

ELASTICIDADE RENDA DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE DIFERENTES SETORES NO MUNDO

Ana Beatriz Carvalho Werlang

PSR – Energy Consulting and Analytics

e-mail: anabeatriz@psr-in.com

Ilana Geller

Universidade Federal do Rio de Janeiro

e-mail: Ilana@poli.ufrj.br

Gabriel Rocha de Almeida Cunha

PSR – Energy Consulting and Analytics

e-mail: gabriel@psr-in.com

André Assis de Salles

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia – Bloco F – sala F 101 – Ilha do Fundão – Rio – Brasil

e-mail: as@ufrj.br

O tema da relação causal entre a demanda de energia e o PIB tem sido objeto de intensas pesquisas ao longo das últimas três décadas. O presente trabalho busca analisar a evolução do consumo energético de diferentes países do mundo e a relação do mesmo com o nível de desenvolvimento econômico, representado pelo PIB. Para isso, foi construída uma base de dados anuais contendo o PIB e o consumo de energia elétrica de 143 países no período entre 1990 e 2014. Assim, foram utilizados modelos de regressão linear e modelos vetoriais autoregressivos para explicar o consumo de energia elétrica dos países e grupos de países. Os resultados indicaram que não existe um comportamento padrão de elasticidade para a maioria dos países com níveis semelhantes de desenvolvimento econômico. Apesar disso, foi observado um bom desempenho na regressão linear simples para os dados agregados em grupos de países, o que indica a possibilidade de se realizar um planejamento agregado confiável.

Palavras-chave: Consumo energético, PIB, Regressão Linear, Modelos Vetoriais Autoregressivos

The causal relationship between energy demand and GDP has been the subject of intense research over the past three decades. The present work seeks to analyze the energy consumption evolution of different countries of the world and the relation of the same with the level of economic development, represented by GDP. For this purpose, an annual database containing GDP and electricity consumption of 143 countries in the period between 1990 and 2014 was prepared. Thus, linear regression models and autoregressive vector models were used to explain the electricity consumption of countries and groups of countries. The results indicated that there is no standard elasticity behavior for most countries with similar levels of economic development. Despite this, a good performance was observed in the simple linear regression for aggregate data in groups of countries, which indicates the possibility of performing a reliable aggregate planning.

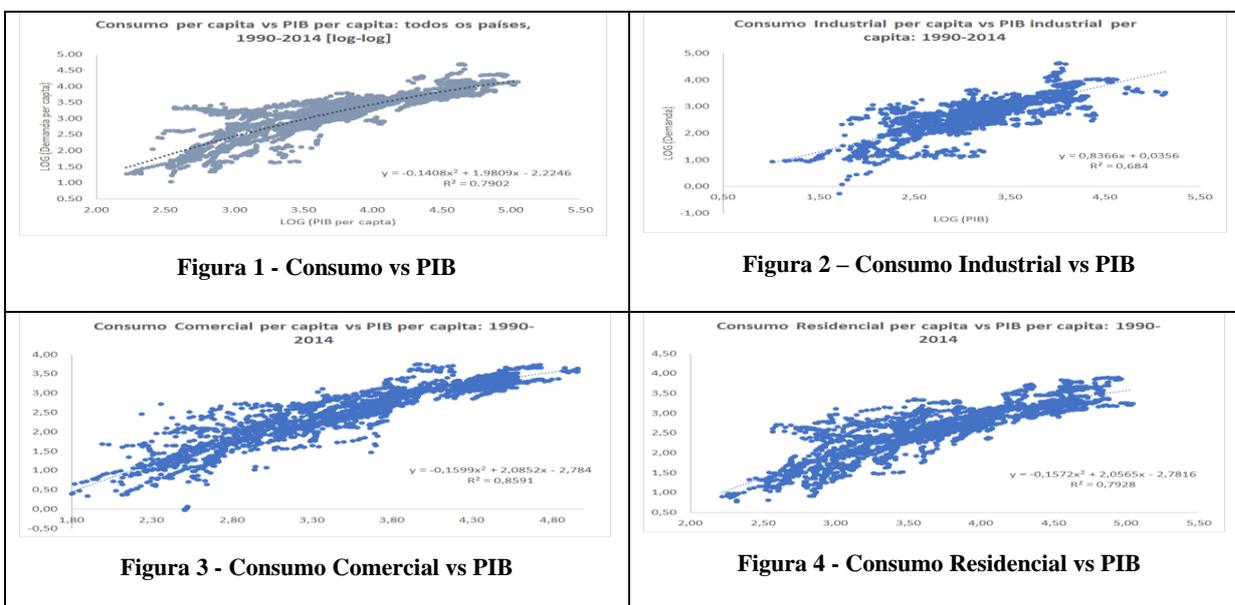
Keywords: Energy Consumption, GDP, Linear Regression, Autoregressive Vector Models

