equação pela

quantidade e fazendo com que o custo médio, ou unitário, (C) se dê unicamente em função do preço de i : $C = f(P_i)$.

Escrevendo a função custo com energia na forma funcional Translog, ter-se-a:

$$\begin{aligned} \ln C = & \beta_0 + \beta_1 \ln P_P + \beta_2 \ln P_C + \beta_3 \ln P_G + \frac{1}{2} \beta_{11} (\ln P_P)^2 + \frac{1}{2} \beta_{12} \ln P_P \ln P_C + \\ & \frac{1}{2} \beta_{13} \ln P_P \ln P_G + \frac{1}{2} \beta_{21} \ln P_C \ln P_P + \frac{1}{2} \beta_{22} (\ln P_C)^2 + \frac{1}{2} \beta_{23} \ln P_C \ln P_G + \\ & \frac{1}{2} \beta_{31} \ln P_G \ln P_P + \frac{1}{2} \beta_{32} \ln P_G \ln P_C + \frac{1}{2} \beta_{33} (\ln P_G)^2 \end{aligned} \quad (31)$$

Onde:

P_P : é o preço do petróleo;

P_C : é o preço do carvão;

P_G : é o preço do GN.

Os betas são os coeficientes dos parâmetros estimados no modelo econométrico. O custo médio foi obtido pelo somatório dos custos médios com petróleo, carvão e GN, que por sua vez, foram obtidos pela razão do respectivo gasto, a preços de 2015, pelo respectivo consumo. Dos custos médios de cada combustível, obteve-se a parcela de custo de cada combustível i (S_i , da identificação em inglês *share of cost*) ao longo da série temporal, onde $S_i = C_i/C$.

Aplicando o Lema de Shephard, obtém-se as equações parciais de demanda de cada fonte.

$$S_P = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_P} = \beta_1 + \beta_{11} \ln P_P + \frac{1}{2} \ln P_C (\beta_{12} + \beta_{21}) + \frac{1}{2} \ln P_G (\beta_{13} + \beta_{31}) \quad (32.1)$$

$$S_C = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_C} = \beta_2 + \beta_{22} \ln P_C + \frac{1}{2} \ln P_P (\beta_{12} + \beta_{21}) + \frac{1}{2} \ln P_G (\beta_{23} + \beta_{32}) \quad (32.2)$$

$$S_G = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_G} = \beta_3 + \beta_{33} \ln P_G + \frac{1}{2} \ln P_P (\beta_{13} + \beta_{31}) + \frac{1}{2} \ln P_C (\beta_{23} + \beta_{32}) \quad (32.3)$$

Impor a condição de simetria é fundamental para que as equações não retornem uma matriz singular. Assumindo que $\beta_{ij} = \beta_{ji}$, elas tornam-se:

$$S_P = \beta_1 + \beta_{11} \ln P_P + \beta_{12} \ln P_C + \beta_{13} \ln P_G \quad (33.1)$$

$$S_C = \beta_2 + \beta_{21} \ln P_P + \beta_{22} \ln P_C + \beta_{23} \ln P_G \quad (33.2)$$

$$S_G = \beta_3 + \beta_{31} \ln P_P + \beta_{32} \ln P_C + \beta_{33} \ln P_G \quad (33.3)$$

Normalizando, inicialmente pela parcela do GN:

$$S_P = \beta_1 + \beta_{11} \ln \left(\frac{P_P}{P_G} \right) + \beta_{12} \ln \left(\frac{P_C}{P_G} \right) \quad (34.1)$$

$$S_C = \beta_2 + \beta_{21} \ln \left(\frac{P_P}{P_G} \right) + \beta_{22} \ln \left(\frac{P_C}{P_G} \right) \quad (34.2)$$

Para se obter os desvios padrões de todos os coeficientes, normaliza-se novamente, usando como referência cada um dos outros combustíveis. Usando o petróleo, tem-se:

$$S_C = \beta_2 + \beta_{22} \ln \left(\frac{P_C}{P_P} \right) + \beta_{23} \ln \left(\frac{P_G}{P_P} \right) \quad (35.1)$$

$$S_G = \beta_3 + \beta_{32} \ln \left(\frac{P_C}{P_P} \right) + \beta_{33} \ln \left(\frac{P_G}{P_P} \right) \quad (35.2)$$

Usando o carvão:

$$S_P = \beta_1 + \beta_{11} \ln \left(\frac{P_P}{P_C} \right) + \beta_{13} \ln \left(\frac{P_G}{P_C} \right) \quad (36.1)$$

$$S_G = \beta_3 + \beta_{31} \ln \left(\frac{P_P}{P_C} \right) + \beta_{33} \ln \left(\frac{P_G}{P_C} \right) \quad (36.2)$$

Estas equações, acrescidas de um termo estocástico, foram estimadas pelo método econométrico SUR. Os resultados da regressão estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Síntese dos resultados das regressões econométricas estimadas pelo método SUR

| Estimador | Coefficiente | Desv. Pad. | Estatística T | Probabilidade |
|--------------|--------------|------------|---------------|---------------|
| β_1 | 0,3733 | 0,0041 | 90,2467 | 0,0000 |
| β_{11} | 0,2292 | 0,0033 | 70,4719 | 0,0000 |
| β_{12} | -0,0656 | 0,0022 | -29,2268 | 0,0000 |
| β_{13} | -0,1636 | 0,0028 | -57,4221 | 0,0000 |
| β_2 | 0,2746 | 0,0043 | 64,0413 | 0,0000 |
| β_{21} | -0,0707 | 0,0034 | -20,9618 | 0,0000 |
| β_{22} | 0,1037 | 0,0023 | 44,5545 | 0,0000 |
| β_{23} | -0,0330 | 0,0030 | -11,1724 | 0,0000 |
| β_3 | 0,3522 | 0,0035 | 100,3189 | 0,0000 |
| β_{31} | -0,1585 | 0,0028 | -57,4292 | 0,0000 |
| β_{32} | -0,0381 | 0,0019 | -19,9800 | 0,0000 |
| β_{33} | 0,1966 | 0,0024 | 81,2998 | 0,0000 |

Fonte: Resultados da pesquisa

Todos os coeficientes foram significativos ao nível de 1%. As condições de homogeneidade foram confirmadas. As simetrias dos coeficientes foram ratificadas na estimação, sem a obrigação da imposição nas equações estimadas como fizeram Castro, Teixeira e Figueiredo (2004) e Greene (2002). Valendo-se do teste de Wald, não foi possível rejeitar as hipóteses nulas de que, estatisticamente, β_{12} é igual a β_{21} ; que β_{23} é igual a β_{32} ; e β_{13} que é igual a β_{31} , todas ao nível de significância de 1%. Esse teste segue os procedimentos e a recomendação do manual do EViews (2010) para regressões que usam o método SUR.

A normalidade da distribuição dos resíduos foi testada estimando cada equação por MQO. Ao nível de significância de 1%, não se rejeita a hipótese nula de distribuição normal de duas das três equações: da parcela de custos do GN (33.3) e da parcela de custos do carvão (33.2). Para os resíduos da parcela de custos do petróleo (33.1), rejeita-se a hipótese de distribuição normal. A não-normalidade dos resíduos pode enviesar os estimadores, uma vez que o nível de significância estatística é determinado supondo uma curva em formato de sino simétrica, tendo o ápice no ponto central e os valores críticos da estatística- T iguais em módulo. O viés do estimador com uma distribuição não-normal é inversamente proporcional ao número de observações da amostra. Logo, grandes amostras podem ter relaxada a suposição de normalidade (GUJARATI e PORTER, 2011). Da Equação S_p (33.1), foram conseguidos os valores dos coeficientes β_1 , β_{11} , β_{12} e β_{13} com a estimação pelo método SUR. Valendo-se da condição de simetria, os betas 12 e 13 são estatisticamente iguais aos 21 e 31,

respectivamente, cujas significâncias estatísticas foram confirmadas nas equações S_C (33.2) e S_G (33.3), respectivamente. Isso dá confiança para seguir com o modelo.

O teste de Portmanteau rejeita a hipótese nula de ausência de autocorrelação nos resíduos ao nível de significância de 1%, usando defasagens de 1 a 12, nas três equações estimadas. Essa conclusão valida o uso do método SUR sobre o MQO. Segundo Greene (2002), o primeiro será mais eficiente do que o segundo quanto maior for a autocorrelação entre os resíduos das equações.

