

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA E
DESENVOLVIMENTO

Denise Gomes de Gomes

**O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E SUA TRANSIÇÃO PARA A
ECONOMIA VERDE NO PERÍODO 1970-2016**

Santa Maria, RS
2018

Denise Gomes de Gomes

**O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E SUA TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA
VERDE NO PERÍODO 1970-2016**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento (PPGE&D) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Economia e Desenvolvimento**.

Orientador: Dr. Valny Giacomelli Sobrinho
Coorientador: Dr. Clailton Ataídes de Freitas

Santa Maria, RS
2018

Gomes, Denise Gomes de

O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E SUA TRANSIÇÃO PARA A
ECONOMIA VERDE NO PERÍODO 1970-2016 / Denise Gomes de
Gomes.- 2018.

63 p.; 30 cm

Orientador: Valny Giacomelli Sobrinho

Coorientador: Clailton Ataídes de Freitas

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Programa de
Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento, RS, 2018

1. Setor Elétrico Brasileiro 2. Economia Verde 3.
Acordo de Paris 4. Vetores I. Giacomelli Sobrinho, Valny
II. Freitas, Clailton Ataídes de III. Título.

Denise Gomes de Gomes

O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E SUA TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA
VERDE NO PERÍODO 1970-2016

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento (PPGE&D) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Economia e Desenvolvimento**.

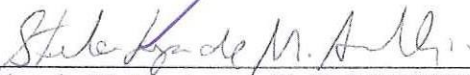
Aprovado em 31 de agosto de 2018:



Clailton Ataídes de Freitas, Dr. (UFSM)
(Presidente/Coorientador)



Anderson Antonio Denardin, Dr. (UFSM)



Stela Luíza de Mattos Ansanelli, Dr.^a (UNESP) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2018

**Aos meus pais, José Luiz e Maria Engracia,
e ao meu irmão Marcelo**

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa jornada muitas pessoas se fizeram importantes. Primeiramente agradeço a Deus por ter colocado pessoas maravilhosas perto de mim e à Ciência por ter cuidado da minha saúde. Sem saúde nada é possível nessa vida!

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Valny por toda a paciência e confiança que a mim depositou. Foi a primeira vez que tive a oportunidade de ter um orientador da área que sempre estudei e foi uma honra conhece-lo. Agradeço muito por toda a ajuda que recebi, mesmo quando ele se afastou do país. Foi ele quem me disse uma vez no saguão da Universidade essa frase que carrego comigo todos os dias: “mira na estrelinha lá em cima e esquece dos problemas aqui embaixo”. Prof. Valny, saiba que és um exemplo para mim dentro e fora do meio acadêmico.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento pelo apoio e pelo que ensinaram a mim e aos meus colegas ao longo desse período. Agradeço em especial ao Prof. Dr. Clailton, coorientador dessa dissertação, por estar sempre disponível a me ajudar.

À Fabiane, secretária do Programa, por toda a ajuda e apoio moral.

Aos meus companheiros de mestrado Alécio, Alexandre, Elen, Felipe, João, Lauana, Patricia e Uxi que se tornaram meus amigos e dividiram comigo os melhores e os piores momentos durante essa jornada. Em especial às meninas, que não mediram esforços (nem horas de sono) para que eu aprendesse os conteúdos que não pude assistir às aulas.

Agradeço também às minhas colegas de apartamento por todo o apoio moral que recebi de vocês durante minha estadia em Santa Maria. Provavelmente foram as pessoas que mais ouviram meus desabafos.

Aos meus amigos de vida por terem compreendido minha ausência nesse período e por se preocuparam comigo em todos os momentos.

Por fim, mas com certeza não menos importante, agradeço à minha família por todo o suporte emocional e apoio que recebi. Obrigada pelo carinho e compreensão, fundamentais nessa etapa da minha vida. Sem vocês nada seria possível!

RESUMO

O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E SUA TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA VERDE NO PERÍODO 1970-2016

AUTOR: Denise Gomes de Gomes
ORIENTADOR: Valny Giacomelli Sobrinho
COORIENTADOR: Clailton Ataídes de Freitas

A geração de energia elétrica, introduzida no Brasil na década de 1880, conta com demanda doméstica e industrial cada vez maior. Para atender à demanda, priorizou-se o uso das fontes de maior abundância no território nacional e, assim, a Matriz Energética nacional opera de maneira mista, com recursos renováveis e não renováveis. Ocorre no Brasil algo diferente do que acontece com a maioria dos países da ordem mundial: utiliza-se uma proporção bastante maior de recursos renováveis em comparação com a proporção de recursos não renováveis. Tal fato vai ao encontro do que é proposto pela Economia Verde, que visa atingir um desenvolvimento econômico que gere bem-estar e igualdade social concomitantemente com o melhor aproveitamento dos recursos naturais. A geração de energia recebe atenção especial pois sua produção emite gases que causam o efeito estufa e a redução desses gases é o intuito do Acordo de Paris, firmado em 2015. Com base nas premissas do Acordo de Paris e nas fundamentações da Economia Verde, esse trabalho tem por objetivo analisar, por meio do cálculo de derivadas direcionais e vetores-gradiente, se o setor elétrico brasileiro é capaz de realizar a transição para a Economia Verde sem aumentar os níveis de gás carbônico emitidos na atmosfera e sem sacrificar seu Produto Interno Bruto (PIB) de forma a atender à demanda crescente por eletricidade. Os principais resultados obtidos são que o setor elétrico do Brasil realiza uma transição à Economia Verde que pode ser considerada rápida, porém não é possível emitir uma quantidade maior de gás carbônico sem sacrificar os níveis do PIB.

Palavras-chave: Setor Elétrico Brasileiro, Economia Verde, Acordo de Paris, Vetores.

ABSTRACT

THE BRAZILIAN ELECTRICITY SECTOR AND ITS TRANSITION TO THE GREEN ECONOMY IN THE PERIOD 1970-2016

AUTHOR: Denise Gomes de Gomes
ADVISOR: Valny Giacomelli Sobrinho
CO-AVISER: Clailton Ataídes deFreitas

The generation of electric power, started off in Brazil in the 1880s, has been facing an increasing demand by households and industrial sectors. To meet this demand, the use of the most abundant inland energy sources has been given priority, thereby making the national energy matrix work in a mixed fashion, with both renewable and non-renewable resources. Unlike most of countries worldwide, in Brazil a much higher share of renewables holds as compared with that of non-renewable energy inputs. This evidence goes along with what has been put forward by the Green Economy, which seeks to achieve an economic development that brings about welfare and social equity in tandem with a better harnessing of natural resources. In this regard, energy generation deserves a closer attention, for its production gives off greenhouse gases whose reduction is target by the Paris Agreement, signed up in 2015. Based on the provisions of the Paris Agreement and on the assumptions of the Green Economy, the objective of this study is to analyse, by the calculation of directional derivatives and gradient vectors, whether the Brazilian electricity sector is able to carry out the transition to the Green Economy, both preventing the country's CO₂ emissions from rising and its GDP from falling, while meeting the increasing demand for electricity. The major finding is that the sector can fast do the transition, yet it cannot afford to emit less CO₂ without any GDP loss.

Keywords: Brazilian Electrical Sector, Green Economy, Paris Agreement, Vectors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de energia elétrica no Brasil proveniente de fontes de energia renováveis e não renováveis (1970-2016).....	18
Figura 2 – Organograma do Setor Elétrico Brasileiro.....	21
Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira (2016)	22
Figura 4 – Representação de vetores em duas e três dimensões	35
Figura 5 – Representação do ângulo θ do vetor de um vetor \vec{v}	37
Figura 6 – Ilustração gráfica das combinações de recursos e cálculos vetoriais	40
Figura 7 – Representação gráfica da função $Q = f(X, Y)$ para o período 1970-2016	44
Figura 8 - Representação gráfica da função $Z = f(X, Y)$ para o período 1970-2016	45
Figura 9 – Representação gráfica das estimativas de Q e Z para o período de 1970 a 2016.....	45
Figura 10 – Superfícies $Q = f(X, Y)$ e $Z = f(X, Y)$	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos geradores de energia elétrica em operação no Brasil até março de 2018.....	20
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais técnicas para obtenção de estimativas iniciais	32
Quadro 2 – Variáveis utilizadas no trabalho	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	HIPÓTESE	14
1.4	JUSTIFICATIVA	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	HISTÓRICO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	16
2.1.1	Configuração Atual do Setor Elétrico Brasileiro	20
2.2	EXTERNALIDADES E SUSTENTABILIDADE	23
2.3	A ECONOMIA VERDE.....	25
2.3.1	Economia Verde e Setor Energético	28
2.4	O BRASIL E O ACORDO DE PARIS.....	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	REGRESSÃO NÃO LINEAR.....	32
3.2	FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DO TIPO COBB-DOUGLAS	34
3.3	CÁLCULO VETORIAL	36
3.4	MODELO EMPÍRICO.....	38
3.4.1	Base e Fonte De Dados	39
3.4.2	Especificação Do Modelo Empírico	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	CENÁRIOS DE ANÁLISE	50
4.1.1	Transição para a Economia Verde	50
4.1.2	Acordo de Paris	52
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A – DADOS	60
	APÊNDICE B – <i>OUTPUTS</i> DAS FUNÇÕES $Q = f(X, Y)$ e $Z = f(X, Y)$	62

INTRODUÇÃO

Desde a década de 1880 há registros sobre a geração de energia elétrica introduzida no Brasil, fornecida por pequenas empresas privadas, utilizada especificamente na iluminação de locais públicos e em atividades de mineração e processamento de produtos agrícolas (BAER; McDONALD, 1997). Com o passar dos anos, a utilização da eletricidade se expandiu e o setor elétrico passou a contar com demandas doméstica e industrial cada vez maiores. O setor tornou-se estratégico tanto para o crescimento, quanto para o desenvolvimento econômico.

O Brasil é um país que necessita de uma oferta alta de energia para manter e ampliar os níveis de consumo e produção, assim, para a geração de energia elétrica, foram priorizadas as fontes de maior disponibilidade no território. Por contar com abundância de recursos passíveis de serem transformados em energia elétrica, alguns autores o classificam como potência energética e ambiental (TOLMASQUIM, 2012).

A Matriz Energética nacional, isto é, o conglomerado de todas as fontes de energia que o País dispõe para ofertar ao mercado, opera com fontes mistas, renováveis e não renováveis, de energia. O Sistema Interligado Nacional é responsável pela geração e transmissão de energia elétrica no país e é classificado como um sistema hidrotérmico, isto é, usinas hidrelétricas e usinas térmicas operam de maneira simultânea necessitando, contudo, da complementaridade das outras fontes a fim de fornecer segurança energética para seus consumidores.

Ocorre no Brasil algo bastante diferente do que acontece com a maioria dos países da ordem mundial: nesses países os recursos energéticos utilizados em larga escala são quase que na sua totalidade provenientes de petróleo e de carvão mineral e seus derivados, ao passo que no Brasil há reservas de várias fontes de energia como a eólica, a nuclear, o gás natural, os derivados do petróleo e o carvão mineral e seus derivados, além de um sistema hidroelétrico bastante amplo.

Em se tratando de energias, não se podem negligenciar as externalidades negativas decorrentes de sua geração. O processo de geração de energia - por fontes de energias renováveis e não renováveis - tem a poluição como resíduo. A geração de energia proveniente de fontes consideradas não renováveis (como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral) é uma das principais atividades emissoras dos gases que causam o efeito estufa.

Diversos acordos mundiais foram firmados com o intuito de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2). O mais recente, o Acordo de Paris, foi firmado em 2015 por 196 países. O compromisso assumido pelo Brasil foi de reduzir em 37% as emissões de CO_2 até o ano de 2025. Para o setor elétrico, o País planeja aumentar o uso de energias renováveis

diferentes da hidroelétrica, oferecer energia elétrica segura no médio e longo prazo e manter o baixo nível relativo de emissão de gases que causam o efeito estufa. Acontece que, por questões climáticas e ambientais, o País ainda precisa da complementaridade de outras energias, sobretudo da energia térmica, o que vai na contramão do proposto pelo Acordo.

A Economia Verde tem por objetivo atingir um desenvolvimento econômico que gere melhorias no bem-estar e na igualdade social, ao passo que reduz os riscos ambientais e a escassez de recursos naturais. Esta é um conjunto de processos produtivos, nos quais a geração de energia tem papel fundamental devido ao fato de esta atividade ser altamente poluente quando derivada de combustíveis fósseis. As proposições do Acordo de Paris vão ao encontro do que a Economia Verde objetiva.

A defesa de uma economia de baixa emissão de carbono, aliada ao maior uso de recursos renováveis possível, é considerada um estímulo à transição energética. Para tanto, no caso específico do setor elétrico brasileiro, é preciso que o país opere um sistema elétrico com baixa emissão de gás carbônico, alta produção e alta eficiência energética.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Expostos os argumentos da introdução, a pergunta que fica é: dadas as combinações ótimas entre recursos naturais renováveis e não renováveis, o Brasil é capaz de sustentar a demanda crescente por energia elétrica no País, sem ferir os compromissos assumidos no Acordo de Paris e sem frear o crescimento econômico e o desenvolvimento sustentável?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar se, durante o período compreendido entre 1970 e 2016, o setor elétrico do Brasil apresenta trajetória favorável à transição para a Economia Verde levando em conta as combinações ótimas entre recursos naturais renováveis e recursos naturais não renováveis para que seja possível manter (e ampliar) os níveis de oferta e de consumo sem que se aumente o dano ambiental (na forma de emissões de gás carbônico) e sem sacrificar o Produto Interno Bruto (PIB).

1.2.2 Objetivos específicos

Como forma de alcançar o objetivo geral acima proposto, três objetivos específicos para esta pesquisa foram estipulados. São eles:

1. Compreender a estrutura energética do Brasil, bem como sua consolidação a partir do ano de 2004, para entender a atual configuração da Matriz Energética brasileira e do sistema elétrico;
2. Relacionar a geração de energia elétrica advinda de recursos naturais renováveis e não renováveis com o nível de emissões de gás carbônico (CO_2) e com o PIB brasileiro; e
3. Comparar possíveis combinações ótimas de recursos naturais energéticos de diferentes Produtos Internos Brutos (PIBs) a fim de determinar o impacto destes nos níveis de geração de energia elétrica brasileira, além de averiguar se há transição energética para um modelo de Economia Verde.

1.3 HIPÓTESE

A transição para a Economia Verde em um país pode acontecer de maneira acelerada quando a mudança em sua base material e energética é decorrente de iniciativas sociais e ambientais. Um dos maiores desafios encontrados por economias que almejam o patamar da Economia Verde está em desenvolver novas formas de usar a energia e materiais e tudo aquilo que é considerado resíduo do processo de produção (ABRAMOVAY, 2012).

Cabe destacar que os autores desta linha de pensamento se respaldam em dois pontos centrais: i) não há um *trade off* entre crescimento e sustentabilidade e ii) tanto países considerados ricos, quanto os considerados pobres, podem transitar para uma Economia Verde (DINIZ & BERMAN, 2012). A inexistência do dilema entre sustentabilidade e crescimento pode ser demonstrada através da evidência empírica.

Na presente pesquisa, propõe-se um modelo de desenvolvimento socioambiental e econômico, que é a Economia Verde, aplicado à realidade do Brasil. Através de um modelo matemático, procura-se testar o grau de aprofundamento com que o país poderá (ou não) realizar a transição para a Economia Verde e ser (ou não) classificado como uma economia de baixo carbono. Essa transição deve respeitar não só os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris, através de suas Contribuições Determinadas Nacionalmente (CDNs), mas

também a disponibilidade finita de recursos passíveis de serem transformados em energia elétrica.