1. Introdução

A energia é essencial para o desenvolvimento e a prosperidade da humanidade. A importância do acesso à energia para produção e por conseguinte desenvolvimento é reconhecida. A falta de acesso à energia dificulta, e pode até impossibilitar, que um país enfrente desafios como pobreza, poluição do ar, baixos níveis de expectativa de vida, falta de acesso a serviços essenciais de saúde, falta de acesso à educação de qualidade, adaptação e mitigação das mudanças climáticas, produção e segurança alimentar, crescimento econômico e emprego, industrialização sustentável e desigualdade de gênero. Assim, é possível relacionar o consumo energético com o desenvolvimento de um país. E um dos principais indicadores avançados de desenvolvimento de um país é a variação do Produto Interno Bruto (PIB), utilizado para medir o nível da atividade econômica. Apesar de não ser o indicador mais apropriado, por não considerar dados como a distribuição de renda, investimento em educação, entre outros, o PIB é o principal indicador econômico utilizado nas projeções de consumo e está diretamente relacionado ao nível de desenvolvimento do país, mais especificamente da renda de um país. A energia elétrica é uma das formas mais usuais de energia utilizadas no planeta, sua descoberta possibilitou grande desenvolvimento tecnológico, transformando eletricidade em luz, calor e força no mundo moderno. E o seu uso tem sido essencial na sociedade. Além de proporcionar maior conforto para a população, a sua utilização proporciona aumento da capacidade da produção de bens e serviços nos diversos setores da economia, como pode-se observar em Finkler *et al.* (2016).