Os cálculos das elasticidades-preço da demanda usaram os coeficientes estimados da Tabela 1 e são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de elasticidades-preço da demanda dos combustíveis fósseis

| η_{ij} | P | C | G |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| P | -0,0192 <i>(0,0262)</i> | 0,0096 <i>(0,0370)</i> | 0,0104 <i>(0,0420)</i> |
| C | 0,0036 <i>(0,2092)</i> | -0,0355 <i>(0,2968)</i> | -0,0030 <i>(0,1104)</i> |
| G | 0,0394 <i>(0,1113)</i> | -0,0193 <i>(0,0479)</i> | -0,0228 <i>(0,1349)</i> |

Fonte: resultado da pesquisa

Os valores das elasticidades são mostrados em negrito e os desvios padrões entre parênteses e em itálico. Como há uma elasticidade para cada ponto de observação, as apresentadas aqui são as medianas de cada relação. Optou-se por esse critério por entender que ela é mais eficiente do que a média por sofrer menor influência de possíveis *outliers*.

As elasticidades diretas são condizentes com a teoria. Os valores negativos indicam retração do consumo quando há aumento de preços, e vice-versa. Dentre as elasticidades cruzadas, apenas a relação entre carvão e GN se dá de forma inversa, onde variações nas quantidades de um combustível respondem em sentido contrário às variações nos preços do outro.

Apesar de serem como o esperado, com base na teoria microeconômica clássica, os valores de elasticidade não foram estatisticamente significativos pelo Teste-*t* de Student. Uma causa para essa constatação são os altos valores dos desvios padrões das séries. Os resultados pioram quando se usa a média ao invés da mediana, o que, por outro lado, sustenta a opção feita neste trabalho.

Considerando apenas as elasticidades aos próprios preços, observa-se ao longo da série histórica que muitos períodos apresentam valores positivos, diferente do que se espera com base na teoria econômica. Uma possível explicação está no argumento de Considine (1989), Xingang e Pingkuo (2013), e Zhang (2012), que lembraram como as políticas de governo interferem nas opções de mercado. Na década de 1970, houve estímulos para reduzir o consumo de petróleo, como resultado da crise internacional causada pela disparada nos preços desta *commodity*. O preço do GN era controlado artificialmente e atrelado aos movimentos da demanda de petróleo. Começava-se, também nessa época, a considerar os danos ambientais causados pela queima destes combustíveis, colocando pressão sobre a demanda, tanto na do petróleo quanto na do carvão.

Analisando as elasticidades aos próprios preços dos três combustíveis (disponível no Apêndice C), ficam claros quatro intervalos distintos dentro da série. O primeiro vai de 1970 a 1981 e caracteriza-se por valores negativos para o petróleo (única exceção é o valor de 1970) e para o carvão, mas valores positivos para o GN. O segundo é caracterizado por valores negativos da elasticidade dos três combustíveis e vai de 1982 até 1995. O terceiro, que inicia em 1996 e se prolonga até 2008, mostra valores negativos para o petróleo (as exceções são os anos de 2007 e 2008) e o GN, mas positivos para o carvão. O último, de 2009 até o final da série, apresenta valores positivos para todos os combustíveis. Os intervalos ficam sistematizados conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Agrupamento dos resultados das elasticidades próprias dos combustíveis fósseis, em intervalos

| INTER-VALO | PERÍODO | η_{PP} | η_{CC} | η_{GG} | Nº OBSERVAÇÕES |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 1 | 1970 — 1981 | Negativa | Negativa | Positiva | 12 |
| 2 | 1982 — 1995 | Negativa | Negativa | Negativa | 14 |
| 3 | 1996 — 2008 | Negativa | Positiva | Negativa | 13 |
| 4 | 2009 — 2015 | Positiva | Positiva | Positiva | 7 |

Fonte: resultado da pesquisa

As quebras estruturais nos anos de 1981, 1995 e 2008 foram testadas nas equações das parcelas de custo S_P , S_C e S_G , e estatisticamente confirmadas pelo teste Chow³⁷, onde rejeitou-se a hipótese nula de não haver quebras nos mencionados anos, ao nível de significância de 1%.

³⁷ A aplicação e a análise do teste de Chow seguem as orientações do manual Eviews (2010)

Quando se analisa cada intervalo de maneira independente, obtêm-se resultados com claras significâncias estatísticas, que podem ser observados na Tabela 4. Perde-se a possibilidade de criar uma única conclusão para todo o período, mas ganha-se consistência metodológica para interpretar cada intervalo.

Tabela 4 - Coeficientes de elasticidades-preço da demanda dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos

| INTERVALO | η_{ij} | P | C | G |
|-----------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | P | -0,00802 n.s. (0,0111) | 0,05853 *** (0,0213) | -0,04990 ** (0,0189) |
| | C | 0,19160 *** (0,0532) | -0,20571 *** (0,0729) | 0,00907 n.s. (0,0345) |
| | G | -0,12109 * (0,0766) | -0,01703 n.s. (0,0274) | 0,12023 * (0,0871) |
| 2 | P | -0,02964 *** (0,0068) | 0,01409 ** (0,0061) | 0,01361 ** (0,0071) |
| | C | 0,02581 n.s. (0,0237) | -0,06461 * (0,0470) | 0,04714 * (0,0319) |
| | G | 0,04067 *** (0,0117) | 0,00273 n.s. (0,0153) | -0,05408 ** (0,0210) |
| 3 | P | -0,02318 ** (0,0127) | -0,03499 ** (0,0166) | 0,04652 ** (0,0190) |
| | C | -0,34848 ** (0,1678) | 0,38989 * (0,2508) | -0,07423 n.s. (0,0907) |
| | G | 0,09829 *** (0,0241) | -0,02944 * (0,0212) | -0,06475 ** (0,0276) |
| 4 | P | 0,04817 ** (0,0235) | -0,01172 ** (0,0056) | -0,03301 * (0,0235) |
| | C | -0,15881 ** (0,0593) | 0,42061 *** (0,1175) | -0,25814 *** (0,0708) |
| | G | -0,10203 n.s. (0,1065) | -0,12771 *** (0,0415) | 0,22974 * (0,1472) |

Fonte: resultado da pesquisa

Notas: * - Estatisticamente significativo a 10%

** - Estatisticamente significativo a 5%

*** - Estatisticamente significativo a 1%

n.s. - Estatisticamente não-significativo

Os intervalos compartilham uma observação comum: todos os valores são próximos de zero. Isso significa que todos os combustíveis são inelásticos, pouco sensíveis às variações dos preços. Essa conclusão é quase um consenso nos trabalhos revisados, tendo sido exposta por Serletis, Timilsina e Vasetsky (2011; 2010b) e Steinbuks e Narayanan (2015), para painéis de países, e por Steinbuks (2012), para o Reino Unido.

Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010b) validaram o uso da forma funcional Translog, usando, dentre outros argumentos, o fato de não terem encontrado valores positivos de elasticidade própria. Por este ponto de vista, os coeficientes encontrados aqui poderiam ser interpretados como resultados de um modelo mal especificado. Por outro lado, o desenvolvimento metodológico, visando um resultado específico, deixa aberta a possibilidade de ocultação ou minimização de um efeito real. Um desses efeitos são intervenções que estão além da relação de preços, limitando as livres negociações de mercado, como lembrou Considine (1989) e Xingang e Pingkuo (2013). Os coeficientes positivos encontrados aqui serviram de guia para a identificação de quebras estruturais estatisticamente significativa. Também chegaram a valores positivos Xingang e Pingkuo (2013) e Steinbuks e Narayanan (2015). Além desse fato, não houve outro indício que invalidasse o uso de uma função Translog no contexto deste trabalho.

Em cinco, das onze elasticidades aos próprios preços estatisticamente significativas, os valores foram positivos. Três delas se concentram no último intervalo. Considerando também as elasticidades cruzadas, os coeficientes das relações com o carvão foram predominantemente maiores. No entanto, não foram constantes. Quase todos os valores não significativos estatisticamente (cinco em sete) envolveram este combustível. Steinbuks e Narayanan (2015) também encontraram grande volatilidade nas elasticidades-preço deste combustível ao longo do painel que analisaram. Tanto eles, quanto Steinbuks (2012), Serletis, Timilsina e Vasetsky (2011) e Zhang (2012), tiveram os maiores coeficientes de elasticidades nas relações que incluíram o carvão.

Os valores medianos das elasticidades-preço da demanda permitiram chegar nas elasticidades de substituição de Allen, mostradas na Tabela 5, para o período completo.