Os dados empíricos corroboram com a hipótese de que o setor elétrico do Brasil está realizando a transição para a Economia Verde. Esses dados mostram que o país vem gerando uma quantidade maior de eletricidade advinda de recursos naturais renováveis que emitem uma quantidade de carbono considerada nula em relação aos recursos naturais não renováveis.

Ainda assim, é preciso verificar se essa substituição se dá em extensão e velocidade suficientes para caracterizar a transição para a Economia Verde. A comparação entre os comprimentos das derivadas direcionais e dos vetores-gradiente permitirá avaliar o grau de aprofundamento ideal e possível em direção à transição para a Economia Verde

1.4 JUSTIFICATIVA

A razão mais aparente da Economia Verde é o aproveitamento de fontes inesgotáveis de energia. Isso implica substituir estoques exauríveis – como os combustíveis fósseis – por fluxos ilimitados de energia, como os proporcionados pelos insumos naturais renováveis. Em se tratando de energia elétrica, não basta ser eficiente, é preciso também realizar o melhor aproveitamento possível das fontes de energia, para, conseqüentemente, emitir quantidades cada vez menores dos gases que causam o efeito estufa.

Outra razão, diretamente atrelada à primeira, é a crescente atenção oferecida aos acordos de redução de emissões de carbono. Em nível mundial, protocolos e pactos de cooperação foram firmados para que a conscientização sobre o uso de recursos naturais fosse renovada nos países. O Acordo de Paris, firmado em 2015, é o de maior abrangência, com 196 países se comprometendo a reduzir suas gerações de emissões de gases do efeito estufa.

Metodologicamente, o uso de derivadas direcionais e vetores-gradiente permite avaliar de forma mais objetiva extensão e a velocidade possíveis para realizar a transição em direção à Economia Verde. Um e outro fornecem a taxa marginal de substituição entre insumos renováveis e não renováveis. Assim, apontam não só para as taxas de retorno exigidas para que a transição se realize, mas também para a proporção de uns e outros na matriz energética.

Ademais, as preocupações quanto à Economia Verde e quanto às formas de redução de emissões dos gases que causam o efeito estufa têm gerado um expressivo número de trabalhos na área de energia, sinalizando para que mais estudos nessa área sejam realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Observando a economia mundial, com o passar dos séculos, torna-se evidente uma crescente dependência da energia elétrica para que se alcance o patamar do desenvolvimento e crescimento econômicos. Não é de hoje que a maioria dos países investem quantias expressivas no setor elétrico a fim de tornarem autossuficientes em sua produção.

Assim, neste capítulo, é apresentada inicialmente a história da produção de energia elétrica no Brasil para evidenciar a evolução de um setor que já passou por diversas crises. Faz-se necessário, também, entender o resultado negativo da produção de eletricidade, a externalidade.

Após a compreensão do atual modelo e dos resíduos de sua produção, apresenta-se a tendência global de transição para o modelo da Economia Verde, passando pela sua conceituação e seus principais autores, a fim de compreender suas dimensões. O Acordo de Paris, firmado em 2015 com base na Economia Verde, que busca reduzir as emissões dos gases que causam o efeito estufa a nível global, é apresentado posteriormente.

2.1 HISTÓRICO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

O desenvolvimento da economia cafeeira, ocorrido nas duas décadas finais do século XIX até o final de década de 1930, pode ser considerado o precursor da consolidação do setor elétrico no Brasil. O transbordamento do capital cafeeiro, de acordo com Lorenzo (2002), possibilitou investimento em diversas atividades como ferrovias, expansão urbana, atividades industriais e comerciais, além do setor elétrico.

Segundo Lorenzo (2002), as concessionárias estrangeiras foram responsáveis pelo desenvolvimento inicial da indústria elétrica brasileira a partir de dois principais grupos: a *Brazilian Traction, Light and Power C. Ltda.* (canadense-americana) e a *American Share Foreign Power Company – AMFORP* (americana), filial da americana *Bond and Share*, ambas contando com lucros gigantescos.

Em 1934 é promulgado o Código de Águas, trazendo mudanças significativas para o setor elétrico. “[...] O Código de Águas trouxe mudanças fundamentais na legislação sobre o aproveitamento de recursos hídricos” (LORENZO, 2002, p. 14), sinalizando um melhor aproveitamento dos cursos das águas e fazendo com que os lucros das concessionárias estrangeiras de energia elétrica fossem fixados em até 10% do valor do investimento.

Assim, as concessionárias reduziram sua capacidade de fornecimento e, com o aumento da capacidade industrial, surgiu um debate para propor alternativas para o enfrentamento de problemas de insuficiência de oferta energética. O aumento populacional só agravou o problema, fazendo com que a demanda aumentasse tanto quanto a incerteza acerca da eficiência energética do país.

O período das décadas de 1920-1950, na análise de Araújo e Oliveira (2003), ficou caracterizado por mudanças profundas na economia brasileira. Novas indústrias surgiram e alteraram as estruturas do consumo energético do país, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, provocando pressões no aparelho energético produtivo já precário.

Um problema enfrentado no período pós Segunda Guerra Mundial, de 1944 a 1955, foi que, para aumentar a energia, eram necessários mais recursos financeiros. O Estado não estava em condições de arcar com os custos e se fazia necessário o capital internacional:

[...] o desenvolvimento industrial do Brasil tinha que fazer uma transição direta da lenha para o petróleo e eletricidade, e a construção deste sistema energético moderno esbarrava na incapacidade do capital privado nacional de mobilizar volumosos recursos financeiros necessários a empreendimentos de longa maturação e risco elevado, como é o caso do setor energético. Só o capital internacional ou o Estado estavam em condições de promover aqueles investimentos (ARAÚJO; OLIVEIRA, 2003, p. 628).

A partir da década de 1960, teria ocorrido no Brasil o início de um processo percebido hoje como um planejamento da interligação do sistema energético para gerar maior articulação e entrosamento entre os serviços ofertados pelas companhias estatais (Baer e McDonald, 1997). Sustenta-se que esse processo foi fortemente favorecido pela criação da Eletrobras¹ no ano de 1962. Ainda, conforme Baer e McDonald (1997), durante o período de 1980-1996, enquanto o setor elétrico foi de propriedade exclusiva do governo, a capacidade instalada de energia elétrica no país saltou de 42860 MW, em 1984, para 52741 MW em 1993, quantidade considerada acima do desejável para o período.

Na década de 1970, com os dois Choques do Petróleo, o fornecimento mundial deste recurso natural caiu e os países viram a necessidade de adotar estratégias diferenciadas para

¹ A criação da Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras) foi proposta em 1954 pelo então presidente Getúlio Vargas. Conforme histórico disponível no *site* da Eletrobras: “o projeto enfrentou grande oposição e só foi aprovado após sete anos de tramitação no Congresso Nacional. Em 25 de abril de 1961, o presidente Jânio Quadros assinou a Lei 3.890-A, autorizando a União a construir a Eletrobras. A instalação da empresa ocorreu oficialmente no dia 11 de junho de 1962 [...]. A Eletrobras recebeu a atribuição de promover estudos, projetos de construção e operação de usinas geradoras, linhas de transmissão e subestações destinadas ao suprimento de energia elétrica no país. A nova empresa passou a contribuir decisivamente para a expansão de energia elétrica e o desenvolvimento do país”.

superar os choques. Assim, de acordo com Costa e Prates (2005), as principais medidas tomadas pelos países foram: a mudança de hábitos dos consumidores, o progresso técnico pelo lado da demanda a fim de proporcionar melhoria da eficiência energética, inovação tecnológica no lado da oferta e, principalmente, a substituição do petróleo por diferentes fontes energéticas.

Essa substituição foi “notadamente a energia nuclear nos países industrializados e, no caso do Brasil, a energia hidráulica e o álcool” (COSTA; PRATES, 2005, p. 9). No Brasil grandes obras ocorreram: em 1972 deu-se início à construção da primeira usina nuclear do País, Angra I, e, no período de 1975-1982, foi construída a maior usina hidrelétrica em funcionamento no País, a Usina de Itaipu.

A partir da década de 1980, a preocupação ambiental surgiu nos debates referentes ao planejamento energético, buscando-se empreendimentos que causassem impactos ambientais menores. No mesmo período, porém, houve redução dos investimentos em pesquisas e estudos referentes a energias renováveis devido à queda nos preços dos barris de petróleo, caracterizando uma menor intervenção do Estado que, conforme Freitas (2011, p. 199) “assumiu a função de agente regulador, o que culminou com a privatização das empresas do setor”.

Na década de 1990, marcada pelas privatizações ocorridas no setor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada pelo Estado para servir de agente regulador do setor elétrico. O objetivo da agência era promover a eficiência do setor que até então contava com regulação e fiscalização direta do Estado para atrair capital privado.

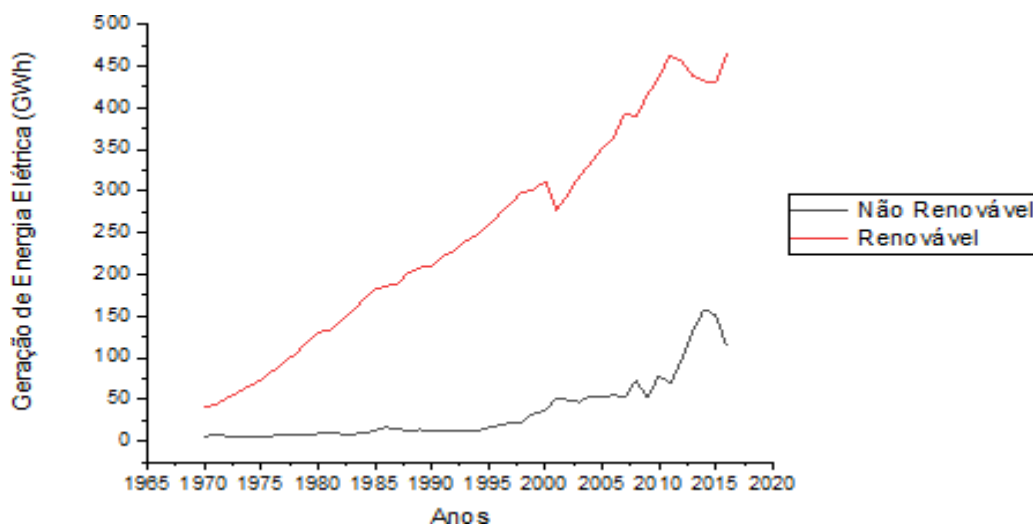
A intenção era privatizar praticamente todo o setor de distribuição de energia para que ocorresse alocação eficiente de recursos. A falta de marcos regulatórios acabou desestimulando o investimento privado, configurando o período que engloba o final da década de 1990 e o início dos anos 2000 como um momento de crise de abastecimento de energia, expondo as fragilidades do setor tanto na produção, quanto na distribuição de energia elétrica (FREITAS, 2011).

No ano de 2004 foi criada a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) com a finalidade de realizar estudos e pesquisas para fomentar o planejamento no setor energético. A EPE é, desde então, a responsável pela elaboração e publicação do Balanço Energético Nacional (BEN) que tem por objetivo a contabilização relativa à oferta e ao consumo de energia no país. O BEN contempla as atividades de extração primária, sua conversão em formas secundárias, importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia (MME/BEN, 2015, p. 8).

Desta maneira, a preocupação com o fato de a oferta não alcançar a crescente demanda por energia, combinada à abundância de recursos existentes, fazem com que o Brasil adote

uma Matriz Energética diversificada, porém na sua totalidade composta pela produção de energia hidrelétrica. Segundo Costa e Prates (2005, p.13), “contrariamente ao que ocorreu no mundo, o Brasil adotou o caminho da promoção de fontes renováveis, uma vez que há abundância desses recursos em território nacional”.

Figura 1 – Geração de energia elétrica no Brasil proveniente de fontes de energia renováveis e não renováveis (1970-2016)



FONTE: Elaborado pela autora por meio do *software* OriginPro versão 2017, com dados do MME/EPE, 2017.

A Figura 1 demonstra o caminho adotado pelo Brasil para a geração de energia elétrica. Os recursos naturais geradores de energia elétrica considerados renováveis são a energia hidroelétrica, a energia eólica, a lenha, os derivados da cana e outras energias; as fontes não renováveis geradoras de energia elétrica são o petróleo e seus derivados, o carvão elétrico e seus derivados, o gás natural, o urânio, o óleo diesel, o óleo combustível, além de outras fontes ditas não renováveis utilizadas em menor escala.

Desde o princípio, o uso de recursos hídricos abundantes no país faz com o que a geração de energia elétrica decorrente de fontes renováveis de energia seja mais expressiva que a proveniente de fontes não renováveis, mesmo que aquelas estejam suscetíveis à ação climática e ambiental.

2.1.1 Configuração Atual do Setor Elétrico Brasileiro

Conforme avaliação da Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), a caracterização do setor elétrico brasileiro é atualmente dada da seguinte maneira:

- É uma indústria desverticalizada, com segregação das atividades de geração, transmissão e distribuição;
- Há coexistência de empresas públicas e privadas;
- Há descentralização do planejamento e das operações;
- A regulação dos serviços de transmissão e distribuição é efetiva;
- Existe concorrência no serviço de geração para novos empreendimentos;
- Há coexistência de consumidores cativos e livres;
- A liberdade de negociação entre geradores, comercializadores e consumidores é regulamentada;
- Há também regulação de leilões para contratação de energia para as distribuidoras;
- Ocorre separação de preços da energia elétrica de preços do seu transporte;
- A distinção de preços é realizada para cada área de concessão, e
- Há regulação de contratos para compartilhamento de ganhos de produtividade nos setores de transmissão e distribuição.

As atividades do setor elétrico são a geração, a transmissão e distribuição da energia até chegar aos consumidores. A geração, ainda conforme a ABRADEE, é o segmento responsável por produzir e injetar a energia elétrica nos sistemas de transporte (fios). O Brasil conta atualmente com 4.916 empreendimentos geradores de energia (MME/ANEEL, 2018), totalizando uma potência instalada de 158.291.976 Kw distribuídos conforme a Tabela 1 para o período compreendido até fim do primeiro trimestre de 2018.

Tabela 1 – Empreendimentos geradores de energia elétrica em operação no Brasil até março de 2018

TIPO	QUANTIDADE	POTÊNCIA INSTALADA	
		(kW)	(%)
Usina Hidrelétrica de Energia – UHE	220	95.619.468	60,4
Pequena Central Hidrelétrica – PCH	429	5.042.723	3,2
Central Geradora Hidrelétrica – CGH	670	627.355	0,4
Central Geradora Undi-elétrica - CGU	1	50	0
Usina Termelétrica de Energia – UTE	3.002	41.539.113	26,2
Usina Termonuclear – UTN	2	1.990.000	1,3
Central Geradora Eolielétrica – EOL	511	12.537.943	7,9
Central Geradora Solar Fotovoltaica – UFV	81	935.325	0,6
TOTAL	4.916	158.291.976	100

FONTE: Elaboração própria, com dados da ANEEL (2018).

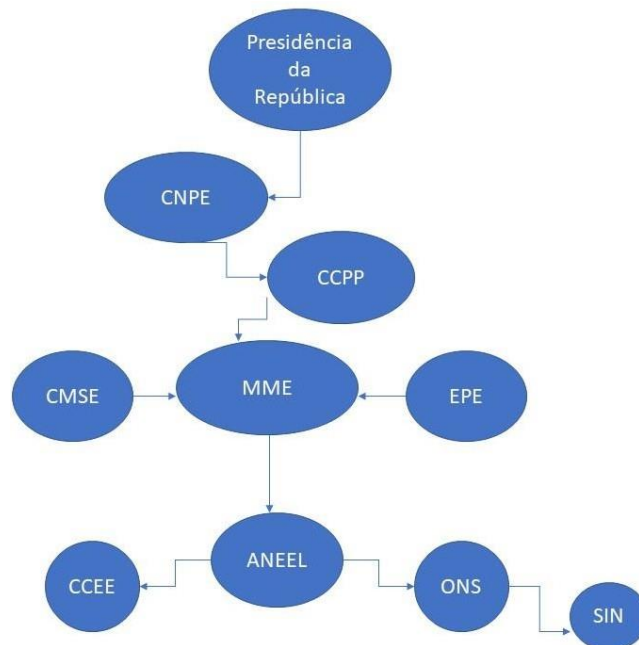
O órgão máximo do setor elétrico brasileiro é o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), responsável por elaborar políticas e diretrizes setoriais levando em conta os aspectos energéticos, econômicos e ambientais. Este órgão é de assessoramento da presidência da República e tem ainda como objetivo a revisão periódica da Matriz Energética do Brasil (OLIVEIRA et. al., 2012). Submetido ao CNPE, o Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE) faz o planejamento setorial, indicando a expansão da geração e determinando a transmissão de energia.