O gráfico apresentado na Figura 1, adiante, mostra a associação entre o consumo de energia elétrica e a renda, dada pelo PIB. Os dados se referem a informações anuais per capita do consumo de eletricidade e do PIB de 143 países ao redor do mundo, ajustados a um modelo polinomial de 2ª ordem. Dessa estimativa, pode-se inferir que os dados se ajustam bem a um modelo de crescimento polinomial, isto é, o consumo de energia elétrica per capita apresenta um crescimento mais acentuado em relação ao PIB per capita, quando este último apresenta valores mais baixos, representando o comportamento de países em desenvolvimento. No entanto, tal crescimento vai desacelerando gradualmente conforme o PIB per capita vai aumentando, até estagnar ou até tornar-se negativo, comportamento característico de países com alto nível de desenvolvimento, onde a população apresenta crescimento nulo ou decrescente e a eficiência energética é alta. Dessa forma, fica claro a existência de uma relação causal entre o consumo de energia e o crescimento econômico. Visando aprofundar o estudo dessa conexão, é importante destacar a possibilidade de que os setores da economia tenham comportamentos diferentes e reajam de forma distinta às mudanças econômicas. De acordo com de Castro e Brandão (2009), o consumo residencial é menos afetado pelas variações do PIB e tem impactos menos imediatos do que o consumo industrial e o comercial. Além disso, vale destacar a existência de dados de PIB setorial, os quais provavelmente tem maior correlação com o consumo de cada setor do que o PIB global de um país e, desse modo, faz sentido que o estudo da relação entre o consumo de energia e o PIB seja feito de maneira separada para os diferentes setores da economia. Nas Figuras 2, 3 e 4, a seguir, pode-se observar o comportamento do consumo industrial, comercial e residencial em relação a renda, medida pelo PIB, dos países da amostra. O gráfico apresentado na Figura 2 foi elaborado a partir de um modelo de regressão linear simples, sendo o consumo industrial per capita a variável dependente e o PIB industrial per capita é a variável explicativa ou independente. O coeficiente de determinação do modelo é 0,684, o que se traduz em uma explicação de 68,4% da variável dependente. Com isso, fica claro que o comportamento tem um crescimento linear. Isto é, o consumo industrial per capita aumenta conforme o PIB per capita aumenta, sendo a elasticidade da demanda de energia em relação ao PIB de 0,8366. Na análise do comportamento do consumo de energia elétrica comercial per capita em relação ao PIB comercial per capita o coeficiente de determinação é 0,8591. Isso significa que esse modelo consegue explicar melhor os valores observados do que o modelo do consumo industrial per capita versus o PIB industrial per capita apresentado anteriormente. Além disso, percebe-se, no gráfico apresentado na Figura 3, que o comportamento tem um crescimento polinomial de segunda ordem, isto é, o consumo de energia elétrica comercial per capita apresenta um crescimento mais acentuado em relação ao PIB per capita, quando este último apresenta valores menores, representando o comportamento de países ainda em desenvolvimento. Por outro lado, tal crescimento desacelera gradualmente conforme o PIB per capita aumenta. Esse comportamento é característico de países com alto nível de desenvolvimento. Esse modelo representa, portanto, comportamento similar ao modelo do consumo elétrico per capita versus o PIB per capita apresentado anteriormente. Por fim, foi estimado um modelo de regressão

linear simples em que o consumo de energia residencial per capita é a variável dependente e o PIB per capita é a variável explicativa. Nesse cenário, o coeficiente de determinação é 0,7928, o que significa que o modelo estimado tem uma explicação menor do que a obtida por meio do modelo do consumo de energia elétrica comercial per capita versus o PIB industrial per capita e maior que a obtida através do modelo do consumo industrial per capita versus o PIB industrial per capita. Cabe, ainda, comentar que o consumo residencial per capita apresenta um crescimento mais acentuado em relação ao PIB per capita, quando este último apresenta valores menores, representando o comportamento de países ainda em desenvolvimento. No entanto, esse crescimento desacelera conforme o PIB per capita aumenta. Isso é característico de países com níveis mais elevados de desenvolvimento. Evidencia-se, portanto, que os setores da economia possuem comportamentos diferentes e reagem de forma distinta às mudanças na economia. Assim, a importância do estudo da relação entre o consumo de energia e o PIB ser feita de maneira separada para os distintos setores da economia é corroborada. Desta maneira, o presente trabalho seguirá com essa metodologia pelo resto do estudo, separando os dados para os setores residencial, industrial e comercial. A parcela da demanda que não se encaixa em nenhum desses setores é agrupada no setor intitulado “outros”. Além disso essa relação, entre consumo de energia e renda, deve variar de acordo com o nível de desenvolvimento de um país, de um grupo de países, ou seja a elasticidade renda do consumo ou influência da renda, ou da variação da renda, deve variar de acordo com a classificação de cada país quanto ao nível de atividade econômica.