Tabela 5 - Elasticidade de substituição de Allen entre os combustíveis fósseis

| $\sigma^{A_{ij}}$ | P | C | N |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| P | -0,0322 (0,0401) | 0,0777 (0,3183) | 0,0380 (0,1805) |
| C | 0,0064 (0,3429) | -0,2872 (3,7308) | -0,0129 (0,5289) |
| N | 0,0678 (0,1749) | -0,1684 (0,6101) | -0,0804 (0,7262) |

Fonte: resultado da pesquisa

Os dados são apresentados como nas elasticidades-preço da demanda, com os coeficientes em negrito e os respectivos desvios padrões entre parênteses e em itálico. Também não são estatisticamente significativos quando se considera todo o período, mas a maioria passa a ser ao se analisar dentro dos quatro intervalos, o que é feito na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de elasticidades de substituição de Allen dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos

| INTERVALO | σ_{ij}^A | P | C | G |
|-----------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | P | -0,01284 n.s. (0,0196) | | |
| | C | 0,30861 *** (0,0884) | -1,24942 *** (0,3123) | |
| | G | -0,23825 ** (0,1235) | -0,10433 n.s. (0,1680) | 0,55274 n.s. (0,5377) |
| 2 | P | -0,05261 *** (0,0143) | | |
| | C | 0,11231 *** (0,0397) | -0,50294 * (0,3103) | |
| | G | 0,07326 *** (0,0215) | 0,15121 * (0,1102) | -0,17537 *** (0,0955) |
| 3 | P | -0,03961 ** (0,0223) | | |
| | C | -0,63929 ** (0,2753) | 4,92998 n.s. (4,0590) | |
| | G | 0,16871 *** (0,0446) | -0,38978 n.s. (0,3625) | -0,20296 *** (0,0721) |
| 4 | P | 0,06533 ** (0,0303) | | |
| | C | -0,22937 ** (0,0787) | 5,45086 *** (1,8397) | |
| | G | -0,13838 n.s. (0,1409) | -1,73023 ** (0,6170) | 1,21635 n.s. (0,9912) |

Fonte: resultado da pesquisa

Notas: * – Estatisticamente significativo a 10%

** – Estatisticamente significativo a 5%

*** – Estatisticamente significativo a 1%

n.s. – Estatisticamente não significativo

Os valores da ESA foram usados como meio, para chegar às ESM na Tabela 7.

Tabela 7 - Elasticidade de substituição de Morishima entre os combustíveis fósseis

| σ_{ij}^M | P | C | N |
|-----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| P | - | 0,0463 (0,3301) | 0,0326 (0,1721) |

continua

| $\sigma^{M_{ij}}$ | conclusão | | |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | P | C | N |
| C | 0,0289 (0,2158) | - | -0,0081 (0,2081) |
| N | 0,0617 (0,1283) | 0,0206 (0,3320) | - |

Fonte: resultado da pesquisa

Para todo o período, os valores não são estatisticamente significativos, pelas grandes amplitudes dos coeficientes ao longo da série. Essas variações resultam em altos valores de desvio padrão. Dentro dos intervalos, ganham robustez, como mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes de elasticidades de substituição de Morishima dos combustíveis fósseis, agrupados em intervalos

| INTERVALO | $\sigma^{M_{ij}}$ | P | C | G |
|-----------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | P | - | 0,26261 *** (0,0937) | -0,17219 ** (0,1038) |
| | C | 0,20109 *** (0,0566) | - | -0,11104 n.s. (0,1065) |
| | G | -0,10573 * (0,0802) | 0,20163 ** (0,0931) | - |
| 2 | P | - | 0,07743 * (0,0525) | 0,07110 ** (0,0272) |
| | C | 0,04769 ** (0,0260) | - | 0,10368 ** (0,0511) |
| | G | 0,07372 *** (0,0159) | 0,06314 n.s. (0,0612) | - |
| 3 | P | - | -0,43115 * (0,2660) | 0,10623 ** (0,0449) |
| | C | -0,31406 ** (0,1734) | - | 0,02097 n.s. (0,1054) |
| | G | 0,12202 *** (0,0298) | -0,42326 * (0,2698) | - |
| 4 | P | - | -0,42844 *** (0,1216) | -0,26275 * (0,1702) |
| | C | -0,21281 *** (0,0718) | - | -0,48788 ** (0,2122) |
| | G | -0,15020 n.s. (0,1292) | -0,59548 *** (0,1515) | - |

Fonte: resultado da pesquisa

Notas: * – Estatisticamente significativo a 10%
 ** – Estatisticamente significativo a 5%
 *** – Estatisticamente significativo a 1%
 n.s. – Estatisticamente não significativo

Os coeficientes, em negrito, com valores negativos, indicam que há relação de complementariedade entre os combustíveis. São substitutos quando a elasticidade retorna valor positivo. De forma geral, os coeficientes de elasticidade são muito próximos de zero, indicando que a variação na demanda de um é pouco sensível à variação do preço de outro. Mas é possível notar que os valores aumentam ao longo da série. Esse aumento pode ser explicado por haver maior integração no mercado de energia no período mais recente do que havia anteriormente, como concluíram Steinbuks e Narayanan (2015), e Zhang (2012). No primeiro intervalo, o maior valor foi, em módulo, de 0,26, na relação entre o petróleo e o carvão. No terceiro, esses mesmos combustíveis tiveram uma ES de 0,43 e número semelhante no intervalo seguinte. A relação entre o GN e o carvão também foi relativamente alta, tendo sido de quase 0,6 no último intervalo.

Em 1973 o preço do barril do petróleo era de US\$17,553³⁸ (BRITISH PETROLEUM, 2016). No ano seguinte, subiu para US\$55,689. Em 1980 chegou a US\$105,939, aumento de 603% no período. Essa disparada nos preços ficou conhecida como o Primeiro Choque do Petróleo e causou uma grave crise internacional. O GN ainda tinha usos restritos e os preços eram diretamente atrelados ao preço do petróleo no mercado internacional, o que explica parcialmente não ter sido possível notar uma relação de substituição entre estes dois, como mostra a Tabela 9. A relação com o carvão foi de substituição, sugerindo que esta fonte supriu parte da demanda que era do petróleo e do GN.

Tabela 9 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1970 a 1981

| σ_{ij}^M | P | C | G |
|-----------------|--------------|------------|--------------|
| P | - | SUBSTITUTO | COMPLEMENTAR |
| C | SUBSTITUTO | - | N.S. |
| G | COMPLEMENTAR | SUBSTITUTO | - |

Fonte: resultado da pesquisa

Nota: N.S. - Estatisticamente não significativo

As décadas de 1970 e 1980 foram marcadas por políticas de desregulamentação do mercado de energia. A estratégia dos governos da época, de deixar o mercado buscar o equilíbrio através dos preços, para não beneficiar um dos lados do mercado (oferta ou

³⁸ Valor a preço de 2015, para o petróleo tipo Brent.

demanda) em detrimento de prejuízos do outro, mostrou-se efetiva e coerente com o resultado encontrado. Tal fato fica ainda mais evidente no resultado do intervalo seguinte.

As elasticidades aos próprios preços do segundo intervalo, esquematizados na Tabela 10, tiveram todos os valores condizentes com a teoria econômica. Após o Segundo Choque do Petróleo, em 1978, o preço internacional do petróleo esteve mais livre para flutuar, com menores intervenções políticas. Foi neste período que este produto passou a ser negociado na bolsa de mercadorias de Nova Iorque e que as que empresas tiveram que se tornar mais competitivas, ao custo de se verem obrigadas a fechar as portas. Também decorrente do choque, houve uma busca do mercado por usos energéticos mais eficientes e pela diversificação que permitisse diminuir a dependência americana nesta fonte primária. O GN recebeu grande atenção, movimento que se mostra nos maiores coeficientes de substituição deste intervalo (0,07 na relação com o petróleo e 0,10 na relação com o carvão). Ainda que as possibilidades fossem limitadas, dados os baixos valores dos coeficientes de uma forma geral, esse intervalo mostra que havia tecnicamente a possibilidade de substituição entre as fontes fósseis, já na década de 1980. Esse movimento, captado no consumo da energia primária, mostra que os setores que conseguiram tal substituição tinham consumos expressivos.