O Ministério de Minas e Energia (MME) é o encarregado pela formulação, planejamento e prática das políticas energéticas. Vinculados a ele estão o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) responsável pelo permanente monitoramento do fornecimento e da segurança da oferta de energia e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), criada em 2004, que é a responsável pelas pesquisas nas áreas de estudo e planejamento do setor energético. (OLIVEIRA et al, 2012)

O responsável pela execução das atividades da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de controle e operação de geração e transmissão é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Ele faz a coordenação e supervisão das operações, além de simulações energéticas e avaliações de riscos de déficits. (ELLERY FILHO, 2001).

O ONS atua no Sistema Interligado Nacional (SIN), que é um sistema complexo, de grande porte, responsável pela produção e transmissão de energia elétrica no Brasil. Além do ONS e do SIN, há ainda a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que é a viabilizadora da comercialização da energia do SIN e também é a responsável pela compra e venda de energia, incumbida da administração financeira, contábil e operacional, sendo também regularizada pela ANEEL (OLIVEIRA et al., 2012). A estrutura do setor elétrico é vista na Figura 2.

Figura 2 – Organograma do Setor Elétrico Brasileiro



FONTE: Elaborado pela autora.

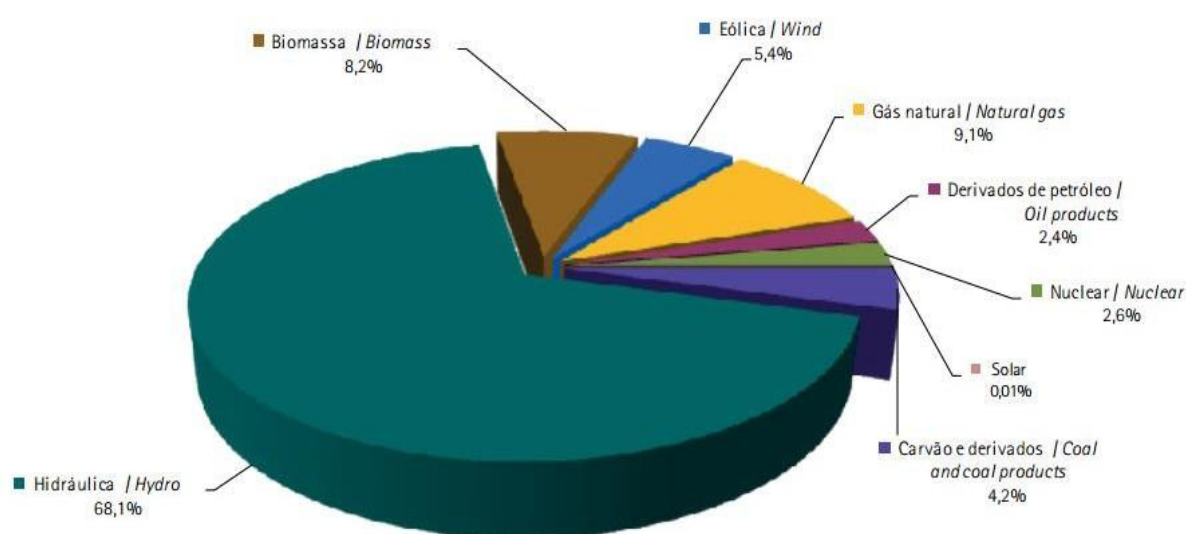
No ano de 2004 se deu a implantação do Novo Modelo do Setor Elétrico, proposto pelo governo em vigência, visando garantir segurança energética no fornecimento de energia e promoção da modicidade tarifária, melhor inserção local e sinalizando para um melhor uso dos recursos naturais renováveis e não renováveis disponíveis no território brasileiro.

A estrutura deste novo modelo trouxe mudanças significativas para as empresas, principalmente para as empresas geradoras de energia, de maneira que foi exigida a cisão das companhias geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica. A regulamentação

continuou de maneira plena nas atividades de transmissão e distribuição, mas a produção das geradoras passou a ser negociada no livre mercado (URSAIA et al., 2012).

De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2017 (ano-base 2016), verificou-se uma diminuição de 0,4% da geração de energia elétrica em relação ao ano anterior. A fonte com maior expressividade foi a hidráulica, configurando expansão de 5,9% em relação ao ano de 2015 (MME/BEN, 2017).

Figura 3 – Matriz Elétrica Brasileira (2016)



FONTE: MME/BEN 2017.

Como exposto na Figura 3, a Matriz Elétrica do ano de 2016 apresentou 19,6% de geração de energia proveniente de fontes não renováveis. A geração hidráulica sozinha representa 68,1% do tal da Matriz. A capacidade instalada de geração de energia elétrica no ano de 2016 teve um acréscimo de 9.479 MW em comparação com o ano anterior, totalizando mais de 150.000 MW

2.2 EXTERNALIDADES E SUSTENTABILIDADE

Até meados da década de 1960, a teoria econômica neoclássica não computava as externalidades ambientais em suas análises, de maneira que o processo de produção era

“representado como que podendo contar com fontes inesgotáveis de recursos materiais e de energia; todos os insumos eram convertidos, não sobrando resíduos; e no ato do consumo tudo desapareceria” (MONTIBELLER-FILHO, 2008, p. 92)

Existem duas categorias de externalidades: as oriundas do consumo e as da produção (MUELLER, 2007). Um exemplo de externalidade no consumo é quando um agente gera custos, seja em valores monetários ou não, e outro agente é quem arca com o custo. Já quando há um elemento que não depende diretamente do nível de atividade de quem produz e sim é um resultado externo da atividade exercida por outro agente econômico, têm-se uma externalidade na produção.

Diferente da conceituação de externalidade, a sustentabilidade possui caráter dinâmico. De acordo com Chaves e Rodrigues (2006), a sustentabilidade é um processo de construção que leva em conta as necessidades atuais e futuras em que se estudam ações de desenvolvimento - social e econômico - numa perspectiva de simbiose com a natureza. A sustentabilidade abraça a ideia de que a capacidade-suporte do meio ambiente esteja intrinsecamente relacionada ao crescimento econômico e ao desenvolvimento humano, gerando uma integração harmoniosa do desenvolvimento social à natureza (MARTINS, 2002).

Em seu sentido mais amplo, a sustentabilidade pode ser compreendida, então, como a gama de ações que possam se manter e se repetir indefinidamente nas mesmas condições, conforme Carvalho (2009). Dentro do significado de sustentabilidade, as fontes de geração de energia consideradas renováveis são as que, de maneira direta ou indireta, “constituem fundos alimentados pelo fluxo solar” (CARVALHO, 2009, p. 41). Assim, os combustíveis fósseis, que foram formados há centenas de milhões de ano, derivando de vários processos fotossintéticos, não se enquadram na classificação de energia renovável.

As formas de desenvolvimento econômico sustentável que preservam ao invés de degradar o ambiente incluem, conforme Harris e Roach (2013), além do uso de energias renováveis, o uso de agricultura orgânica e tecnologias de conservação de recursos. Mas, antes de qualquer medida, faz-se necessário entender a relação entre os sistemas econômicos e os recursos naturais e ambientais

2.3 A ECONOMIA VERDE

A Economia Verde foi caracterizada pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2011) como uma economia que deriva em bem-estar e igualdade social concomitantemente com redução expressiva de riscos ambientais.

Em outras palavras, uma economia verde pode ser considerada como tendo baixa emissão de carbono, é eficiente em seu uso de recursos e socialmente inclusiva. Em uma economia verde, o crescimento da renda e de emprego deve ser impulsionado por investimentos públicos e privados que reduzem as emissões de carbono e poluição e aumentam a eficiência energética e o uso dos recursos, e previnem perdas da biodiversidade e serviços ecossistêmicos (PNUMA, 2011. p.1)

A transição para a Economia Verde não ocorre sem que existam condições facilitadoras específicas. De acordo com o relatório do PNUMA (2016), estas condições constituem uma espécie de plano a ser seguido por meio de regulamentos e políticas nacionais, incentivos e subsídios, além da cooperação internacional para estrutura e protocolos de apoio e comerciais.

Como condições facilitadoras que impulsionam, em nível nacional, é possível citar reformas e reduções de subsídios que sejam nocivos ao meio ambiente, investimentos em setores sustentáveis, contratos públicos mais verdes e melhorias na formulação e execução de regulamentos ambientais.

A ideia central que se deve ter em mente quando se estuda a Economia Verde é que existe um deslocamento entre o que é produzido e a base material e energética em que repousa essa produção. Esta produção acaba por elevar o consumo absoluto de recursos (ABRAMOVAY, 2012). Ainda conforme Abramovay (2012, p. 81), os desafios cruciais para o avanço desse tipo de Economia envolvem novas fontes de energia, “sobretudo, novas formas de usar a energia, os materiais e aquilo que, até aqui, foi considerado como resíduo”.

A Economia Verde envolve três dimensões fundamentais. A primeira configura a transição do uso de combustíveis fósseis para fontes renováveis de energia. Abramovay (2012) destaca a dependência que a economia mundial tinha (e ainda tem) em relação às fontes não renováveis de geração de energia.

O Brasil tem aí uma posição privilegiada, uma vez que sua matriz energética conta com larga participação da hidroeleticidade e do etanol e, desde o início da segunda década do século 21, da energia eólica. Enquanto no mundo todo a participação das energias renováveis na vida econômica é de 13%, no Brasil ela vai além de 45%: nos países mais ricos ela fica em torno de 7% (ABRAMOVAY, 2012, p. 83).

A segunda dimensão está no aproveitamento dos serviços e recursos oferecidos pela biodiversidade. É importante destacar que nesta dimensão busca-se criar cadeias de valor

ligadas a produtos florestais e a serviços ecossistêmicos, bem como beneficiar populações que residam em áreas de grande diversidade. Abramovay (2012) afirma que a constituição dessas cadeias ainda é bastante tímida, deixando clara a precariedade dos investimentos em ciência e tecnologia e colocando esta dimensão da Economia Verde bastante aquém do seu objetivo. A terceira dimensão, ainda conforme esse autor:

Não se refere direta e imediatamente ao uso da biodiversidade, embora tenha consequências de curto e longo prazo nos ecossistemas. Trata-se do processo pelo qual a oferta de bens e serviços apoia-se em técnicas capazes de reduzir as emissões de poluentes (a começar pelos gases de efeito estufa), de reaproveitar parte crescente de seus rejeitos e, acima de tudo, de diminuir o emprego de materiais e energia dos quais os processos produtivos se organizam (ABRAMOVAY, 2012, p. 85).

Abramovay (2012), relata que as conquistas na direção da terceira dimensão são impressionantes, porém essas conquistas não são suficientes para garantir a coexistência entre equilíbrio climático, manutenção da biodiversidade, oferta de materiais e energia e entre o crescimento econômico.

No mesmo ano em que o relatório do PNUMA caracterizou a Economia Verde, a Organização das Nações Unidas (ONU) em sua Conferência sobre Comércio e Desenvolvimento, doravante UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) apontou os papéis dos estados e mercados para a transição rumo a Economia Verde.

A globalização da Economia Verde pode trazer boas oportunidades aos negócios e contribuir de maneira significativa ao desenvolvimento econômico e ambiental, de acordo com a ONU (UNCTAD; 2011), desde que existam políticas que ofereçam um bom apoio aos negócios e instituições bem estabelecidas. Estas políticas seriam responsáveis por não distorcer os conceitos da Economia Verde e promover a transição de maneira plena.

A ONU ressalta que, para uma economia realizar uma transição para a Economia Verde, o progresso técnico é essencial. O progresso técnico é o responsável por estabilizar a relação meio ambiente-sociedade para que os objetivos econômicos e sociais sejam atingidos e uma economia faça uma trajetória sustentável. A difusão de tecnologias ditas verdes, das mais simples às mais sofisticadas, carrega consigo a missão de melhorar o bem-estar da população.

Para ser política e economicamente viável, “a Economia Verde deve representar muito mais do que uma simples “lavagem verde” na economia global” (UNCTAD, 2011, p. 4), ela deve ser o motor do desenvolvimento: deve promover bem-estar através do acesso de todas as pessoas a serviços básicos de energia, água, moradia, transporte, comunicação, saúde e educação.

A transição para a Economia Verde pode se dar em países desenvolvidos e em desenvolvimento. A ONU (UNCTAD; 2011) destaca que tanto em países desenvolvidos, quanto nos subdesenvolvidos, a transição rumo a Economia Verde já acontece em vários setores, especialmente no setor energético com o crescimento do uso de fontes de energia renováveis em detrimento aos combustíveis fósseis. Ao espelho dos países desenvolvidos, os em desenvolvimento já estão aumentando suas participações nos mercados verdes.

No ano de 2010, pela primeira vez na história, os investimentos dos países em desenvolvimento em projetos para gerar energia renovável superaram os investimentos dos países desenvolvidos. A UNCTAD (2011), computa que US\$72 bilhões de dólares foram investidos nos países em desenvolvimento, contra US\$ 70 bilhões nos países considerados desenvolvidos.

A alimentação está ficando verde com o aumento da produção orgânica, o setor de serviços está ficando verde com a implantação do ecoturismo, os investimentos estão se tornando mais verdes com o crescimento do mercado de carbono e, de acordo com a UNCTAD (2011), essa tendência ao verde só tende a crescer nas próximas décadas.

O conceito de desenvolvimento sustentável deve ser pensado também para a Economia Verde. Para Diniz e Bermann (2012), desenvolvimento sustentável deve satisfazer as necessidades da geração presente sem que comprometa as necessidades das gerações futuras e os determinantes fundamentais ao crescimento econômico precisa levar em consideração o meio ambiente.

Diniz e Bermann (2012, p. 324) afirmam que quando se trata de meio ambiente, "não deve haver uma deterioração desse que impeça uma geração de alcançar o mesmo bem-estar que uma geração anterior. Logo, a preservação do meio ambiente surge como uma forma de evitar o aumento da desigualdade entre gerações". Os autores também indicam que é preciso estipular critérios que guiem ao uso sustentável dos recursos naturais.

A ONU defende que o uso sustentável dos recursos naturais deve ser fruto de regulação e incentivos econômicos; deve ser estimulado também através da disseminação de campanhas que reforcem a importância de fazer boas escolhas quanto ao uso dos recursos e quanto às escolhas de produtos verdes. A transição não ocorre sem estimulação (UNCTAD, 2011).

Apesar das proposições bem formuladas da Economia Verde, não são todos os economistas que a enxergam com bons olhos. Sawyer (2011), afirma que o discurso da Economia Verde é bem elaborado, mas que tudo tende a ser reduzido a valoração monetária, porém não existem mercados para seres humanos, culturas, saúde e funções ecológicas, o que pode favorecer os ricos (inclusive tende a empoderar o PNUMA) e os países desenvolvidos.

De acordo com Sawyer (2011), a Economia Verde pode enganar. Os propósitos de redução da pobreza, baixa emissão de carbono, inovação, eficiência energética e governança global podem ser “jeitinhos enganosos para substituir ou relegar a soberania, a equidade, a natureza, as funções ecológicas, o uso sustentável, os direitos fundamentais (humanos e de cidadania) e a redução de emissões” (SAWYER, 2011, p. 39).