Tabela 10 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1982 a 1995

| σ_{ij}^M | P | C | G |
|-----------------|------------|------------|------------|
| P | - | SUBSTITUTO | SUBSTITUTO |
| C | SUBSTITUTO | - | SUBSTITUTO |
| G | SUBSTITUTO | N.S. | - |

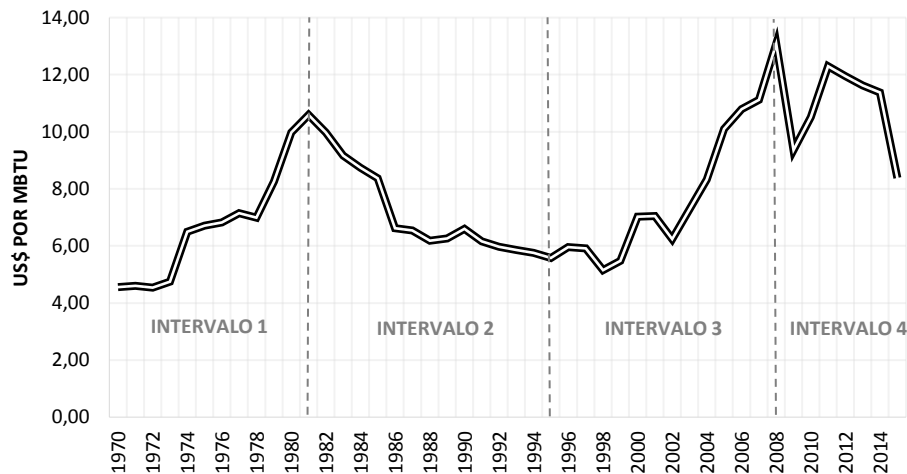
Fonte: resultado da pesquisa

Nota: N.S. - Estatisticamente não significativo

O Gráfico 9 mostra que, a partir de 1981, o preço médio com energia manteve-se em declínio até o final deste intervalo. Foi também neste intervalo que o custo médio com energia teve a menor variância, sugerindo que choques externos não foram tão impactantes como nos outros intervalos. Em 1998, decorrente de um aumento na produção de petróleo que tentava contornar a baixa capacidade ociosa da produção mundial, por um lado, e a crise econômica asiática que se espalhou pelo mundo, diminuindo a demanda do outro lado, o preço do barril despencou. Como resposta, houve um freio na produção dos membros da OPEP, reduzindo a oferta, mas que se deparou com a retomada do crescimento econômico após a crise gerada

pelo ataque ao World Trade Center em 2001, nos EUA, e o grande aumento da demanda chinesa por energia, principalmente após 2003. Neste ano também as exportações de petróleo da Venezuela para os EUA diminuíram, dadas instabilidades políticas no país ofertante.

Gráfico 9 - Custo médio da energia primária a preços de 2015 nos EUA – 1970 a 2015



Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados de gasto e consumo do SEDS (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017j) e no deflator do GDP da BEA (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2017)

A relação do carvão com o GN não foi estatisticamente significativa no segundo intervalo quando as variações ocorreram no preço do carvão. Dada a possibilidade de análise não-simétrica, é possível ver que quando a variação foi no preço do GN, o carvão apresentou uma relação de substituição com o gás.

O desenvolvimento tecnológico de extração, manuseio e uso do GN aumentou de maneira expressiva a partir dos anos 2000. Nos EUA, ele conseguiu suprir parte da demanda do petróleo quando ficou relativamente mais barato, pelo que se interpreta da ESM no terceiro intervalo, visto na Tabela 11. O carvão se apresentou como complementar ao petróleo e ao GN quando variou o preço do carvão. Quando a variação foi no preço do GN, não houve uma relação estatisticamente significativa com o carvão.

Tabela 11 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 1996 a 2008

| σ_{ij}^M | P | C | G |
|-----------------|--------------|--------------|------------|
| P | - | COMPLEMENTAR | SUBSTITUTO |
| C | COMPLEMENTAR | - | N.S. |
| G | SUBSTITUTO | COMPLEMENTAR | - |

Fonte: resultado da pesquisa

Nota: N.S. - Estatisticamente não significativo

Em meados dos anos 1990 houve uma grande diminuição da capacidade ociosa da produção de petróleo, dado um brusco crescimento da demanda. A pressão sobre a oferta no mercado internacional fez os preços subirem. O aumento do custo do petróleo, particularmente nos EUA, pode ter contribuído para um aumento no consumo do carvão para complementá-lo no uso onde essa opção existisse, especialmente nos setores industrial e residencial. O carvão é um recurso abundante nos EUA, o que permitia atender a demanda com recursos próprios. No final da década, o preço elevado e sucessivas crises internacionais frearam a demanda por energia como um todo, cujo vale pode ser percebido no Gráfico 4 entre os anos de 2000 e 2002. A demanda dos três combustíveis fósseis se retraiu nesse período, explicando, pelo menos em parte, a manutenção da relação de complementariedade entre o carvão e o petróleo.

Tanto no segundo quanto no terceiro intervalo, o GN e o petróleo se mostraram substitutos, independentemente de qual sentido se toma na análise. Dentro destes dois intervalos está compreendido o período analisado por Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010a), que chegaram à mesma conclusão de fraca substituição no setor industrial norte-americano, nos dois sentidos, ainda que com coeficientes ligeiramente maiores.

Em 2008 o mundo sofreu uma forte crise econômica. A contração foi sentida também no consumo de energia. A demanda nos EUA foi de 100,9 quatrilhão de BTU's em 2007 e caiu para 94,0 quatrilhão de BTU's dois anos depois. Esse último volume é comparável ao consumo de 1996, de acordo com os números da EIA (2017j). As elasticidades em relação aos próprios preços, sistematizadas na Tabela 12 em referência ao último intervalo, foram positivas e estatisticamente significativas para os três combustíveis, sugerindo que o mercado não operou livremente com base nos preços. Uma possível explicação é a demora na recuperação da demanda energética americana. A redução percentual no consumo de petróleo e carvão foi de dois dígitos entre 2008 e 2012. Essa retração foi também sentida nas importações, que além de reduzidas, se tornaram mais

diversificadas em relação a origem. Aliada a uma maior eficiência dos usos, a demanda primária de combustíveis fósseis não se mostrou sensível suficiente para responder às quedas dos preços.

Tabela 12 - Relações entre os combustíveis fósseis pela Elasticidade de Substituição de Morishma – 2009 a 2015

| σ_{ij}^M | P | C | G |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| P | - | COMPLEMENTAR | COMPLEMENTAR |
| C | COMPLEMENTAR | - | COMPLEMENTAR |
| G | N.S. | COMPLEMENTAR | - |

Fonte: resultado da pesquisa

Nota: N.S. - Estatisticamente não significativo

É relevante notar que no quarto intervalo, os EUA tinham o papel de ofertante de energia mais significativo do que nos intervalos anteriores. Visto de outra forma, nos intervalos anteriores o país era um demandante mais significativo do que era ofertante. Isso afeta a dinâmica econômica internamente, a partir do momento que um cenário favorável à demanda se apresenta também desfavorável para a oferta. Essa busca de equilíbrio interno pode influenciar as respostas aos preços de mercado, em especial ao preço internacional do petróleo. As políticas públicas não podem mais favorecer apenas um dos lados do mercado. As exportações dos EUA tendem a aumentar significativamente, especialmente as de petróleo e GN. As grandes reservas e as tecnologias que tornam os processos de extração e manufatura dos combustíveis relativamente mais baratos, não devem passar despercebidas pelos legisladores americanos como uma oportunidade para o presente. De um lado, a Rússia vem aumentando a influência na Europa e na Ásia com a expansão da sua imensa rede de gasodutos, mantendo um poder político e aumentando a presença econômica, também no Oriente Médio. Essa expansão vai contra os desejos e as estratégias políticas de hegemonia dos EUA. De outro, a China está na eminência de ser a maior economia do planeta, o que é visto como ameaça aos interesses americanos. Os americanos devem buscar se impor de maneira mais incisiva naquela região e a energia é um dos principais fatores desse processo.

Uma das limitações deste trabalho foi a mesma mencionada nos trabalhos de Hajko (2017) e observada nos de Steinbuks e Narayanan (2015). Ao se agrupar vários países em um único conjunto, pressupõe-se que a dinâmica econômica e os componentes da demanda por energia são similares. A presente limitação se dá quando as conclusões tiradas a partir de um

país são extrapoladas para ilustrar o comportamento do mundo todo. Os EUA possuem uma dinâmica própria, com estruturas institucionais bem diferentes, por exemplo, das chinesas. Por isso, apesar de ser um dos países com os números mais expressivos individualmente, no contexto mundial, o uso dele como uma *proxy* para o mundo deve ser adotado com resguardo e cautela.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi o de captar relações de substituição entre o GN e os outros dois combustíveis fósseis. O principal diferencial está no uso da energia primária. Todos os trabalhos estudados na revisão da literatura utilizaram uma energia após alguma etapa de processamento. Fato que se ilustra com o uso da energia elétrica sendo colocada no mesmo nível dos combustíveis fósseis. O setor de energia elétrica é um, talvez o principal, consumidor da energia primária em muitos países. Quanto mais se entra na cadeia produtiva de energia, mais complexo fica a recomposição dos valores totais pelo somatório de todas as possíveis ramificações. Por outro lado, há o reconhecimento de que os usos são diversos e, trabalhar com números primários, deixa o modelo à mercê de uma quantidade maior de influências externas. Mas é no uso primário que está o impacto de um esgotamento das reservas ou de um choque de preços, oriundo da redução da oferta, e as origens das externalidades ambientais.

Outro diferencial é o uso de um número de observações dentro de um largo período. Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010b, p. 744) lembraram que a substituição entre combustíveis no curto prazo é limitada, principalmente pela velocidade com que a tecnologia se desenvolve. Aqui se permitiu analisar os movimentos de quase meio século, período longo o suficiente para captar mudanças na matriz mundial de energia primária, o que fica nítido na Figura 1, e o desenvolvimento de novas tecnologias, como o *Fracking* e o GNL. A análise, por outro lado, foi feita para quatro distintos intervalos, definidos por quebras estruturais estatisticamente significativas nos movimentos das elasticidades-preço da demanda dos três combustíveis.

A discussão sobre o esgotamento das reservas de petróleo diverge quando se internaliza na discussão os avanços da tecnologia. O fato aceito por todos é que esse combustível irá se esgotar eventualmente e, se não for possível encontrar alternativas para manter o padrão de vida com outras fontes até lá, as consequências poderão causar profundas fraturas na forma do capitalismo a que estamos habituados.

O GN possui potencial de diminuir a dependência que se tem do petróleo e do carvão. A tecnologia disponível no início do século XXI já permitia usá-lo em aplicações que antes eram exclusivas daqueles dois. A maior sustentação para este argumento está no maior tempo de vida útil que proporcionam as reservas provadas de GN, relativamente às reservas de petróleo. Considerando o padrão de consumo dos anos 2000, a demanda de GN deve poder

se sustentar por mais um século. Há ainda o benefício de reduzir o impacto ambiental, já que é o menos poluente dos três combustíveis fósseis da matriz mundial de energia primária. Especialmente neste último quesito, as fontes renováveis, particularmente nos EUA, apresentam um movimento constante de crescimento, o que é favorável, mas ainda em proporções quase insignificantes no contexto da energia primária. Isso se traduz em uma impossibilidade de curto e médio prazo de tê-las como solução, deixando as fontes fósseis como única alternativa de manter a demanda por energia.

A análise empírica se valeu de uma função de custos para calcular as ES. Apesar de haver opiniões de que não é a mais aderente às observações reais em alguns casos, a forma funcional Translog é frequentemente utilizada para estimar a ES. Os autores Serletis, Timilsina e Vastsky (2010a; 2011) defendem o uso das funções QN, afirmando que elas fazem uma melhor representação da realidade. Serletis, Timilsina e Vastsky (2011) também citam vantagens relativas do modelo generalizado de Barnett (Generalized Barnett Model). Steinbuks (2012) e Steinbuks e Narayanan (2015) defendem o uso da versão dinâmica de um modelo Logit Linear que, segundo eles, oferece um melhor ajustamento do que a Translog. Mesmo Considine (1989), que aponta o modelo Translog como uma boa opção para contornar as restrições implícitas das funções CES, ressalva que em alguns casos ela pode não ser a mais indicada. No entanto, a Translog foi a opção de Serletis, Timilsina e Vastsky (2010b), Zhang (2012), Xingang e Pingkuo (2013), e Chunping et al. (2016), ilustrando a posição de Considine (1989) e Greene (2002), de que é a forma funcional mais utilizada e bem aceita na literatura sobre a ES. De toda forma, recomenda-se que trabalhos futuros testem cada um dos três modelos na busca de divergências dos resultados, principalmente se levarem a conclusões divergentes, e aprofundem o estudo sobre as condições que as tornam mais adequadas à análise em questão.

Os baixos valores da elasticidade-preço da demanda mostraram que os três combustíveis fósseis são inelásticos, o que sugere alta rigidez nos seus usos. Dentre os três, o carvão foi o que se apresentou menos inelástico. Ao longo da série, os valores se mostraram crescentes, fruto da maior integração no setor de energia. Em três dos quatro intervalos, encontraram-se valores positivos da elasticidade própria. Considine (1989), Xingang e Pingkuo (2013) e Zhang (2012) lembraram que uma possível causa são as interferências fora das relações de mercado, como políticas de governo intervencionistas ou regulatórias. Os trabalhos de Xingang e Pingkuo (2013), e Steinbuks e Narayanan (2015), deixaram claro que políticas intervencionistas influenciam a demanda, com subsídios e taxas diferenciados, seja pela disponibilidade ou não de um recurso internamente, seja por estratégias de segurança

energética ou de desenvolvimento tecnológico e econômico. Partindo dessa ideia, sugere-se para trabalhos futuros uma investigação sobre quais são os fatores institucionais que freiam ou aceleram o processo de substituição.

As ES retornaram valores próximos de zero, o que indica que a possibilidade de substituição dentre os combustíveis analisados ainda é limitada. No entanto, ela foi crescente ao longo do tempo. Serletis, Timilsina e Vasetsky (2010a; 2011), Steinbuks (2012) e Xingang e Pingkuo (2013) também destacaram os baixos valores nas suas análises. Mas, ainda dentro dessa limitação, é possível haver substituição, como foi constatado pela ESM no período de 1982 a 1995. Neste intervalo, a demanda conseguiu reagir com maior liberdade frente a variações nos preços. Porém, fatores externos não captados pela relação preço/quantidade claramente influenciaram as opções de mercado, com efeitos mais nítidos no intervalo após a crise de 2008. Conclui-se que a possibilidade de substituição dentre os combustíveis fósseis existe, mas encontra resistências fora dos limites do livre mercado e da tecnologia, como interferências políticas e estratégias oligopolistas. Conclui-se também que a rigidez era maior no passado do que nos períodos mais recentes.

Não ficou evidente haver uma mudança em curso no período analisado, que diminua a importância – também a dependência – do petróleo e do carvão, com base no que se observa na maior economia do mundo. Os trabalhos referenciados, quando observaram alguma transição de fontes sujas e escassas para outras limpas e renováveis, como o de Xingang e Pingkuo (2013), foram pontuais. Fica claro um descolamento das preocupações teóricas, como as levantadas por Barros, (2007), Porto (2007), Silva e Rodrigues (2015), Johnston (2010), Miller e Sorrel (2014), Woolsey, Kleinfeld e Sexton, (2010), Considine et al. (2009), Koskinen (2016), Economides e Wood (2009) e Carvalho (2009), que defendem e preveem o aumento da participação do GN em relação ao petróleo e o carvão, das observações empíricas.

O GN não é a solução para o problema da escassez, nem para o da poluição. Figura como um meio interessante e possível no curto prazo para frear os danos ao meio ambiente e flexibilizar uma matriz altamente dependente. Contar com a tecnologia futura para não se preocupar com um problema de escassez é acomodar as expectativas num colchão de otimismo. Seja em 2030, 2050 ou 2100, a principal fonte de energia que move o planeta não estará mais disponível. Quanto antes começar o processo de substituição, mais suaves devem ser os impactos da transição. Não ser possível identificar um processo claro e consistente de substituição entre o petróleo e o carvão, e o GN, é preocupante, porque pode causar uma inverídica sensação de que não há um problema eminente a ser enfrentado por dirigentes e sociedades de todo o mundo.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, D. F. A ascensão da China como potência mundial: uma análise a partir da questão nuclear. **Novas Fronteiras**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, julho 2014. 1-17. Disponível eletronicamente em <<http://novasfronteiras.espm.br/index.php/RNF/article/viewFile/37/36>>. Acesso em: dezembro de 2016.
- APERGIS, N.; PAYNE, J. E. Natural gas consumption and economic growth: a panel investigation of 67 countries. **Applied Energy**, Vasteras, v. 87, n. 8, fevereiro 2010, p. 2759-2763. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910000048>>. Acesso em: fevereiro de 2017.
- BAHIA, R. R.; LUCZYNSKI, E. Avaliações econômicas de cenários e matrizes: demanda/oferta de petróleo/gás natural e de geração de energia elétrica - Brasil: 2000-2020. **IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. Itajubá: EFEI, 2004. Disponível em <seeds.usp.br>. Acesso em: dezembro de 2016.
- BARBOSA, F. H. **Microeconomia**: teoria, modelos econométricos e aplicações à economia brasileira. Rio de Janeiro: IPEA/INPES, 1985.
- BARROS, E. V. D. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, junho de 2007. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/26514418_A_matriz_energetica_mundial_e_a_competitividade_das_nacoes_bases_de_uma_nova_geopolitica>. Acesso em: novembro de 2016.
- BERNDT, E. R.; CHRISTENSEN, L. R. The internal structure of functional relationships: separability, substitution and aggregation. **The Review of Economic Studies**, Inglaterra, v. 40, n. 3, julho 1973. 9. Disponível em <<https://www.jstor.org/stable/2296459>>. Acesso em: dezembro de 2017.
- BILDIRICI, M. E.; BAKIRTAS, T. The relationship among oil, natural gas and coal consumption and economic growth in BRICTS (Brazil, Russian, India, China, Turkey and South Africa) countries. **Energy**, Aalborg, v. 65, n. 1, fevereiro 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213010633>>. Acesso em: março de 2017.
- BLACKORBY, C.; RUSSEL, R. Will the real elasticity of substitution please stand up? A comparison of the Allen/Uzawa and Morishima elasticities. **The American Economic Review**, Nashville, v. 79, n. 4, setembro 1989. Disponível em <<http://www.jstor.org.ez89.periodicos.capes.gov.br/stable/pdf/1827940.pdf?refreqid=excelsior:68db906fb67bfe8e8c2b2b9076742310>>. Acesso em: junho de 2017.
- BORDOFF, J. America's Energy Policy: from independence to interdependence. **Horizons**, Belgrado, n. N. 8, p. 180-204, Outono 2016. Disponível em: <<https://www.cirsd.org/en/horizons/horizons-autumn-2016--issue-no-8/americas-energy-policy-from-independence-to-interdependence>>. Acesso em: agosto de 2018.