Para Sawyer (2011), o mais importante deveria ser os governos pararem para analisar o que realmente precisa ser feito sem tratados ambiciosos, ainda assim, o autor afirma que a Economia Verde deve ser promovida, já que uma abordagem econômica adjetivada de verde pode ser capaz de sensibilizar um maior número de tomadores de decisão principalmente no caso de países em desenvolvimento como o Brasil.

O Brasil ampliou bastante o número de estudos sobre a Economia Verde nos últimos anos. De acordo com Diniz e Bermann (2012), a maioria dos trabalhos desenvolvidos abrangem o setor energético, priorizando as energias renováveis para obter eficiência energética, já que o tema energia apresenta vigor acadêmico significativo.

2.3.1 Economia Verde e Setor Energético

Um dos setores que mais recebem atenção em se tratando de Economia Verde é o energético. Conforme relatado na seção anterior, tanto países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento dão atenção especial a este setor por meio de políticas de incentivo ao uso e energias renováveis.

Na tendência de realizar a transição para a Economia Verde, os países buscam cada vez mais atingir uma economia de baixo carbono, isto é, economias aonde a emissão de carbono seja inferior a 0,4kg por dólar do seu Produto Interno Bruto. Aqui a tentativa de cada vez mais gerar energia proveniente de fontes renováveis é uma forma eficiente de reduzir a emissão de carbono na atmosfera.

De 1990 a 2010 os países já apresentavam uma preocupação em reduzir as emissões de carbono. De acordo com a ONU, durante esse período, vários países, principalmente da Ásia e da América Latina, apresentaram economias menos intensivas em carbono, além de conseguirem uma posição melhor em índices de desenvolvimento humano. Países da Oceania, além de se tornarem menos intensivos em carbono, conseguiram ainda aumentar seu Produto Interno de maneira bastante expressiva. Com os países Europeu, não ocorreu o mesmo e a

preocupação com os níveis de carbono emitidos só foi intensificada após a caracterização da Economia Verde em 2011.

O desenvolvimento de tecnologias para o uso e geração de energia renovável só aumenta. Países em desenvolvimento apresentaram investimentos expressivos em painéis solares e turbinas eólicas, suprimindo boa parte da demanda mundial. De acordo com a UNCTAD (2011), os países em desenvolvimento apresentaram aumento de 20% em 2002 para 53% em 2009 de suas exportações. A China lidera o ranking dos países exportadores de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas.

No mercado do biodiesel, até final de 2011, países em desenvolvimentos como Brasil, China, Índia, Colômbia, Tailândia e Malásia representavam mais de 40% da produção mundial de etanol e 12% da produção de biodiesel. Esse aumento de produção teve impacto direto na queda de preço das energias renováveis, possibilitando o acesso de um maior número de países ao seu uso.

O exemplo que a UNCTAD (2011) traz é o custo de gerar um watt² em painéis solares. Se em 1980 o custo excedia US\$ 22,00, com o advento de novas tecnologias, no ano de 2011 ele era de US\$ 3,00 e esse mesmo custo chegou a US\$ 0,30 em 2015. O baixo custo dessa energia permitiu que a energia elétrica atingisse áreas rurais de países em desenvolvimento que, em pleno século XXI, ainda não tinham contato com a eletricidade.

Ainda, o uso de tecnologias verdes na geração de energia renovável possibilitou que países Africanos, como Etiópia, Gana, Senegal, Moçambique e Zâmbia, entre outros, produzissem energia solar eficiente e de baixo custo em suas casas. Um feito até então nem imaginável para tais países.

Frente aos avanços dos países em desenvolvimento, e somado às preocupações dos países desenvolvidos com suas emissões de carbono, em 2015 surge uma iniciativa de cooperação internacional, que vai ao encontro da Economia Verde, para reduzir as emissões de carbono e de outros gases que causam efeito estufa.

2.4 O BRASIL E O ACORDO DE PARIS

Com vistas, particularmente, à terceira dimensão da Economia Verde, firmou-se, em dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP) da Convenção-Quadro das

² Watt é a unidade de potência do Sistema Internacional de Unidades.

Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC), o Acordo de Paris. O Acordo representou expressiva articulação internacional para enfrentar as causas do fenômeno do efeito estufa em escala global e promover a adequação e adaptação aos seus impactos (MME/EPE, 2016).

Em outras palavras, o Acordo de Paris é um instrumento de cooperação internacional que visa à redução das emissões dos gases que causam o efeito estufa e foca na adaptação às mudanças climáticas que ocorrem no cenário mundial (Instituto Acende Brasil, 2017). É considerado o mais relevante acordo já firmado em termos de abrangência e de potenciais benefícios globais desde o Protocolo de Kyoto³. Seu objetivo é, conforme o Instituto Acende Brasil (2017), “manter, no século atual, o aumento da temperatura global inferior a, no mínimo, 2° C em relação à temperatura global da era pré-industrial. Em um cenário mais agressivo, pretende-se limitar este aumento a 1,5° C”.

O Acordo pressupõe que cada país signatário declare de maneira voluntária quais são suas Contribuições Pretendidas Determinadas Nacionalmente (CPDN), ou seja, as “ações que cada governo pretende adotar em função do seu perfil de emissões, contexto econômico e demais fatores internos” (Instituto Acende Brasil, 2017, p.3). Após a ratificação da adesão de um país ao Acordo, as CPDNs transformam-se em Contribuições Determinadas Nacionalmente (CDNs). Apenas a adesão dos países ao Acordo não é suficiente para manter as metas pretendidas.

Surge, então, a iniciativa Mission Innovation (MI), com os objetivos de desenvolver inovações tecnológicas, melhorar as que já existem e reduzir seus custos, além de buscar atrair o interesse de investidores para esse setor e promover o acesso da população às energias renováveis (MME/EPE, 2016).

O Brasil é um dos signatários do Acordo de Paris. Sua inserção no acordo objetiva reduzir em 37% as emissões totais do país até o ano de 2025 (com base na produção de 2005), além de aumentar a geração de energia elétrica proveniente de recursos naturais renováveis que não a água.

As diretrizes que dizem respeito ao setor energético brasileiro são, conforme o Instituto Acende Brasil (2017):

- Aumentar a participação de bioenergia na matriz energética para, aproximadamente, 18% até o ano de 2030;
- Expandir o uso de fontes renováveis de 28% a 33% até 2030;

³ O Protocolo de Kyoto foi adotado em 1997 na 3ª COP. Estipulou-se que as nações que eram consideradas desenvolvidas se comprometeriam a reduzir de maneira expressiva a quantidade de gases causadores do efeito estufa.

- Expandir o uso doméstico de fontes de energia não fósseis para, pelo menos, 23% também até 2030, aumentando principalmente a participação da energia eólica, da biomassa e da energia fotovoltaica, e
- Alcançar até o ano de 2030 10% de ganhos de eficiência energética.

Os principais desafios impostos ao planejamento do setor energético do Brasil, conforme avaliação do Instituto Acende Brasil (2017), evidentemente, estão relacionados a conseguir cumprir as metas do setor elétrico.

Especialmente para o setor elétrico do Brasil, uma série de medidas previstas na CDN brasileira já vêm sendo observadas há mais de dez anos. Mesmo assim, a CDN prevê que o uso de fontes de energia renováveis seja priorizado, porém que não se aumente a quantidade de energia hidroelétrica e que o uso de combustíveis fósseis seja reduzido em, pelo menos 5%, até 2030.

Prevê-se também que o setor atenda à critérios de segurança no fornecimento de eletricidade no médio e longo prazo para uso industrial e doméstico e que o nível baixo de emissões, em comparação a outros países, seja mantido além do horizonte de 2030.

Com o Acordo de Paris e a transição para a Economia Verde em mente, nas seções subsequentes deste trabalho serão apresentados os procedimentos metodológicos e os resultados dos cálculos para averiguar a situação do setor elétrico brasileiro frente à transição para a Economia Verde.

3 METODOLOGIA

3.1 REGRESSÃO NÃO LINEAR

Ao longo dos anos, novas técnicas estatísticas para modelos de regressão surgiram. Novas classes de modelos são estabelecidas e entre elas estão os modelos de regressão não linear e os modelos linearmente generalizados. De acordo com Mattos (2013), a partir de 1972 é que Nelder e Wedderburn ampliaram o uso de regressões não lineares e definiram os modelos linearmente generalizados.

Thomas (2016) afirma que os modelos não lineares se tornaram mais complexos à medida que novos algoritmos para ajuste dos modelos foram desenvolvidos, resultando na popularização desse tipo de regressão após a década de 1980 nas mais diversas áreas do conhecimento como a química, a engenharia, a agricultura, a economia, biologia, e etc.

Um modelo é classificado como não linear se, conforme Mattos (2013, p. 14), “pelo menos uma das derivadas parciais da função não linear em relação aos parâmetros depende de pelo menos um dos parâmetros do modelo”. Esta é também umas razões pelas quais aproximar estes modelos aos modelos lineares tradicionais configura um equívoco e acaba por comprometer o realismo das estimativas dos parâmetros.

De maneira geral, os modelos de regressão não lineares assumem a seguinte forma:

$$Y = f(X, \theta) + \epsilon \quad (1)$$

onde Y é a variável resposta, $f(X, \theta)$ representa a função não linear contínua das variáveis X e parâmetros θ a serem estimados e ϵ são os erros aleatórios do modelo, sobre os quais são assumidos os pressupostos usuais da regressão linear, segundo Thomas (2016), onde os erros são independentes e identicamente distribuídos, normais com média zero e variância constante.

A função esperança é definida na equação (2), onde $f(X, \theta)$ representa também a esperança da variável Y dado X .

$$E(Y|X) = f(X, \theta) \quad (2)$$

Como exemplo de modelos não lineares mais conhecidos pode-se citar o Modelo de Mitscherlich, utilizado principalmente no estudo da variação do crescimento de vegetais;

Modelo Logístico, usado amplamente para estipular crescimento de populações, sejam elas humanas, animais ou vegetais; e o Modelo de Michaelis-Mentel que é utilizado em estudos que medem taxas de reações químicas (THOMAS, 2016).

Existem modelos não lineares que permitem alguma reparametrização para que suas funções $f(X, \theta)$ sejam transformadas em linear nos parâmetros θ , conforme Thomas (2016). Estes modelos recebem o nome de Modelos Transformavelmente Lineares ou Modelos Não Lineares Linearizados. A desvantagem de se linearizar um modelo não-linear é que, ao realizar esse processo, o “vetor de erros também é transformado, logo os pressupostos usuais assumidos sobre os mesmos deixam de ser válidos na maioria dos casos” (THOMAS, 2016, p.3)

Quanto aos meios de estimação dos parâmetros dos modelos não lineares, é possível estima-los através do método dos Mínimos Quadrados Ordinários, pelo método de Máxima Verossimilhança ou ainda por métodos iterativos, sendo este último o mais utilizado para amostras grandes.

Para que os parâmetros em regressões não lineares sejam estimados, é necessário obter uma estimativa inicial, isto é, um ponto de partida. Se a estimativa inicial for ruim, torna-se difícil a estimação do modelo por qualquer método. Existem, porém, técnicas que facilitam a obtenção de estimativas iniciais consistentes. Entre as mais conhecidas estão as descritas no quadro 1.

Quadro 1 – Principais técnicas para obtenção de estimativas iniciais

<p>LINEARIZAÇÃO</p> <p>Realiza-se uma linearização do modelo. Após, estima-se uma regressão linear do modelo linearizado e utiliza-se as estimativas dos parâmetros geradas como estimativas iniciais para o modelo não linear.</p>	<p>SISTEMA DE EQUAÇÕES</p> <p>Resolve-se um sistema de equações quando houver p parâmetros. Substitui-se esses parâmetros em p conjuntos de observações (x, y) e ignora-se o erro. A resolução das p equações dá a estimativa inicial para o modelo não linear.</p>
<p>PROPRIEDADES DO MODELO</p> <p>Realiza-se um estudo do comportamento do limite da função esperança quando x_i tende a 0 ou infinito e substitui-se os parâmetros por valores iniciais que os representem proporcionalmente.</p>	<p>ANÁLISE GRÁFICA</p> <p>Consistem em análise visual dos gráficos das variáveis do modelo para se obter estimativas iniciais. É a técnica mais utilizada, mas também a que exige maior familiaridade e conhecimento dos pesquisadores sobre o modelo.</p>

FONTE: Elaboração própria com base em Mattos (2013) e Thomas (2016).

As mesmas propriedades dos modelos de regressão linear, sabidas por meio do Teorema de Gauss, de que os estimadores de Mínimos Quadrados Ordinários são normalmente distribuídos, não viesados e de variância mínima para os parâmetros do modelo, só serão válidas assintoticamente. Por isso, Mattos (2003) afirma que quanto maior a amostra, melhores serão as estimativas dos parâmetros.

3.2 FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DO TIPO COBB-DOUGLAS

Funções de produção⁴ são amplamente utilizadas em análises econômicas. Apesar de ser creditado a Philip Wicksteed o papel de primeiro economista a desenvolver uma função de produção no modelo $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ em 1894, existem evidências de que Johann von Thünen já havia proposto uma função de produção exponencial do ano de 1840 (MISHRA, 2007).

A função de produção mais utilizada foi desenvolvida por Paul Douglas e Charles L. Cobb no ano de 1928. O modelo, conhecido como função de produção do tipo Cobb-Douglas, indica uma relação entre as variáveis produção, capital e trabalho durante o período de 1889-1922 para os Estados Unidos (MISHRA, 2007 e COBB; DOUGLAS, 1928).

$$P = b L^\alpha C^\beta \quad (3)$$

Onde P representa a produção dos Estados Unidos para o período analisado, L é a quantidade de trabalho e C é a quantidade de capital investido na produção. Os parâmetros α e β determinam, respectivamente, a produtividade total do trabalho e do capital, e o coeficiente b capta todos os efeitos do que não pode ser mensurado.

Como resultado de seus estudos, conforme observado na equação (4), Cobb e Douglas (1928) chegaram à conclusão de que o total produzido deve ser homogêneo e função linear dos fatores capital e trabalho. Isto implica que a soma dos parâmetros α e β deve ser igual a um.

$$P = b L^{3/4} C^{1/4} \quad (4)$$

⁴ Funções de produção são funções que fornecem a quantidade máxima de produção, associadas a determinadas quantidades de insumos (VARIAN, 2015).

Os autores chegaram à conclusão, com base no período analisado, de que a produtividade marginal do trabalho é definida por $\frac{3}{4}P/L$, a produtividade marginal do capital por $\frac{1}{4}P/C$, a produtividade total do trabalho é $\frac{3}{4}P$, a produtividade total do capital é $\frac{1}{4}P$ e que os valores de b independem dos valores de capital e trabalho.

Os parâmetros α e β da equação (3) também determinam a elasticidade do produto em relação a pequenas alterações no trabalho e em relação a pequenas alterações no capital, respectivamente. Assim, quando a quantidade de trabalho sofrer uma pequena mudança, o produto sofrerá uma alteração de 0,75 (COBB; DOUGLAS, 1928).

A função de produção Cobb-Douglas fixa a elasticidade de substituição de capital por trabalho em 1, definindo a elasticidade como constante, independente do nível de produção. Porém, em análises de longo prazo, determinar que os retornos serão sempre constantes implica em supor que não houve progresso técnico no período. Desta maneira, conforme Giacomelli Sobrinho, Lagutov e Koren (2018) sinalizam, é preciso relaxar esta hipótese quando se trata de uma função de produção de longo prazo.