BRAGAGNOLO, C. et al. Elasticidades de substituição, preço direta e preço cruzada na produção de leite para Minas Gerais. In: **Congresso da Sociedade Brasileira de Economia Administração e Sociologia Rural (SOBER)**, 48ª edição. Campo Grande: SOBER, 2009. Disponível em < <http://www.sober.org.br/palestra/15/1115.pdf> >. Acesso em: junho de 2017.

BRITISH PETROLEUM. Statistical Review. **BP Statistic Review of World Energy 2016**, 2016. Disponível em: <<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>>. Acesso em: Março 2017.

CARVALHO, J. F. D. **O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

CASTRO, E. R. **Crédito rural e oferta agrícola no Brasil**. Tese (Doutorado em Economia e Gerenciamento do Agronegócio) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. Disponível em <<http://locus.ufv.br/handle/123456789/112>>. Acesso em: junho de 2017.

CASTRO, E. R. et al. Teoria da Produção. In: SANTOS, M. L.; LÍRIO, V. S.; VIEIRA, W. C. **Microeconomia Aplicada**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2009. Cap. 7, p. 235.

CASTRO, E. R. et al. Teoria dos custos. In: SANTOS, M. L.; VIEIRA, W. C.; LÍRIO, V. S. **Microeconomia aplicada**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2009. Cap. 8, p. 649.

CASTRO, E. R.; TEIXEIRA, E. C.; FIGUEIREDO, A. M. Função Transcendental Logarítmica - Translog: teoria e aplicação. In: SANTOS, M. L.; VIEIRA, W. C. **Métodos quantitativos em economia**. Viçosa: UFV, v. Único, 2004. Cap. 16, p. 653.

CHIANG, A. C. **Matemática para economistas**. Tradução de Roberto C. Moraes. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 684 p.

CHRISTENSEN, L. R. Conjugate Duality and the Transcendental Logarithmic Function. **Econometrica**, Cleveland, v. 39, n. 4, julho 1971. Pag. 251-266. Disponível em < <https://www.econometricsociety.org/publications/econometrica/issue/1971/07/> >. Acesso em: junho de 2017.

CHUNPING, X. et al. Possibilities of coal - gas substitution in East Asia: A comparison among China, Japan and South Korea. **Natural Gas Industry B**, Beijing, v. 3, n. 4, Outubro 2016. Disponível eletronicamente em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235285401630078X> >. Acesso em: fevereiro de 2018.

CONSIDINE, T. J. Separability, functional form and regulatory policy in models of interfuel substitution. **Energy Economics**, v. 11, n. 2, Abril 1989, p.82-94. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140988389900017> >. Acesso em: fevereiro de 2017.

CONSIDINE, T. J. et al. An emerging giant: prospects and economic impacts of developing Marcellus shale natural gas play. **Pennstate**, Pennsylvania, Julho 2009. Disponível em: <<https://www.bucknell.edu/script/environmentalcenter/marcellus/default.aspx?articleid=3>>. Acesso em: fevereiro 2017.

DIEWERT, W. E. Applications of Duality Theory. In: INTRILIGATOR, M.; KENDRICK, D. A. **Frontiers of Quantitative Economics**. 2. ed. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1974. Cap. 3, p. 106.

_____. Duality approaches to microeconomic theory. In: INTRILIGATOR, M. D.; ARROW, K. J. **Handbook of mathematical economics**. 6^a. ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, v. 2, 1998. Cap. 12, p. 535.

ECONOMIDES, M. J.; WOOD, D. A. The state of natural gas. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Texas, v. 1, n. 1, julho 2009, p.1-13. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187551000900002X>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

ERSAN, Y. Limits of China and Russia energy deal. **Foreign Policy News**, Washington D.C., 4 abril 2015. Disponível em <<http://foreignpolicynews.org/2015/04/04/limits-of-china-and-russia-energy-deal/>>. Acesso em: abril de 2017.

EIEWS. **EViews 7 User's Guide**. Irvine: QMS, v. II, 2010.

FARIAS, T. A.; FIGUEIREDO, L. E. N.; ARAÚJO, E. M. A elasticidade preço, substituição de Allen, Morishima e o retorno de escala dos insumos: uma aplicação da função custo Translog no setor agropecuário dos municípios do submédio do Rio São Francisco. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, v. 16, n. 30, dezembro 2014. Disponível em <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/rde/article/view/3159>>. Acesso em: junho de 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, v. 72, dez-jan 2006, p.6-15. Disponível em <www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382>. Acesso em: dezembro de 2016.

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5^a ed. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HAJKO, V. The failure of Energy-Economy Nexus: a meta-analysis of 104 studies. **Energy**, Aalborg, v. 125, n. 15, abril 2017, p.771-787. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217302773>>. Acesso em: abril de 2017.

HAMILTON, J. D. Historical Oil Shocks. **The National Bureau of Economic Research**, Cambridge, texto para discussão n. 16790, fevereiro de 2011. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w16790>>. Acesso em: 18 janeiro 2018.

HIRSCH, R. L.; BEZDEK, R. H.; WENDLING, R. M. **Peaking of World Oil Production: impacts, mitigation and risk management**. 1^a. ed. Pittsburg: University of North Texas, 2007. Disponível em: <<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc901356/>>. Acesso em: 18 janeiro 2018.

HOFFMANN, R. **Estatística para Economistas**. 4ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

HOWARTH, R. W.; SANTORO, R.; INGRAFFEA, A. Methane and the greenhouse-gas footprint of Natural Gas from Shale formations. **Climatic Change**, Ithaca, 106, n. 4, junho 2011, p. 679-690. Disponível em <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0061-5>>. Acesso em: dezembro de 2016.

HUNT, S. Everything is coming up battery storage. **American Legislative Exchange Council (ALEC)**, Washington D.C.: Innovation, Novembro de 2016. Disponível em <<https://www.alec.org/article/everything-is-coming-up-battery-storage/>>. Acesso em: janeiro de 2017.

INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH. U.S. **Oil and Natural Gas Reserves Jumped in 2010**, 7 de agosto de 2012. Disponível em: <<https://instituteforenergyresearch.org/analysis/u-s-oil-and-natural-gas-reserves-jumped-in-2010-according-to-eia/>>. Acesso em: 13 Março 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Atlas**. International Energy Agency. Paris. 2017. Disponível em <<https://www.iea.org/statistics/ieaenergyatlas/>>. Acesso em: janeiro de 2017.

INTRILIGATOR, M.; KENDRICK, D. A. **Frontiers of Quantitative Economics**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, v. 2, 1974.

JOHNSTON, P. F. Arctic Energy Resources and Global Energy Security. **Journal of Military and Strategic Studies**, Calgary, v. 12, n. 2, 2010, p. 1-20. Disponível em <<http://jmss.journalhosting.ucalgary.ca/jmss/index.php/jmss/article/view/298/322>>. Acesso em: janeiro de 2017.

KMENTA, J. **Elementos de econometria**. São Paulo: Atlas, 1978.

KOSKINEN, O. **Evaluation of the main energy scenarios for the global energy**. Tese (Mestrado em Tecnologias de Energia) - Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, maio de 2016. Disponível em <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/123460/diplomityo_Koskinen_Otto.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Acesso em: dezembro de 2016.

KUMAR, S. et al. Current status and future projections of LNG demand and supply: a global perspective. **Energy Policy**, Buckingham, v. 39, n. 7, julho 2011. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511002618>>. Acesso em: abril de 2017.

MANHÃES, G. F. **Elasticidade de substituição**: contribuição à análise de competitividade da indústria brasileira de celulose. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-01062011-130256/en.php>>. Acesso em: junho de 2017.

MENEZES, B. C. Estudo da diversificação energética das empresas de petróleo. In: **3º Congresso Brasileiro em Petróleo e Gás**. Salvador: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2005. Disponível em <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0443_05.pdf>. Acesso em: dezembro de 2016.