Varian (2015, p. 491) afirma que “na função de produção, a grandeza é relevante, de modo que temos de permitir que os parâmetros adotem valores arbitrários”, ou seja, a soma dos parâmetros α e β pode também ser maior ou menor que 1. Ainda segundo o autor, os parâmetros medem como a quantidade de produção responde às variações dos fatores de produção e, no longo prazo, os valores das variações tendem a ser diferentes que no curto prazo, já que todos os fatores de produção podem variar.

Em longo prazo, quando os fatores de produção C e L são aumentados, têm-se uma taxa de crescimento da produção à medida que os fatores de produção crescem proporcionalmente denominada rendimento (ou retorno) de escala. Se os fatores de produção são aumentados em t vezes e o resultado for uma produção de mais de t vezes, configura o caso de rendimentos crescentes de escala. Caso a produção gere menos de t vezes, tem-se rendimentos decrescentes e, no caso de a produção ser igual ao t diz-se que a função tem retornos constantes (VARIAN, 2015).

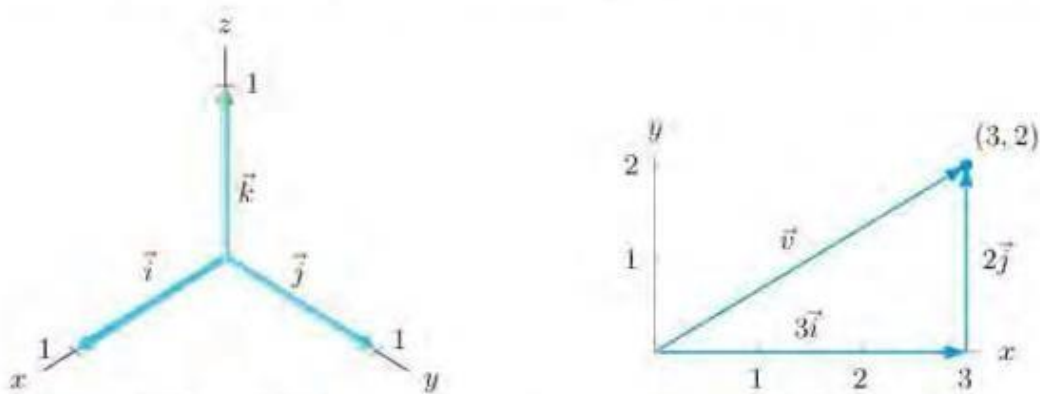
O caso dos retornos decrescentes de escala, onde $\alpha + \beta < 1$ é peculiar, conforme Varian (2015). Se na equação (3) fossem duplicados L e C e a produção P obtida fosse menos do que o dobro, é sinal de que alguma coisa está errada. Quando os rendimentos decrescentes aparecem, geralmente é sinal de algum insumo foi esquecido, ainda segundo Varian (2015). Outra justificativa para o aparecimento de retornos decrescentes é o caso de o produto ser algo indesejado ou não intencional.

3.3 CÁLCULO VETORIAL

O conceito de vetor foi cunhado em 1853 por William R. Hamilton e chegou à geometria analítica por meio de Louis Lagrange (1736-1813). Vetor é o nome dado ao deslocamento de um ponto ao outro e possui direção e sentido. Esta é a principal diferença quanto à um escalar, que é especificado apenas por um número.

Os vetores são apresentados na forma \vec{v} , onde a seta indica a direção do vetor. A Figura 4 representa vetores em plano bidimensional e em tridimensional: o vetor \vec{i} aponta ao longo do eixo x positivo, o vetor \vec{j} ao longo o eixo y positivo e o vetor \vec{k} ao longo do eixo z positivo. Um vetor no plano bidimensional assume a forma $\vec{v} = v_1\vec{i} + v_2\vec{j}$ e no plano tridimensional $\vec{v} = v_1\vec{i} + v_2\vec{j} + v_3\vec{k}$.

Figura 4 – Representação de vetores em duas e três dimensões



FONTE: McCALLUM et al., 2011.

Sejam os pontos P_1 e P_2 definidos por (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , respectivamente, o deslocamento entre esses dois pontos é dado por $\vec{P_1P_2} = (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j}$, utilizando o plano bidimensional como exemplo. O comprimento desse vetor, obtido por meio do Teorema de Pitágoras, é dado por $||\vec{v}|| = \sqrt{(v_1^2 + v_2^2)}$, de acordo com McCallum et al. (2011).

Um vetor é dito unitário quando seu comprimento for igual à unidade. O vetor unitário, representado por \vec{u} , pode ser encontrado através da divisão dele sobre seu comprimento de maneira que $\vec{u} = \frac{\vec{v}}{||\vec{v}||} = 1$. O vetor unitário também pode ser encontrado por $\vec{u} = \left(\frac{1}{||\vec{v}||}\right)\vec{v}$.

No exemplo de vetor em duas dimensões na Figura 4, é possível verificar que o vetor resultado do deslocamento da origem (0,0) até o ponto (3,2) é definido por $\vec{v} = 3\vec{i} + 2\vec{j}$. Esse vetor é o resultado das somas dos componentes de \vec{v} , os componentes $v_1\vec{i}$ e $v_2\vec{j}$, e seu comprimento é o resultado de $\sqrt{3^2 + 2^2}$, portanto, $||\vec{v}|| = 3,60$.

A derivada direcional, representada por $f_{\vec{u}}$, fornece a taxa de variação de uma função $f(X_i, Y_i)$ em um ponto P_i na direção do um vetor unitário \vec{u}_i arbitrário e é descrita de maneira genérica conforme equação (5).

$$f_{\vec{u}}(X_i, Y_i) = \frac{\partial f(X_i, Y_i)}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial h} \vec{i} + \frac{\partial f(X_i, Y_i)}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial h} \vec{j} \quad (5)$$

Onde h é qualquer escalar diferente de zero que aumenta ou diminui um vetor ($h > 0$) ou inverte a direção do vetor ($h < 0$).

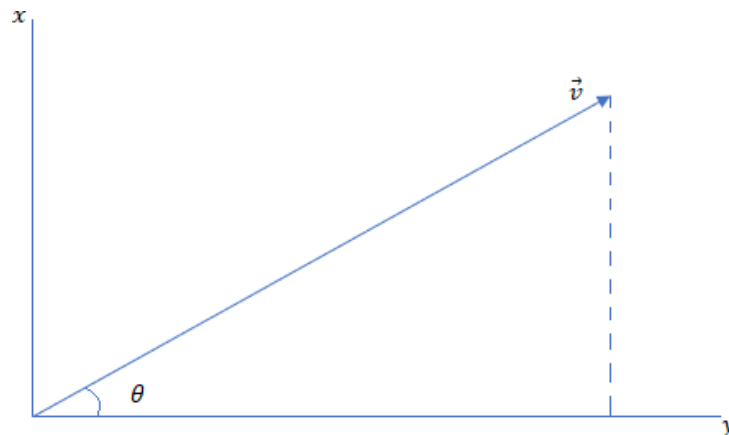
Para identificar a trajetória mais rápida de se chegar de um ponto a outro, é necessário calcular o vetor-gradiente. O gradiente “aponta na direção e no sentido da máxima taxa de variação em um ponto e a magnitude do vetor-gradiente é o valor dessa taxa de variação” (McCALLUM et al, 2011). Representado por ∇ , o vetor-gradiente é definido na equação (6). A derivada direcional pode ser obtida com o resultado do gradiente vezes o vetor unitário (equação 7).

$$\nabla f(X_i, Y_i) = f_x(X_i, Y_i) \cdot \vec{i} + f_y(X_i, Y_i) \cdot \vec{j} \quad (6)$$

$$f_{\vec{u}}(X_i, Y_i) = \nabla f(X_i, Y_i) \cdot \vec{u}_i \quad (7)$$

É importante destacar que as derivadas direcionais representadas pela equação anterior também têm uma representação geométrica $f_{\vec{u}}(X_i, Y_i) = ||\nabla f(X_i, Y_i)|| \cdot ||\vec{u}_i|| \cdot \cos \theta$ levando em consideração o cosseno de um ângulo θ (Figura 5). Sua forma reduzida, já que $||\vec{u}_i|| = 1$, está apresentada na equação $f_{\vec{u}}(X_i, Y_i) = ||\nabla f(X_i, Y_i)|| \cdot \cos \theta$.

Figura 5 – Representação do ângulo θ do vetor de um vetor \vec{v}



FONTE: Elaboração própria com base em McCallum et al., 2011.

Através do cálculo do cosseno ângulo θ , é possível verificar a distância entre a derivada direcional e o vetor-gradiente, ou seja, a distância entre uma direção arbitrária e uma direção que indica o deslocamento máximo ou mínimo de um ponto ao outro. O deslocamento máximo será quando $\theta = 0^{\circ}$ e o mínimo quando $\theta = 180^{\circ}$.

Sendo o vetor-gradiente o apontador da direção e do sentido mais rápidos para se atingir um ponto, a taxa de variação máxima ou mínima da função é obtida quando a derivada direcional é igual ao vetor-gradiente. De acordo com McCallum et al. (2011), quanto maior for a taxa de variação, maior será o vetor-gradiente e vice-versa.

3.4 MODELO EMPÍRICO

Com base nas noções de regressão não linear, uma função de produção do tipo Cobb-Douglas que relaciona o Produto Interno Bruto (PIB) em função dos recursos naturais não renováveis e dos recursos naturais renováveis geradores de energia elétrica no Brasil é estimado. De forma semelhante, estima-se outra função que relaciona as emissões de gás carbônico (CO_2) com os recursos renováveis e não renováveis. Com estes resultados em mãos, parte-se para o cálculo das derivadas direcionais e dos vetores-gradiente.

Nas próximas subseções são expostas as fontes de dados e os modelos empíricos utilizados para, na seção 4 apresentar os resultados das estimativas.

3.4.1 Base e Fonte De Dados

Os dados referentes à produção de energia elétrica no Brasil e aos PIBs utilizados foram todos coletados junto ao Ministério de Minas e Energia (MME), por meio da publicação do Balanço Energético Nacional (BEN) realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A série tem frequência anual, com início em 1970 e término em 2016, resultando em 47 observações.

As emissões de gás carbônico (CO_2) para os anos analisados foram coletadas junto ao Medidor Elétrico do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima. As compreendem apenas o setor elétrico brasileiro.

A série de dados de geração de energia elétrica proveniente de recursos naturais não renováveis compreende a eletricidade gerada por meio de petróleo e seus derivados, carvão elétrico e seus derivados, gás natural, urânio (U_3O_8), óleo diesel e óleo combustível e outras energias consideradas não renováveis. Os recursos naturais considerados renováveis são a energia hidroelétrica, a energia eólica, a lenha, os derivados da cana e outras energias renováveis. Em ambos os casos, utilizou-se a eletricidade gerada por empresas públicas e privadas.

As séries de produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis de energia e de fontes não renováveis estão mensurada em Gigawatt-hora (GWh). A série de dados de emissões de gás carbônico foi mensurada em toneladas equivalentes em petróleo (tep) e convertidas em GWh por meio da tabela de conversões do BEN. O PIB está em 10^9

$US\$ppc_{2010}$ ⁵

O período inicial da análise foi estipulado no ano de 1970 devido a uma série de acontecimentos históricos. O principal deles foi a nacionalização da empresa concessionária de energia elétrica, antes comandada pelos Estados Unidos. Além deste, este período engloba a construção das usinas de geração de energia elétrica consideradas de grande porte como, por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) de Itaipu, finalizada em 1982 e Usina

⁵ Distribuição setorial estimada a partir do sistema de contas nacionais (IBGE), com valores em reais constantes de 2010 convertidos para dólares em paridade do poder de compra (ppc) de 2010. Dummy financeiro distribuído proporcionalmente aos setores econômicos.

Termonuclear de Angra I, construída em 1985. O período final da análise se dá no ano de 2016, com a divulgação do BEN 2017 (ano base 2016).

O Quadro 2 resume as variáveis utilizadas no trabalho, bem como as fontes e as unidades de medida. Estas variáveis, Q, Z, X e Y, são as mesmas utilizadas na apresentação dos resultados.

Quadro 2 – Variáveis utilizadas no trabalho

Variável	Descrição	Fonte	Unidade
Q	Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro	MME	10^9 US\$ <i>ppc</i> ₂₀₁₀
Z	Emissões de gás carbônico (CO_2) para o setor elétrico	SEEG	GWh
X	Recursos naturais não renováveis	MME	GWh
Y	Recursos naturais renováveis	MME	Gwh

FONTE: Elaboração própria.

3.4.2 Especificação Do Modelo Empírico

Para resolver o problema de pesquisa proposto, duas funções de produção do tipo Cobb-Douglas são estimadas. Uma relaciona o PIB brasileiro com a quantidade de energia gerada por meio de recursos naturais renováveis e não renováveis (equação 7) e a outra relaciona a quantidade de gás carbônico (CO_2) emitidas com a geração de eletricidade dos mesmos recursos renováveis e não renováveis (equação 8).

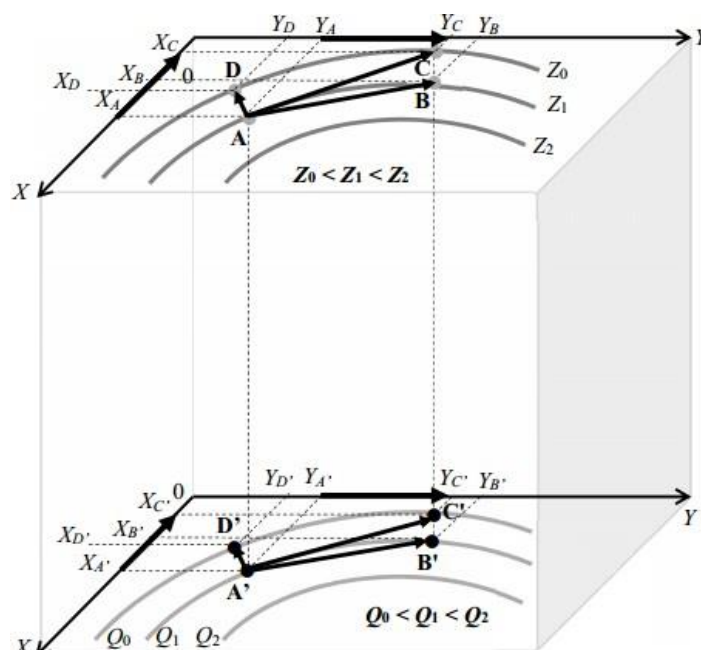
$$Q = A X^\alpha Y^\beta \quad (7)$$

$$Z = B X^\gamma Y^\delta \quad (8)$$

Onde Q representa o PIB brasileiro, Z as emissões de gás carbônico, X são os recursos naturais não renováveis, Y os recursos naturais renováveis, A e B são os parâmetros que captam os fatores não explicados por X e Y (principalmente o avanço tecnológico), α , β , γ , δ são os parâmetros exponenciais das equações.

A Figura 6 ilustra a mecânica vetorial da combinação de recursos energéticos, renováveis e não renováveis, obtida após a estimação das equações (7) e (8).

Figura 6 – Ilustração gráfica das combinações de recursos e cálculos vetoriais



FONTE: GIACOMELLI SOBRINHO, LAGUTOV E KOREN, 2018.

Opta-se por utilizar neste trabalho os recursos energéticos provenientes de fontes renováveis no eixo Y, os recursos advindos de fontes não renováveis de energia no eixo X. As emissões de gás carbônico estão representadas no “teto” da Figura 6 e os níveis de Produto Interno Bruto estão no “chão” do gráfico.

As emissões de CO_2 ao longo do período de estudo são representadas pelo plano superior, que está em função também do plano inferior. Os PIBs estão no plano inferior, em função de X e de Y. As curvas Q_0, Q_1 e Q_2 estabelecem relações tecnológicas entre os insumos produtivos (McCALLUM et al. 2011), isto é, são curvas de nível, curvas isoquantas. O mesmo ocorre com as curvas do plano superior, Z_0, Z_1 e Z_2 .