MILLER, R. G.; SORREL, S. R. The future of oil supply. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 372:20130179, Londres, 2014. Disponível em <<http://rsta.royalsocietypublishing.org>>. Acesso em: março de 2017.

NAKHLE, C. China at the center of global energy change. **Crystol Energy**, Londres, 21 de Agosto de 2016, p. 1-9. Disponível em: <<http://www.crystolenergy.com/china-center-global-energy-change/>>. Acesso em: janeiro de 2017.

NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA. National Data. **Annual Indicators of Energy**, 2017. Disponível em: <<http://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=C01>>. Acesso em: 10 Março 2017.

ODELL, P. R. **Fossil fuel resources in the 21st century**. Viena: [s.n.]. 1998.

OLIVEIRA, L. K. **Energia como recurso de poder na política internacional: geopolítica, estratégia e o papel do centro de decisão energética**. Tese (Doutorado em Ciência Política) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/76222>>. Acesso em: agosto de 2018.

PARKS, R. W. Efficient Estimation of a System of Regression Equations when Disturbances are Both Serially and Contemporaneously Correlated. **Journal of the American Statistical Association**, Londres, v. 62, n. 318, 1967. Disponível em <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1967.10482923>>. Acesso em: 13 de junho de 2018.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometria: modelos e previsões**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

_____. **Microeconomia**. 6ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. 670 p.

POLIKAR, M.; CYR, T.; SADLER, K. Alberta oil sands: the advance of technology, 1978-1998 and beyond. In: **7ª International Conference on Heavy Crudes and Tar Sands**. Pequin: UNITAR/INDP. 1998, p.91-101. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/290874182_Alberta_oil_sands_The_advance_of_t_echnology_1978-98_and_beyond>. Acesso em: janeiro de 2017.

PORTO, M. **O crepúsculo do petróleo: acabou-se a gasolina, salve-se quem puder!** São Paulo: Brasport, 2007.

RITCHIE, H.; ROSE, M. Energy Production & Changing Energy Source. **Our World in Data**, 2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources/>>. Acesso em: março 2017.

ROGNER, H. H. Energy Resources. In: PROGRAMME, U. N. D. **Energy and the challenge of sustainability**. Nova Iorque: [s.n.], 2000. Cap. 5. Disponível em <<http://www.undp.org/content/dam/aplaws/publication/en/publications/environment-energy/www-ee-library/sustainable-energy/world-energy-assessment-energy-and-the-challenge-of-sustainability/World%20Energy%20Assessment-2000.pdf>>. Acesso em fevereiro de 2017.

ROSEN, D. H.; HOUSER, T. China Energy: a guide for the perplexed. **Peterson Institute for International Economics**, Washington D.C., maio de 2007. Disponível em <<https://piie.com/publications/papers/rosen0507.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

SANTOS, M. L.; FIGUEIREDO, A. M.; CASTRO, E. R. Teoria da Dualidade. In: SANTOS, M. L.; LÍRIO, V. S.; VIEIRA, W. D. C. **Microeconomia Aplicada**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2009. Cap. 4, p. 133.

SARI, R.; EWING, B. T.; SOYTAS, U. The relationship between disaggregate energy consumption and industrial production in the United States: an ARDL approach. **Energy Economics**, Brighton, v. 30, n. 5, setembro de 2008, p. 2302-2313. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988307001326>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

SERLETIS, A.; TIMILSINA, G. R.; VASETSKY, O. International evidence on sectoral interfuel substitution. **The Energy Journal**, 3 fevereiro 2010a. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41323377?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: abril 2017.

_____. Interfuel substitution in the United States. **Energy Economics**, Brighton, v. 32, n. 3, maio de 2010b, p. 737-745. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988310000241>>. Acesso em: abril de 2017.

_____. International evidence on aggregate short-run and long-run interfuel substitution. **Energy Economics**, Calgary, v. 33, n. 2, março de 2011, p. 209-216. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988310000939>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

SILVA, A. C.; RODRIGUES, T. F. A segurança energética e um modelo para o futuro da Europa. **Relações Internacionais**, Lisboa, v. 46, n. 1, junho 2015. Disponível em <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?pid=S1645-91992015000200002&script=sci_arttext&tlng=es>. Acesso em: dezembro de 2016.

SOUZA, A. M.; SAMOBYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Aplicação de um modelo paramétrico multivariado para o controle da temperatura de fornos de túnel. **Revista Produção**, São Paulo, v. 14, n. 2, 2004, p.82-94. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v14n2/prodv14n2a7.pdf>>. Acesso em: junho de 2017.

STEINBUKS, J. Interfuel Substitution and Energy Use in the U.K. Manufacturing Sector. **The Energy Journal**, Toronto, v. 33, n. 1, 2012, p. 1-29. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/41323344>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

STEINBUKS, J.; NARAYANAN, B. G. Fossil fuel producing economies have greater potential for industrial interfuel substitution. **Energy Economics**, Washington D.C., v. 47, n. 1, janeiro de 2015, p. 168-177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988314002680>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

SUGANUMA, R. Sistema de equações simultâneas. In: VASCONCELLOS, M. A. S.; ALVES, D. **Manual de Econometria: nível intermediário**. São Paulo: Atlas, 2000. Cap. 8, p. 163-197.

THE WORLD BANK. **Energy Use** (Kg of oil equivalent per capita), 2014. Disponível em: <[http://data.worldbank.org/share/widget?indicators=EG.USE.PCAP.KG.OE" width='450' height='300' frameBorder='0' scrolling='no'](http://data.worldbank.org/share/widget?indicators=EG.USE.PCAP.KG.OE)>. Acesso em: março 2017.

_____. World Development Indicators. **DataBank**, Nova Iorque, 2017. Disponível em: <<http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&type=metadata&series=NY.GD.P.DEFL.ZS#>>. Acesso em: Março 2017.

TORRES FILHO, E. T. O papel do petróleo na geopolítica americana. **II Conferência Nacional de Política Externa e Política Internacional: Seminário Estados Unidos**. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão. 2008. Disponível em: <http://www.funag.gov.br/biblioteca/dmdocuments/Estados_unidos_presentes_e_desafios.pdf>. Acesso em: novembro de 2016.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. National Economic Accounts. **Bureau of Economic Analysis**, 2017. Disponível em: <<https://bea.gov/national/index.htm#gdp>>. Acesso em: dezembro 2017.

U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. The Trans-Alaska Pipeline. **Alaska Public Lands Information Centers**, Anchorage, [S/D]. Disponível em: <<https://www.alaskacenters.gov/explore/attractions/trans-pipeline>>. Acesso em: agosto de 2018.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **State Energy Data System 2015 - Price and Expenditure Technical Notes**. State Energy Data System. Washington D.C., p. 161. 2015. Disponível em: <https://www.eia.gov/state/seds/sep_prices/notes/pr_technotes.pdf>. Acesso em: dezembro de 2017.

_____. **Today in Energy**, 5 Maio 2016. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26112>>. Acesso em: março 2018.

_____. **About EIA**. Independent Statistic & Analysis, 2017a. Disponível em: <https://www.eia.gov/about/information_quality_guidelines.php>. Acesso em: junho 2017.

_____. **Coal Markets** - Average weekly coal commodity spot prices, 19 de junho de 2017b. Disponível em: <<https://www.eia.gov/coal/markets/>>. Acesso em: junho 2017.

_____. **Energy Explained**, 13 de junho de 2017c. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=about_btu>. Acesso em: janeiro 2018.

_____. **Glossary**, 2017d. Disponível em: <<https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php>>. Acesso em: junho 2017.

_____. **International Energy Statistics**, 2017e. Disponível em: <<http://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#/?c=rurvrvvfvvtvnnvvlurvrvvfvvvvvvfvvvou20evvvvvvvvvvuvu&ct=0&vs=INTL.44-1-AFG-QBTU.A&cy=2014&vo=0&v=H&start=1980&end=2014>>. Acesso em: dezembro de 2016.

_____. **Natural Gas**, junho de 2017f. Disponível em: <<https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>>. Acesso em: junho 2017.

_____. **Petroleum & Other Liquids - Definitions, Sources and Explanatory Notes**, 2017g. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/TblDefs/pet_pri_spt_tbldef2.asp>. Acesso em: junho 2017.

_____. **Petroleum & Other Liquids - Spot Prices**, 2017h. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm>. Acesso em: junho 2017.

_____. **Short-Term Energy Outlook - Coal**, 6 de junho de 2017i. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/coal.cfm>>. Acesso em: junho 2017.

_____. **State Energy Data System (SEDS). Independent Statistic & Analysis**, 30 de junho de 2017j. Disponível em: <<https://www.eia.gov/state/seds/seds-data-complete.php>>. Acesso em: janeiro 2018.

_____. **Total Crude Oil and Products Imports**, 2017k. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_move_impcus_a2_nus_ep00_im0_mbb1_m.htm>. Acesso em: agosto 2018.