As isoquantas indicam todas as combinações possíveis de insumos capazes de gerar determinado nível de produção, de acordo com Varian (2015), e são convexas e monotônicas, isto é, qualquer movimento em cima de uma mesma isoquanta não configura um volume maior de produção, mas apenas uma combinação diferente de insumos (que geram o mesmo nível de produção).

Na Figura 6, uma migração do ponto A para o ponto B em cima da isoquanta Z_1 não causa um volume de emissões de gás carbônico diferente, mas sim uma combinação diferente entre recursos renováveis e recursos não renováveis. O nível de emissão gerado em A e B é

resultado das respectivas combinações de (X_A, Y_A) e (X_B, Y_B) . De forma similar, no plano inferior, o nível de PIB dos pontos A' e B' é o mesmo, pois estão localizados sobre a mesma isoquanta Q_1 .

Para que haja diminuição das emissões, é preciso que se migre para um ponto em uma isoquanta mais próxima à origem (Z_0) como os pontos C (X_C, Y_C) e D (X_D, Y_D). Partindo do ponto A, conforme Figura 6, ao ponto C, é possível verificar que utilizar-se-á uma quantidade menor de recursos naturais não renováveis e uma quantia maior de recursos naturais renováveis ($Y_C > Y_A$ e $X_C < X_A$). Essa movimentação implica em uma redução do nível produzido no plano inferior, onde de forma análoga ao que acontece no plano superior, quanto mais longe da origem estiver a isoquanta, mais desejável ela será.

As derivadas direcionais, utilizadas para calcular a taxa de variação de uma função em direção arbitrária a um ponto, estão representadas pelos vetores \vec{AB} e \vec{AC} no plano superior e $\vec{A'B'}$ e $\vec{A'C'}$ no plano inferior. Estas derivadas direcionais expressam determinadas trajetórias de expansão ou redução da energia elétrica gerada, bem como da emissão de CO_2 , mas não necessariamente estes são os caminhos mais rápidos.

Os vetores \vec{AC} e $\vec{A'C'}$ são vetores que compreendem a soma (ou diferença) entre os vetores componentes $\vec{X_A X_C}$ e $\vec{Y_A Y_C}$ no plano superior e $\vec{X_{A'} X_{C'}}$ e $\vec{Y_{A'} Y_{C'}}$ no plano inferior, nos eixos X e Y.

Os vetores-gradiente indicam o sentido e a direção da combinação de insumos que proporciona redução das emissões, passando de Z_1 para Z_0 , com o melhor aproveitamento dos recursos. Na Figura 5, ele é representado por \vec{AD} . No plano inferior, o gradiente é o vetor $\vec{A'D'}$, sendo ele ortogonal à curva de funções Q_1 .

Com base nas Figuras 5 e 6, pode-se afirmar que a derivada direcional terá valor máximo quando o cosseno, isto é, a razão entre o cateto adjacente e a hipotenusa de um triângulo retângulo (triângulo que possui um ângulo de 90° e os outros dois menores que 90° , como é o caso do triângulo representado na Figura 5), do ângulo θ for igual a 1 (ocorre quando $\theta = 0^\circ$), valor mínimo quando cosseno de $\theta = -1$ ($\theta = 180^\circ$) e será zero quando $\theta = 90^\circ$ ou $\theta = 270^\circ$. Para obter a taxa de variação, calcula-se a tangente do ângulo θ . A taxa de variação é calculada aplicando a função trigonométrica arco cosseno ao quociente da divisão da derivada direcional pelo comprimento do vetor de insumos considerados e é transformada em graus.

Importante destacar que, em termos de velocidade de transição, quanto mais perto de 0° estiver o ângulo θ , mais rápida a transição de um ponto a outro e, de maneira inversa, a transição será mais lenta à medida que o ângulo θ se aproximar de 180° .

Tendo em mente a Figura 6, onde cada ponto sobre as curvas de nível representa o conjunto de possíveis combinações ótimas e cada combinação expressa uma escolha tecnológica que determina a intensidade energética do PIB e tem reflexo direto na superfície superior, indicando sua inclinação e formato, e vice-versa, além das metas que o Brasil se propôs a cumprir no Acordo de Paris, fica evidente que o país precisa diminuir o máximo possível o uso de recursos do eixo X e, ao mesmo tempo, ainda gerar o melhor PIB possível no plano inferior da figura 6.

Os parâmetros estimados para as equações (7) e (8) e os cálculos dos vetores-gradiente e derivadas direcionais representados na Figura 6 estão dispostos na próxima seção desta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo é destinado a apresentar os resultados das estimativas dos parâmetros obtidos das regressões não lineares e dos cálculos das derivadas direcionais e vetores gradiente, além de trazer uma discussão dos mesmos.

Com o objetivo de analisar se o Brasil está em período de transição energética rumo à Economia Verde e seguindo as premissas do Acordo de Paris, a partir dos parâmetros estimados nas equações (9) e (10), um vetor total, aqui classificado como \vec{r}_1 , é calculado a fim de verificar o andamento do país do ano de 1970 até o ano de 2016, isto é, analisar transição energética durante todo o período estudado.

Calcula-se também um vetor \vec{r}_{EC} para analisar a transição energética com base na Economia Verde e um vetor \vec{r}_{AC} que leva em consideração as premissas assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris.

Após estimação no *software* IBM SPSS, versão 20.0, os parâmetros α , β , γ , e δ resultaram conforme descrito nas equações (9) e (10).

$$\hat{Q} = A \hat{\alpha} X_t \hat{\beta} Y_t = 107,491 X_t^{0,145} Y_t^{0,427} \quad (9)$$

$$R^2 = 0,975$$

Onde Q representa o PIB brasileiro em função dos recursos naturais não renováveis (X) e recursos naturais renováveis (Y) utilizados para gerar energia elétrica. A capta os fatores não explicados pelo modelo. $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ representam a produtividade de X e Y , respectivamente.

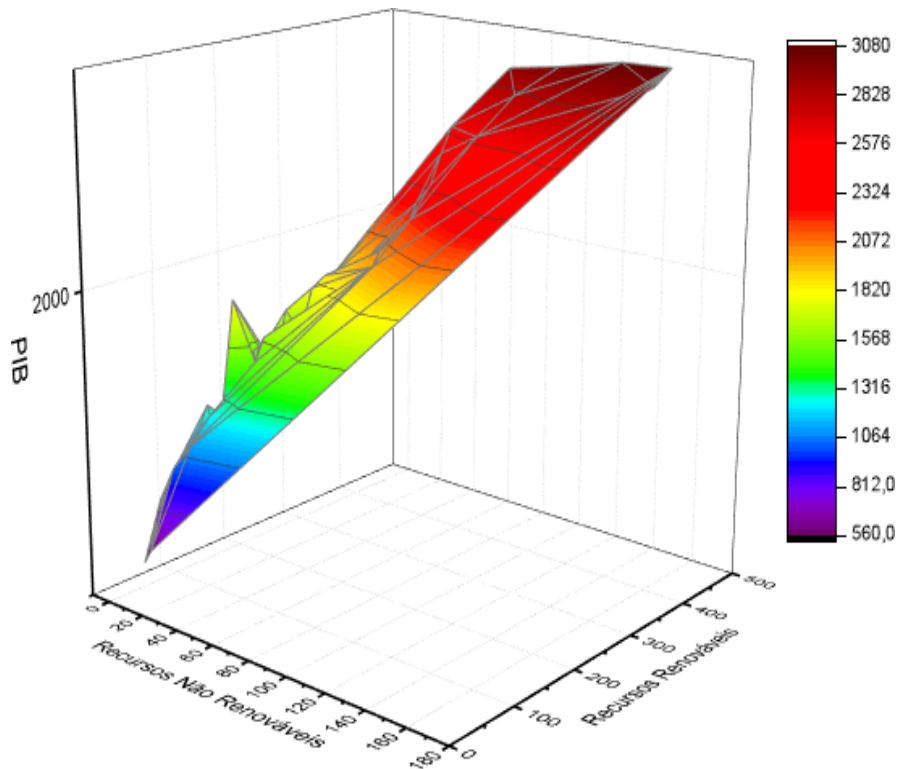
$$\hat{Z} = B \hat{\gamma} X_t \hat{\delta} Y_t = 23,33 X_t^{0,243} Y_t^{0,303} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,980$$

Sendo Z a quantidade de emissões de gás carbônico (CO_2) do setor elétrico brasileiro em função dos recursos naturais não renováveis (X) e recursos naturais renováveis (Y) utilizados para gerar energia elétrica. B capta os fatores não explicados pelo modelo e $\hat{\gamma}$ e $\hat{\delta}$ representam a produtividade de X e Y , respectivamente.

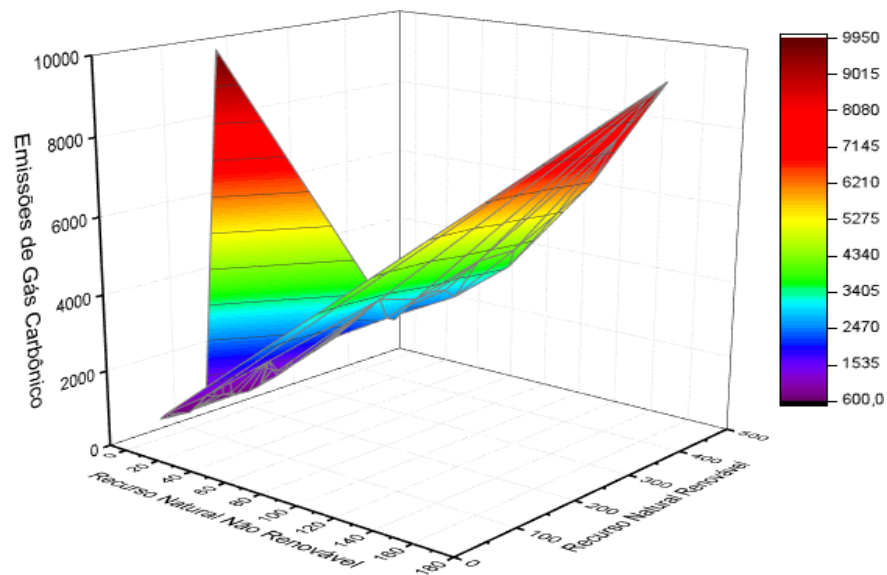
A Figura 7 apresenta, em três dimensões, $Q = f(X, Y)$ com os valores brutos. Nota-se que ao longo do período analisado, quanto mais perto do período final, maior é o PIB brasileiro (em 10^9 US\$*ppc*₂₀₁₀) e conseqüentemente mais energia elétrica, em GWh é gerada, e vice-versa. A escala representa o PIB em bilhões de US\$. A Figura 8 apresenta as combinações de insumos e as emissões de gás carbônico do setor elétrico. Seu formato irregular evidencia que em alguns anos do período analisado um volume maior de recursos naturais não renováveis (X) foi utilizado, produzindo, assim, mais gás carbônico. Alterações climáticas explicam o porquê do uso maior de combustíveis fósseis.

Figura 7 – Representação gráfica da função $Q = f(X, Y)$ para o período 1970-2016



FONTE: Elaborado pela autora por meio do *software* OriginPro versão 2017.

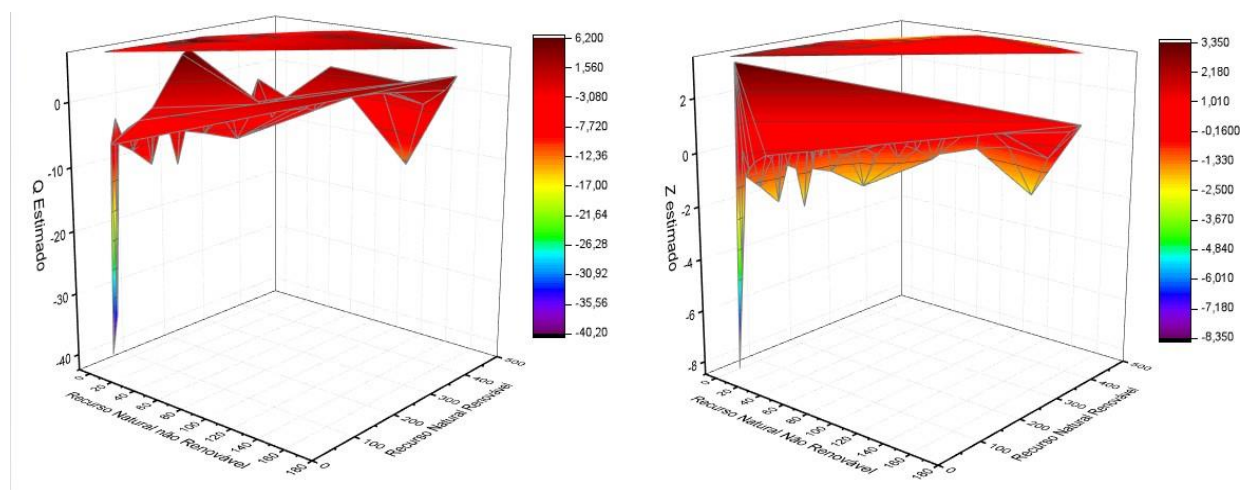
Figura 8 - Representação gráfica da função $Z = f(X, Y)$ para o período 1970-2016



FONTE: Elaborado pela autora por meio do *software* OriginPro versão 2017.

Os resultados das estimações são apresentados nas Figuras 9. O lado esquerdo representa a função \hat{Q} em bilhões de dólares, e o lado direito a função de emissões \hat{Z} em GWh. A união das superfícies formadas pelas funções está representada na Figura 10.

Figura 9 – Representação gráfica das estimativas de Q e Z para o período de 1970 a 2016.



FONTE: Elaborado com os resultados da pesquisa por meio do *software* OriginPro versão 2017.

Para o cálculo vetorial, é preciso das derivadas de primeira ordem das equações (9) e (10). As primeiras derivadas estão descritas nas equações (11) a (14).

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial X} = q_X = 15,65X^{-0,855}Y^{0,427} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial Y} = q_Y = 45,89X^{0,145}Y^{-0,573} \quad (12)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial X} = z_X = 5,67X^{-0,757}Y^{0,303} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial Y} = z_Y = 7,07X^{0,243}Y^{-0,697} \quad (14)$$

Onde q_X representa a primeira derivada da equação (9) em função de X, q_Y representa a primeira derivada da equação (9) em relação a Y, z_X representa a primeira derivada da equação (10) em relação a X e z_Y é o resultado da primeira derivada da equação (10) em relação a Y.

Os vetores-gradiente foram obtidos pelas equações $\nabla \hat{Q} = q_X + q_Y$ e $\nabla \hat{Z} = z_X + z_Y$ e estão dispostos nas equações (15) e (16).

$$\nabla \hat{Q}(X, Y) = 15,65X^{-0,855}Y^{0,427} + 45,89X^{0,145}Y^{-0,573} \quad (15)$$

$$\nabla Z(X, Y) = 5,67X^{-0,757}Y^{0,303} + 7,07X^{0,243}Y^{-0,697} \quad (16)$$

Para calcular o vetor, $r_{1,}$ referente à mudança do ano 1970 ao 2016, subtrai-se z_{2016} de z_{1970} . Para calcular o vetor unitário de $r_{1,}$ definido por \vec{u}_1 , divide-se os valores do vetor $r_{1,}$ pelo seu comprimento dado por $||r_{1,}||$. Sendo $X_{1970} = 5,428$, $Y_{1970} = 40,316$ e $X_{2016} = 113,373$, $Y_{2016} = 465,526$ (disponíveis no Apêndice A), todos em GWh, os passos para calcular o $r_{1,}$ e o \vec{u}_1 estão descritos nas equações (17) a (21).

$$z_{1970} = (5,428\vec{i} + 40,316\vec{j}) \quad (17)$$

$$z_{2016} = (113,373\vec{i} + 465,526\vec{j}) \quad (18)$$

$$\vec{r}_1 = \vec{z}_{1970} - \vec{z}_{2016} = -107,945\vec{i} - 425,21\vec{j} \quad (19)$$

$$\|\vec{r}_1\| = 438,698 \quad (20)$$

$$\vec{u}_1 = -0,246\vec{i} - 0,969\vec{j} \quad (21)$$

As derivadas direcionais (equações (6) e (7)) das funções Q e E para a mudança do ano 1970 ao ano 1971 resultaram nos seguintes resultados:

$$\hat{q}(X, Y) = -3,851X^{-0,855}Y^{0,427} - 44,479X^{0,145}Y^{-0,573} \quad (22)$$

$$\hat{z}_u(X, Y) = -1,395X^{-0,757}Y^{0,303} - 6,853X^{0,243}Y^{-0,697} \quad (23)$$

Em que $\hat{q}(X, Y)$ expressa a derivada direcional do ano 1970 e $\hat{z}_u(X, Y)$ representa a derivada direcional do ano 2016.