_____. **Total Energy - Monthly Energy Review**, 25 de maio de 2017l. Disponível em: <<https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.php>>. Acesso em: junho 2017.

VARIAN, H. R. **Intermediate Microeconomics - A modern approach**. 8ª ed. Nova Iorque: WW Norton, 2010.

WINGFIELD, B. U.S. Crude Oil Export Ban. **Bloomberg**, Londres, 18 de dezembro de 2015. Disponível em: <www.bloomberg.com/quicktake/u-s-crude-oil-export-ban>. Acesso em: agosto de 2018.

WOOLSEY, R. J.; KLEINFELD, R.; SEXTON, C. No strings attached: the case for a distributed grid and a low-oil future. **World Affairs**, Washington D.C., v. 173, n. 3, setembro-outubro de 2010, p. 59-64. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/27870302>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

XINGANG, Z.; PINGKUO, L. Substitution among energy sources: an empirical analysis on biomass energy for fossil fuel of China. **Renewable and Sustainable Reviews**, Belfast, v. 18, n. 1, fevereiro de 2013, p. 194-202. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005709> >. Acesso em: fevereiro de 2018.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating Seemingly Unrelated Regressions and test for aggregation bias. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 57, n. 298, junho de 1962, p. 348-368. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2281644?seq=1#page_scan_tab_contents >. Acesso em: junho de 2017.

ZHANG, L. Research of coal substituting oil (natural gas) in China. **Physics Procedia**, Amsterdam, v. 25, abril de 2012, p. 1409-1413. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212006700> >. Acesso em: fevereiro de 2018.

APÊNDICE A - Síntese dos trabalhos revisados que trataram da substituição entre combustíveis

| AUTORES | ANO PUBLICAÇÃO | RESTRICÇÃO GEOGRÁFICA | RESTRICÇÃO TEMPORAL | MODELO FUNCIONAL | FATORES |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--|
| Serletis, Timilsina e Vasetsky | 2010a | Painel de 15 países | 1980 a 2006 | Quadrados Normalizados | Petróleo Carvão GN Eletricidade |
| Serletis, Timilsina e Vasetsky | 2010b | EUA | 1960 a 2007 | Translog | Petróleo Carvão GN Eletricidade |
| Serletis, Timilsina e Vasetsky | 2011 | Painel de 15 países | 1980 a 2006 | Quadrados Normalizados | Petróleo Carvão GN Eletricidade |
| Steinbuks | 2012 | Reino Unido | 1990 a 2007 | Logit Linear | Petróleo Carvão GN Eletricidade |
| Zhang | 2012 | China | 1978 a 2005 | Translog | Petróleo Carvão GN Capital |
| Xingang e Pingkuo | 2013 | China | 1987 a 2012 | Translog | Petróleo Carvão Biomassa |
| Steinbuks e Narayanan | 2015 | Painel de 63 países | 1978 a 2008 | Logit Linear | Petróleo Carvão GN Eletricidade |
| Chunping et al. | 2016 | China, Japão e Coréia do Sul | 1985 a 2012 | Translog | Petróleo Carvão GN Eletricidade |

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B - Síntese das variáveis usadas no modelo

| REF. | NOME DA VARIÁVEL | CÓDIGO SEDS | DESCRIÇÃO | TIPO | UNIDADE |
|------|--|-------------|--|-----------------|----------------------------------|
| 1 | All petroleum products total consumption excluding fuel ethanol* | PMTCB | Consumo de todos os produtos derivados do petróleo, excluindo o consumo de etanol | Consumo | Bilhão de BTU |
| 2 | Coal total consumption* | CLTCB | Consumo total de carvão | Consumo | Bilhão de BTU |
| 3 | Coal coke net imports into the united states* | CCNIB | Saldo líquido das importações de carvão para os EUA | Consumo | Bilhão de BTU |
| 4 | Natural gas total consumption (excluding supplemental gaseous fuels)* | NNTCB | Consumo total de gás natural seco, excluindo outros gases combustíveis | Consumo | Bilhão de BTU |
| 5 | Supplemental Gaseous Fuels Total Consumed* | SFTCB | Consumo total de gases combustíveis suplementares extraídos junto com o gás natural | Consumo | Bilhão de BTU |
| 6 | All petroleum products total expenditures* | PATCV | Despesa total com todos os produtos derivados do petróleo | Despesas | Millhão de dólares (US\$) |
| 7 | Coal coke net imports expenditures, united states* | CCNIV | Saldo líquido das despesas com importação de carvão para os EUA | Despesa | Millhão de dólares (US\$) |
| 8 | Coal total expenditures* | CLTCV | Despesa total com carvão | Despesa | Millhão de dólares (US\$) |
| 9 | Natural gas total expenditures (including supplemental gaseous fuels)* | NGTCV | Despesa total com gás natural seco, excluindo outros gases combustíveis | Despesa | Millhão de dólares (US\$) |
| 10 | All petroleum products average price, all sectors* | PATCD | Preço médio de todos os derivados de petróleo para todos os setores | Preço | Dólares (US\$) por milhão de BTU |
| 11 | Coal average price, all sectors* | CLTCD | Preço médio do carvão para todos os setores | Preço | Dólares (US\$) por milhão de BTU |
| 12 | Natural gas average price, all sectors (including supplemental gaseous fuels)* | NGTCD | Preço médio do gás natural, incluindo outros gases combustíveis, para todos os setores | Preço | Dólares (US\$) por milhão de BTU |
| 13 | Implicit price deflator for GDP** | - | Deflator implícito do Produto Nacional Bruto (GDP) dos EUA | Índice de preço | Índice |

Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados da *SEDS (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017j) e **BEA (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2017)

**APÊNDICE C - Valores da elasticidade-preço da demanda dos combustíveis fósseis nos
EUA – 1970 A 2015**

| | | | | <i>conclusão</i> | | | |
|------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| ANO | η_{pp} | η_{cc} | η_{nn} | ANO | η_{pp} | η_{cc} | η_{nn} |
| 1970 | 0,002 | -0,157 | 0,19 | 1993 | -0,028 | -0,026 | -0,054 |
| 1971 | -0,003 | -0,187 | 0,171 | 1994 | -0,027 | -0,012 | -0,054 |
| 1972 | -0,010 | -0,204 | 0,132 | 1995 | -0,019 | -0,005 | -0,024 |
| 1973 | -0,006 | -0,200 | 0,154 | 1996 | -0,019 | 0,084 | -0,040 |
| 174 | -0,003 | -0,275 | 0,348 | 1997 | -0,024 | 0,104 | -0,059 |
| 1975 | -0,015 | -0,280 | 0,211 | 1998 | -0,030 | 0,017 | -0,069 |
| 1976 | -0,021 | -0,259 | 0,108 | 1999 | -0,023 | 0,087 | -0,054 |
| 1977 | -0,026 | -0,247 | 0,05 | 2000 | -0,017 | 0,383 | -0,065 |
| 1978 | -0,033 | -0,275 | 0,034 | 2001 | -0,034 | 0,390 | -0,101 |
| 1979 | -0,019 | -0,207 | 0,063 | 2002 | -0,024 | 0,241 | -0,072 |
| 1980 | -0,003 | -0,091 | 0,086 | 2003 | -0,030 | 0,448 | -0,095 |
| 1981 | -0,002 | -0,054 | 0,074 | 2004 | -0,025 | 0,519 | -0,088 |
| 1982 | -0,019 | -0,064 | -0,009 | 2005 | -0,023 | 0,666 | -0,088 |
| 1983 | -0,031 | -0,065 | -0,060 | 2006 | -0,009 | 0,655 | -0,057 |
| 1984 | -0,032 | -0,070 | -0,063 | 2007 | 0,002 | 0,658 | -0,028 |
| 1985 | -0,032 | -0,068 | -0,060 | 2008 | 0,009 | 0,690 | -0,005 |
| 1986 | -0,040 | -0,162 | -0,079 | 2009 | 0,001 | 0,243 | 0,010 |
| 1987 | -0,034 | -0,138 | -0,056 | 2010 | 0,023 | 0,332 | 0,100 |
| 1988 | -0,036 | -0,136 | -0,063 | 2011 | 0,053 | 0,467 | 0,269 |
| 1989 | -0,031 | -0,098 | -0,053 | 2012 | 0,069 | 0,421 | 0,453 |
| 1990 | -0,019 | -0,045 | -0,015 | 2013 | 0,060 | 0,464 | 0,336 |
| 1991 | -0,021 | -0,059 | -0,021 | 2014 | 0,048 | 0,478 | 0,230 |
| 1992 | -0,025 | -0,052 | -0,036 | 2015 | 0,030 | 0,189 | 0,180 |

continua