Realizando a substituição dos valores de X_{2016} e Y_{2016} nas equações (22) e (23), obtêm-se os resultados das equações (24) e (25), onde $\hat{q}(X, Y)$ é o valor da derivada direcional da função Q e $\hat{z}_u(X, Y)$ dá o resultado da derivada direcional da função Z para o período de 1970 a 2016.

$$\hat{q}(X, Y) = -12,936 \quad (24)$$

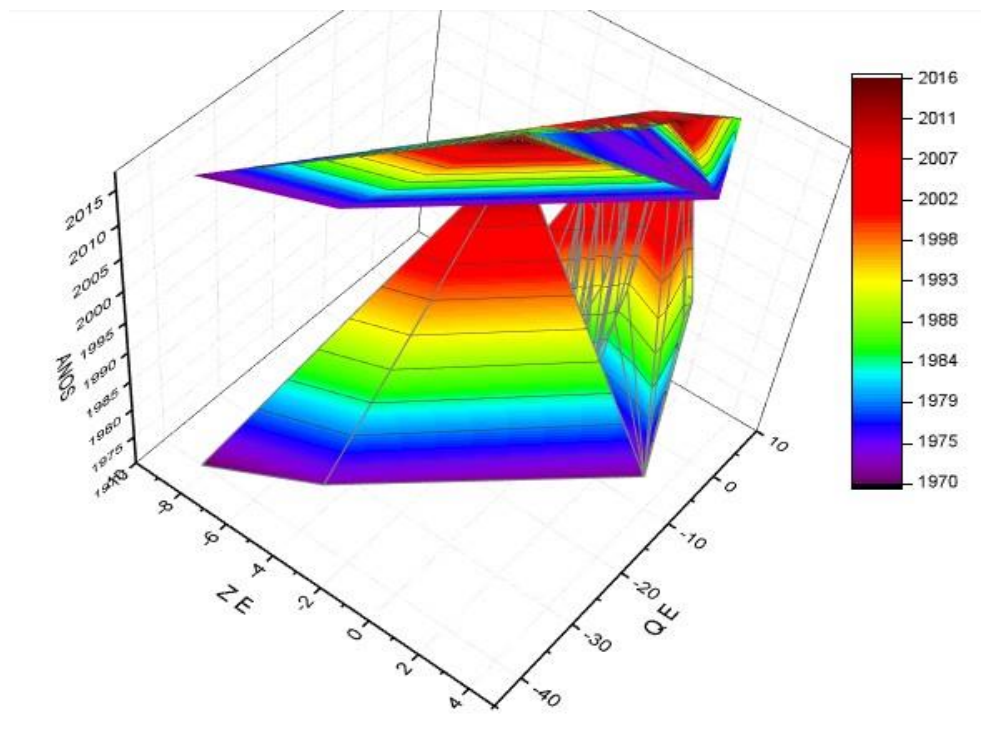
$$\hat{z}_u(X, Y) = -2,442 \quad (25)$$

Para verificar se o Brasil está obtendo ganhos ou perdas quanto à emissão de gás carbônico, o custo marginal de reduzir as emissões de CO_2 (CMg) dá o resultado de 5,297 bilhões de $US\$_{2010}$ por GWh de gás carbônico emitido (equação 26). Isto significa que o custo marginal de reduzir as emissões equivale ao benefício marginal que é obtido quando se se deixa de “produzir” uma unidade de emissão.

$$CMg_{z1} = \hat{q}(X, Y) / \hat{z}_u(X, Y) = 5,297 \quad (26)$$

A Figura 10 demonstra as emissões (Z) e os PIBs (Q) estimados ao longo do período 1970-2016. Conforme representado anteriormente na Figura 6, a superfície que aparece na parte superior é a superfície das emissões de CO_2 e está em função da superfície inferior (o “chão” do gráfico) que representa o PIB do Brasil. Isto significa que todas combinações de recursos naturais renováveis e não renováveis que estipulam um nível de PIB a cada ano, têm reflexo direto nas emissões de gás carbônico do setor elétrico brasileiro. De forma análoga, as emissões de CO_2 de todos os anos têm reflexo direto no Produto Interno brasileiro.

Figura 10 – Superfícies $Q = f(X, Y)$ e $Z = f(X, Y)$



FONTE: Elaborado com os resultados da pesquisa por meio do *software* OriginPro versão 2017.

4.1 CENÁRIOS DE ANÁLISE

Nesta subseção são criados dois cenários para analisar se o Brasil pode ser classificado como Economia Verde e se o País conseguirá cumprir as premissas assumidas no Acordo de Paris. O primeiro cenário leva em considerações as estimativas que o Ministério de Minas e Energia fez, publicadas por meio do documento Matriz Energética Nacional 2030 (MME/MEN 2030, 2007), para que o país possa ser energeticamente eficiente. O segundo cenário analisa diretamente a redução nas emissões de gás carbônico.

4.1.1 Transição para a Economia Verde

O documento Plano Nacional de Energia 2030, publicado em 2007, estima que até o horizonte de 2030 a demanda por energia elétrica aumentará devido ao aumento populacional e ao aumento do uso doméstico de energia elétrica. Estima-se que até 2030 a geração de energia elétrica atinja a marca de 1.155 gigawatt-hora, com uma proporção de 23,9% de energia proveniente de fontes não renováveis e 76,1% de fontes renováveis (MME/MEN 2030, 2007).

Levando em consideração os percentuais acima citados, para atingir 1155 GWh de energia elétrica em 2030, o Brasil precisará produzir 276,045 GWh de energia proveniente de fontes não renováveis e 878,95 GWh de energia elétrica advinda de fontes renováveis. O PIB cresceu, em média, 3,5 ao ano ao longo de 1970 a 2016, portanto, levando em conta que a taxa de crescimento ao ano permanecerá constante, em 2030, estima-se que ele chegara, no máximo, a 3640,78 bilhões de $US\$_{2010}$.

Com os dados acima citados e levando em consideração o ano de 2016 ($X_{2016} = 113,373$ e $Y_{2016} = 465,526$; conforme Apêndice A), calcula-se o vetor de redução \vec{r}_{EV} referente ao período de 2016 a 2030 no cenário da Economia Verde de maneira semelhante ao \vec{r}_1 . Os resultados do cálculo do vetor \vec{r}_{EV} estão dispostos nas próximas equações.

$$\vec{r}_{EV} = -162,672\vec{i} - 413,424\vec{j} \quad (27)$$

$$||\vec{r}_{EV}|| = 444,2765 \quad (28)$$

$$\vec{u}_{EV} = -0,3661\vec{i} - 0,9305\vec{j} \quad (29)$$

$$\hat{q}(X, Y) = -5,73X^{-0,855}Y^{0,427} - 42,70X^{0,145}Y^{-0,573} \quad (30)$$

$$\hat{z}_u(X, Y) = -2,08X^{-0,757}Y^{0,303} - 6,57X^{0,243}Y^{-0,697} \quad (31)$$

$$\nabla\hat{Q}(X, Y) = -2,831 \quad (32)$$

$$\nabla Z(X, Y) = -0,458 \quad (33)$$

Onde \vec{r}_{EV} é a subtração dos vetores dos anos 2030 e 2005, $||\vec{r}_{EV}||$ é o comprimento desse vetor e \vec{u}_{EV} é o vetor unitário do \vec{r}_{EV} para o período em análise. $\hat{q}(X, Y)$ e $\hat{z}(X, Y)$ representam as derivadas direcionais com base nos valores obtidos nas equações (9) a (14) e $\nabla\hat{Q}$ e $\nabla\hat{Z}$ são os vetores-gradiente das funções PIB e Emissões, respectivamente com os valores de X_{2030} e Y_{2030} .

O custo marginal de produzir um gigawatt-hora de emissão, obtido por meio da equação (26), é de 6,17 bilhões de $US\$_{2010}$ por GWh, ou seja, o aumento das emissões de gás carbônico no setor elétrico implica em um comprometimento maior do PIB brasileiro durante o período 2016-2030. Esse fato é explicado pela projeção feita pela Matriz Energética 2030 (MME/MEN 2030, 2007) de uma elevação na proporção do uso de energia térmica devido a fatores climáticos.

Para medir a distância entre a derivada direcional e o vetor-gradiente, que é ortogonal às curvas isoquantas é necessário calcular o ângulo θ entre ambos. Através de $f_{\vec{u}}(X_i, Y_i) = ||\nabla f(X_i, Y_i)|| \cdot ||\vec{u}_i|| \cdot \cos \theta$ é possível então obter a distância entre a direção arbitrária escolhida para o deslocamento (derivada direcional) e a direção que indica o deslocamento máximo ou mínimo para atingir realizar a transição para a Economia Verde. Como o comprimento de \vec{u}_{EV} é igual à unidade, então $\cos \theta = f_{\vec{u}}/||\nabla f||$. As equações (34) e (35) apresentam os comprimentos dos vetores-gradiente para as funções Q e Z e as equações (36) e (37) os cossenos das funções Q e Z , respectivamente.

$$||\nabla\hat{Q}|| = 43,086 \quad (34)$$

$$||\nabla Z|| = 6,898 \quad (35)$$

$$\cos \theta_Q = -\frac{2,831}{43,086} = -3,76^0 \quad (36)$$

$$\cos \theta_Z = \frac{0,458}{6,898} = -3,81^0 \quad (37)$$

$$f_{\vec{u}_Q} = ||\nabla\hat{Q}|| \cdot \cos \theta_Q = -162,2^0 \quad (38)$$

$$f_{\vec{u}_Z} = ||\nabla\hat{Z}|| \cdot \cos \theta_Z = -26,27^0 \quad (39)$$

Os sinais negativos dos ângulos nas equações (38) e (39) indicam que os ângulos estão girando em sentido horário, porém seu tamanho deve ser considerado sem esses sinais negativos. O ângulo f_{u_z} está mais perto de 0^0 , indicando que a transição para a Economia Verde no período analisado, em função das emissões de gás carbônico, acontece de maneira rápida. O ângulo de f_{u_θ} porém, está mais próximo a 180^0 , evidenciando uma transição mais lenta em termos de Produto Interno.

Para medir a taxa de variação em Q e Z é preciso calcular a tangente do ângulo θ para cada uma das funções. Assim, a taxa de variação de Q resulta em 15,18, em módulo, e a de Z em 15,0, em módulo. Tais valores configuram a velocidade com que o Brasil migra para a Economia Verde.

4.1.2 Acordo de Paris

As premissas de redução de emissão dos gases que causam o efeito estufa que o Brasil assumiu no Acordo de Paris são para o horizonte até 2025, porém as assumidas para o setor elétrico em específico são para o ano de 2030, com base no ano de 2005. Para que uma redução de 5% no total de emissões em relação a 2005 ocorra, é preciso produzir no máximo 262,242 GWh de energia elétrica proveniente de combustíveis fósseis até o ano de 2030, elevando a produção de eletricidade de fontes renováveis para 922,7 GWh, para que se tenha 341,733 GWh de gás carbônico emitidos.

Assim, de forma semelhante à calculada na subseção anterior nas equações (27) a (39), chega-se aos seguintes resultados para uma redução de 5% de gás carbônico (CO_2), representada pelo vetor de redução \vec{r}_{AP} .

$$\vec{r}_{AP} = -148,869 - 457,174\vec{j} \quad (40)$$

$$||\vec{r}_{AP}|| = 480,8015 \quad (41)$$

$$\vec{u}_{AP} = -0,309\vec{i} - 0,950\vec{j} \quad (42)$$

$$\hat{q}(X, Y) = -4,85X^{-0,855}Y^{0,427} - 43,63X^{0,145}Y^{-0,573} \quad (43)$$

$$\hat{z}_u(X, Y) = -1,75X^{-0,757}Y^{0,303} - 6,72X^{0,243}Y^{-0,697} \quad (44)$$

$$\nabla\hat{Q}(X, Y) = -2,721 \quad (45)$$

$$\nabla Z(X, Y) = -0,579 \quad (46)$$

$$||\nabla\hat{Q}|| = 43,91 \quad (47)$$

$$||\nabla\hat{Z}|| = 6,94 \quad (48)$$

$$\cos \theta_Q = -\frac{2,721}{43,91} = -3,551^0 \quad (49)$$

$$\cos \theta_Z = \frac{0,579}{6,94} = -4,771^0 \quad (50)$$

$$f_{\hat{u}_Q} = ||\nabla\hat{Q}|| \cdot \cos \theta_Q = -155,93^0 \quad (51)$$

$$f_{\hat{u}_Z} = ||\nabla\hat{Z}|| \cdot \cos \theta_Z = -33,15^0 \quad (52)$$

$$CMg = 4,70 \quad (53)$$

O vetor de redução \vec{r}_{AP} , equação (40), apresenta comprimento e vetor unitário conforme equações (41) e (42), respectivamente. Percebe-se que este vetor do Acordo de Paris é maior que o vetor da Economia Verde, \vec{r}_{EV} , pois $||\vec{r}_{AP}|| > ||\vec{r}_{EV}||$. As equações (43) e (44) representam as derivadas direcionais para as funções $Q = f(X, Y)$ e $Z = f(X, Y)$, de forma respectiva. Os vetores gradientes e seus comprimentos estão representados nas equações (45) a (48).

Quanto aos ângulos das equações (51) e (52), eles representam o quão perto de uma adesão rápida à meta de redução de emissão de gás carbônico do Acordo de Paris o Brasil está. Considerando que quando mais perto de 180^0 , mais lenta se dá a transição, pode-se afirmar que a transição será mais rápida em comparação como cenário anterior. Ainda assim, os resultados apontam para o fato de o Brasil ser mais eficiente em termos ambientais.

O Custo Marginal de produzir um resíduo não desejado, i emissões é de 4,7 (equação 53). Isso implica em 4,7 bilhões de $US\$_{2010}$ por GWh de emissão de gás carbônico gerada.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou analisar se, durante o período compreendido entre 1970 e 2016, o setor elétrico do Brasil apresentou indícios de realizar transição para a Economia Verde, este modelo de crescimento e desenvolvimento econômico que deriva em bem-estar e igualdade social aliadas à boa conservação ambiental.

Para cumprir o objetivo acima proposto, levou-se em consideração as combinações ótimas entre recursos naturais renováveis e recursos naturais não renováveis para que seja possível manter (e ampliar) os níveis de oferta e de consumo sem que se aumente o dano ambiental (na forma de emissões de gás carbônico) e sem sacrificar o Produto Interno Bruto (PIB).

Através da estimação das funções Q e Z do cálculo vetorial foi possível observar que o Brasil faz uma transição para a Economia Verde que pode ser considerada rápida levando em conta o cenário propriamente da Economia Verde que busca a transição energética de maneira a aumentar a proporção de recursos renováveis em comparação com os recursos não renováveis e o cenário do Acordo de Paris que busca reduzir efetivamente as emissões dos gases do efeito estufa (neste trabalho foi avaliada só a emissão de gás carbônico).

Em ambos os cenários, o Brasil apresenta custo marginal de aumentar as emissões positivas, porém no cenário da Economia Verde, este custo é mais elevado devido ao fato da proporção de recursos não renováveis geradores de energia elétrica ser maior em comparação com a proporção deste insumo no outro cenário.

Em acordo com a hipótese levantada de que o Brasil está realizando a transição para a Economia Verde, é possível afirmar que o País realiza essa transição em uma velocidade que pode ser considerada rápida para a função de emissões, comprovado pelo ângulo θ mais próximo de 0° nos dois cenários analisados, porém em termos de PIB a transição é lenta.

É preciso avaliar, porém, que, mesmo em um país considerado energeticamente eficiente como o Brasil, a externalidade negativa da produção de energia elétrica traz um ônus ao PIB. De forma análoga, cada vez que as emissões de gás carbônico forem reduzidas, há tendência de o País alcançar níveis mais desejáveis de PIBs.

Cabe aqui uma ressalva importante: as Contribuições Determinadas Nacionalmente (CDNs) assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris para reduzir a emissão dos gases do efeito estufa não são apenas para o setor elétrico e não são separadas por setor. Desta maneira, mesmo que essa pesquisa indique que o Brasil conseguirá reduzir a emissão de gás carbônico do setor elétrico até o horizonte de 2030, não há garantia de que o País conseguira cumprir com as

premissas assumidas na Acordo. Mais estudos abrangendo todos os setores que emitem gases que causam o efeito estufa se fazem necessários para afirmar que o Brasil cumprirá suas CDNs ou não.

De maneira geral, as emissões de gás carbônico específicas da geração de energia elétrica representam menos de 5% do total emitido no país, mas merecem atenção quando o assunto é a transição para a Economia Verde. Outros fatores dentro das dimensões da Economia Verde precisam ser analisados para considerar toda a economia brasileira como “verde”, mas, a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, o setor elétrico do Brasil já é verde.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R. **Muito Além da Economia Verde**. São Paulo: Abril, 2012.
- ARAÚJO, J. L. R. H.; OLIVEIRA A. Política energética brasileira: mudança de rumo? **Colóquio Internacional “Energía, Reformas Institucionales y Desarrollo em América Latina”**, Universidad Nacional Autónoma de México – Université PMF de Grenoble, México, D.F., 5-7 nov. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). **Visão Geral do Setor**. Brasília: 2015
- BAER, W.; McDONALD, C. Um retorno ao passado? A privatização de empresas de serviços públicos no Brasil: o caso do setor de energia elétrica. **Planejamento e Políticas Públicas**, São Paulo, n. 16, dez. de 1997.
- CARVALHO, J. F. **O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável**. Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 2009
- CHAVES, M. P. S. R.; RODRIGUES, D. C. B. Desenvolvimento Sustentável: limites e perspectivas de debate contemporâneo. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, v. 8, n. 13, p. 99-106, Set. 2006.
- COBB; C. W.; DOUGLAS, P. H. A theory of production. **Am Econ Rev** 1928:139–65.
- COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005.
- DINIZ, E. M. & BERMAN, C. Economia Verde e Sustentabilidade. **Estudos Avançados**, Volume 26, pp. 323-329, 2012.
- ELLERY FILHO, E. H. A ANEEL e o Modelo do Setor Elétrico Brasileiro. **Seminário “A Crise Energética Brasileira”**. Brasília-DF, 2001
- FREITAS, G. S. **As Modificações na Matriz Energética Brasileira e as Implicações para o Desenvolvimento Sócio-Econômico e Ambiental**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- GIACOMELLI SOBRINHO, V., 2016. **Bioeconomic Development and Energy-Efficient Paths**. Stockolm: KTH - Kungliga Tekniska Högskolan/Royal Institute of Technology (Research Proposal).
- GIACOMELLI SOBRINHO, V.; LAGUTOV, V.; BARAN, S.; KOREN, M. **Green with sawy? Brazil’s climate pledge to the Paris Agreement and its transition to the Green Economy**. Draft Version. Central European University: Budapest, Hungary, 2018.
- HARRIS, J. M.; ROACH, B. **Environmental and natural resource economics: a contemporary approach**. M. E. Sharpe, 3ª ed. New York: 2013.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. O setor elétrico brasileiro no contexto das mudanças climáticas e o Acordo de Paris. **White Paper 17**, São Paulo, 2017.

LORENZO, H. C de. **O Setor Elétrico Brasileiro: Reavaliando o Passado e Discutindo o Futuro**. Araraquara, 2002

MARTINS, C. H. B. Pobreza, meio ambiente e qualidade de vida: indicadores para o desenvolvimento humano sustentável. **Indic. Econ. FEE**, Porto Alegre, v. 30, n. 3, p. 171-188, dez, 2002.

MATTOS., T. B. **Modelos Não Lineares e suas Aplicações**. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Juiz de Fora, 2013.

McCALLUM, W. G. et al. **Cálculo a Uma e Várias Variáveis**. GEN/LTC: 5ª edição. Rio de Janeiro, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **BEN - Séries históricas completas**. Tabelas 1970-2017 n.d.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Banco de Informações de Geração. **Boletim de Informações Gerenciais – Dezembro 2017**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>>. Último acesso em 27 de Mai. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2015: ano-base 2014**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2016: ano-base 2015**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2017: ano-base 2016**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Acesso à Informação**. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/acessoainformacao/Paginas/acessoainformacao.aspx>>. Último acesso em: 28, mai., 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis ano 2016**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/estatistica/epeanalise_de_conjuntura_dos_biocombustiveis/2017/06jun17_analise_conjuntura_biocombustiveis_ano_2016.pdf>. Acesso em 07, fev., 2018.

MISHRA, S. K. Brief History of Production Functions. **IUP J Manag. Econ.** Vol 8, p. 6-34, 2010.

MONTIBELLER-FILHO, G. **O Mito do Desenvolvimento Sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias**. Editora da UFSC, 3ª edição, Florianópolis, 2008.

MORETTIN, P. A. et al. **Cálculo - Funções de Uma e Várias Variáveis**. Ed. Saraiva, 2003.

MUELLER, C. C. **Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente**. Editora UnB, Brasília, 2007.

MUNHOZ, D. G. **Economia aplicada – técnicas de pesquisa e análise econômica**. Brasília: Editora UnB, 1989.

OLIVEIRA, A. F. et al. **Atual modelo do setor elétrico brasileiro e suas políticas**. Centro Universitário do Sul de Minas Gerais - UNIS-MG, 2012.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Rumo a uma economia verde: caminhos para o desenvolvimento sustentável e a erradicação da pobreza**. Noruega: PNUMA: Grid-Arendal, 2011.

SAWYER, D. Economia verde e/ou desenvolvimento sustentável? **Desafios e Oportunidades**, nº 8, ps. 36-42, Junho de 2011.

THOMAS, G. **Relatório sobre regressão não linear para a disciplina de Regressão e Covariância**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

TOLMASQUIM, M. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil.** Estudos Avançados 26 (74), 2012.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). United Nations (UN). **The Green Economy: trade and sustainable development implications.** Geneva, Switzerland: 8-10 November, 2011.

URSAIA, G. C.; et al.. **O quadro político e institucional do setor energético brasileiro.** Working Paper, n. 93. Portugal: 2012.

VARIAN, H. R. **Microeconomia: uma abordagem moderna.** Rio de Janeiro: Elsevier, 9^a ed, 2006.

APÊNDICE A – DADOS

ANOS	VARIÁVEIS			
	X (recursos não renováveis em GWh)	Y (recursos renováveis em GWh)	Q (PIB em 10 ⁹ US\$)	Z (emissões de CO ₂ em GWh)
1970	5.428	40.316	567.27	678.941
1971	7.761	43.832	631.62	825.317
1972	5.763	51.397	707.035	657.399
1973	6.087	58.641	805.8	721.008
1974	5.235	66.464	871.51	629.488
1975	5.783	73.154	916.53	640.567
1976	6.255	83.777	1010.54	618.874
1977	6.415	94.597	1060.4	709.732
1978	8.652	104.078	1113.15	982.561
1979	8.418	118.356	1188.35	899.535
1980	8.671	130.713	1298.67	866.830
1981	9.547	132.639	1242.52	927.829
1982	8.779	143.31	1252.85	856.410
1983	8.034	154.459	1216.13	739.964
1984	9.943	169.445	1821.8	757.712
1985	12.24	181.442	1382.42	883.023
1986	16.516	185.613	1485.96	1635.475
1987	14.166	189.166	1538.42	1351.706
1988	12.52	202.433	1537.49	1215.958
1989	13.646	208.093	1586.08	1169.155
1990	12.253	210.567	1517.08	993.995
1991	12.595	221.782	1532.73	1108.448
1992	13.49	228.269	1525.56	1270.752
1993	11.955	240.049	1557.75	1158.927
1994	11.947	248.093	1682.92	1206.635
1995	16.103	259.499	1556.21	1428.007
1996	18.755	272.491	1795.01	1602.379
1997	21.625	286.355	1855.94	1808.427
1998	22.769	298.979	1862.22	1912.684
1999	33.348	301.378	1870.93	2809.284
2000	36.661	312.26	1953.03	2815.762
2001	51.618	276.901	1980.17	3226.082
2002	49.299	296.379	2040.63	2596.857
2003	46.768	317.571	2063.91	2420.592
2004	54.119	333.333	2182.79	3001.980
2005	51.891	351.141	2252.69	3069.521
2006	55.572	363.812	2341.94	3090.490
2007	52.464	392.685	2484.09	2945.534
2008	72.623	390.263	2610.64	3986.090

2009	51.293	414.865	2607.36	2646.773
2010	78.786	437.012	2803.65	4148.604
2011	68.486	463.272	2915.07	3473.473
2012	96.811	455.688	2971.07	5234.156
2013	132.788	438.047	3060.35	7607.664
2014	158.493	432.05	3075.77	9244.383
2015	150.563	430.664	2966.71	8880.566
2016	113.373	465.526	2863.98	6210.100

APÊNDICE B – *OUTPUTS* DAS FUNÇÕES $Q = f(X, Y)$ e $Z = f(X, Y)$

Função $Q = f(X, Y)$

Iteration History ^b				
Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter		
		a	b	c
1.0	169806175,9	,000	,000	,000
1.1	167390010,9	,000	,000	14,586
2.0	167390010,9	,000	,000	14,586
2.1	108663374,9	,372	,216	30,827
3.0	108663374,9	,372	,216	30,827
3.1	94717842,95	,391	,230	33,412
4.0	94717842,95	,391	,230	33,412
4.1	68653669,31	,421	,252	37,842
5.0	68653669,31	,421	,252	37,842
5.1	29487121,71	,460	,283	44,862
6.0	29487121,71	,460	,283	44,862
6.1	9387440,000	,450	,320	58,762
7.0	9387440,000	,450	,320	58,762
7.1	5181762,239	,357	,337	74,505
8.0	5181762,239	,357	,337	74,505
8.1	1418879,883	,183	,391	106,929
9.0	1418879,883	,183	,391	106,929
9.1	568243,678	,143	,431	106,713
10.0	568243,678	,143	,431	106,713
10.1	566581,948	,145	,427	107,532
11.0	566581,948	,145	,427	107,532
11.1	566581,720	,145	,427	107,491
12.0	566581,720	,145	,427	107,491
12.1	566581,720	,145	,427	107,491

Derivatives are calculated numerically.

- Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.
- Run stopped after 24 model evaluations and 12 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most $SSCON = 1,000E-008$.

Parameter Estimates				
Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	,145	,020	,105	,186
b	,427	,042	,342	,513
c	107,491	19,328	68,538	146,445

Função $Z = f(X, Y)$

Iteration History ^b					Iteration History ^b				
Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter			Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter		
		a	b	c			a	b	c
1.0	169806175,9	,400	,600	,000	17.1	2896228,778	-,068	1,051	6,405
1.1	168002761,0	,400	,600	,078	18.0	2896228,778	-,068	1,051	6,405
2.0	168002761,0	,400	,600	,078	18.1	2806503,974	-,045	,982	8,546
2.1	135537361,9	,659	,797	,171	19.0	2806503,974	-,045	,982	8,546
3.0	135537361,9	,659	,797	,171	19.1	2319356,670	-,041	,965	9,619
3.1	125300459,3	,680	,814	,189	20.0	2319356,670	-,041	,965	9,619
4.0	125300459,3	,680	,814	,189	20.1	2148553,974	-,025	,917	11,764
4.1	107651210,9	,708	,837	,215	21.0	2148553,974	-,025	,917	11,764
5.0	107651210,9	,708	,837	,215	21.1	1911464,332	-,013	,882	13,911
5.1	77630394,59	,745	,868	,256	22.0	1911464,332	-,013	,882	13,911
6.0	77630394,59	,745	,868	,256	22.1	1844008,837	,009	,817	18,204
6.1	47221736,58	,783	,905	,317	23.0	1844008,837	,009	,817	18,204
7.0	47221736,58	,783	,905	,317	23.1	1478637,025	,013	,801	20,352
7.1	42422080,00	,720	,927	,397	24.0	1478637,025	,013	,801	20,352
8.0	42422080,00	,720	,927	,397	24.1	1358531,269	,029	,755	24,647
8.1	35613466,17	,595	,968	,540	25.0	1358531,269	,029	,755	24,647
9.0	35613466,17	,595	,968	,540	25.1	1185876,808	,041	,721	28,942
9.1	23632581,09	,356	1,076	,812	26.0	1185876,808	,041	,721	28,942
10.0	23632581,09	,356	1,076	,812	26.1	1181293,926	,063	,657	37,533
10.1	8326370,872	-,100	1,312	1,393	27.0	1181293,926	,063	,657	37,533
11.0	8326370,872	-,100	1,312	1,393	27.1	890309,143	,068	,641	41,830
11.1	32984075,57	-,078	1,075	3,421	28.0	890309,143	,068	,641	41,830
11.2	4912531,769	-,155	1,344	1,639	28.1	834849,553	,085	,595	50,421
12.0	4912531,769	-,155	1,344	1,639	29.0	834849,553	,085	,595	50,421
12.1	4739075,984	-,141	1,282	2,153	29.1	729172,272	,097	,561	59,014
13.0	4739075,984	-,141	1,282	2,153	30.0	729172,272	,097	,561	59,014
13.1	4224043,598	-,128	1,239	2,679	30.1	818957,387	,120	,498	76,198
14.0	4224043,598	-,128	1,239	2,679	30.2	667079,348	,103	,542	64,751
14.1	4218786,385	-,102	1,158	3,734	31.0	667079,348	,103	,542	64,751
15.0	4218786,385	-,102	1,158	3,734	31.1	645463,486	,118	,503	76,225
15.1	3426920,206	-,097	1,142	4,269	32.0	645463,486	,118	,503	76,225
16.0	3426920,206	-,097	1,142	4,269	32.1	600411,271	,129	,472	87,699
16.1	3219150,855	-,080	1,089	5,335	33.0	600411,271	,129	,472	87,699
17.0	3219150,855	-,080	1,089	5,335	33.1	579454,981	,139	,444	99,174
					34.0	579454,981	,139	,444	99,174
					34.1	568309,029	,146	,427	107,369
					35.0	568309,029	,146	,427	107,369
					35.1	566581,725	,145	,427	107,487
					36.0	566581,725	,145	,427	107,487
					36.1	566581,720	,145	,427	107,491

Derivatives are calculated numerically.

- Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.
- Run stopped after 74 model evaluations and 36 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most $S_{CON} = 1,000E-008$.

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	23,330	4,116	15,018	31,643
b	,303	,042	,219	,387
c	,243	,020	,204	,283