Este trabalho tem como objetivo estimar o comportamento da evolução do consumo de energia elétrica de diferentes setores e países do mundo e a relação do mesmo com o nível de desenvolvimento econômico, dada pela elasticidade renda desse consumo. Desse modo, dado que o estudo é de âmbito global, optou-se por uma abordagem *top-down*, relacionando o consumo energético com o PIB. Esta metodologia foi escolhida por existirem dados de fontes confiáveis disponíveis para diversos países do mundo, o que não ocorreria com dados demasiadamente específicos e detalhados necessários para uma abordagem *bottom-up*. Além disso, por se tratar de uma análise de evolução ao longo dos anos, ou seja, uma visão de longo prazo, a abordagem macroeconômica é bastante adequada e a mais usualmente utilizada. Verificou-se a relação entre o consumo de energia elétrica e o PIB para dos países selecionados no período entre 1990 e 2014, através dois modelos estocásticos, a saber: modelo de regressão linear e modelo vetorial autoregressivo. A fim de tornar os dados mais facilmente comparáveis, foram utilizados valores per capita em todo o estudo.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma, a seção seguinte contempla a revisão bibliográfica, onde são apresentados, uma seleção de outros estudos que abordaram a mesma temática. A Seção 3 trata da abordagem metodológica e dos dados utilizados. Finalmente, a Seção 4 apresenta os resultados obtidos, junto a suas respectivas análises e por último, na Seção 5, estão colocadas as conclusões e comentários finais do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

A literatura empírica fornece evidências diversas e conflitantes em relação ao crescimento do consumo de energia e seus *drivers*. Esta discrepância nos resultados deve-se principalmente ao uso de diferentes métodos econométricos e períodos de tempo, além das variáveis específicas de cada país ou região, como por exemplo o clima, o desenvolvimento econômico e os padrões de consumo de energia.

Diante disso, vale destacar que Kraft e Kraft (1978) foram os primeiros a investigar a relação entre consumo de energia e crescimento econômico usando vários métodos econométricos para diferentes períodos de tempo. A princípio, sob uma perspectiva econômica, entende-se que a energia é um importante fator de produção. No entanto, evidências empíricas sugerem que o nexo de crescimento de energia é complicado. Nessa perspectiva, é interessante analisar diferentes estudos que apresentam resultados distintos sobre essa questão e entender os motivos que geram essas diferenças.

De acordo com Huang (2014), IEEE (2008) e Jamil e Ahmad (2011), o crescimento econômico impulsiona o crescimento da demanda de energia. Huang (2014) analisa os fatores-chave que levaram ao aumento da demanda global de energia nas últimas décadas, usando principalmente dados anuais entre 1980 e 2009 para uma amostra OECD de 24 países. Além da elasticidade de preço e de renda, que são tradicionalmente examinadas, a pesquisa analisa os efeitos causados por mudanças climáticas, demográficas, estruturais e tecnológicas na demanda de energia. Nessa perspectiva, por meio do uso da técnica de dados em painel, esta pesquisa evidenciou a presença de dependência de atraso espacial, além da existência de uma elasticidade de renda positiva, mas decrescente e uma elasticidade de preço negativa. Além disso, a análise evidenciou que a industrialização e a urbanização aumentam o uso de energia, enquanto o desenvolvimento de economias de serviço e inovações tecnológicas tendem a reduzir a demanda. Já o estudo de IEEE (2008) evidencia que, em média, a demanda por energia não aumenta em proporção direta aos aumentos de renda, mas sim proporcionalmente a renda per capita; tanto em nível, quanto em composição. Geralmente, quanto mais avançada a economia e quanto maior a renda per capita, maior a demanda por equipamentos que usam energia. Cabe ainda comentar que Jamil e Ahmad (2011) concluem que a demanda por eletricidade depende essencialmente da renda e do preço. Os estudiosos analisam a demanda de eletricidade no Paquistão no período entre 1961 e 2008, utilizando dados anuais agregados e setoriais para os grupos residencial, comercial, industrial e agrícola. Os resultados indicam que a demanda de eletricidade responde à atividade econômica real em níveis agregados e setoriais. A demanda se mostrou elástica em relação ao preço para todos os casos, exceto para o setor agrícola. A inelasticidade desse setor específico se dá devido à natureza altamente subsidiada da tarifa agrícola no Paquistão. A análise conclui ainda que as elasticidades de longo prazo são consistentemente superiores às de curto prazo. Estes resultados são interessantes do ponto de vista político, pois mostra que o preço da eletricidade pode ser usado como uma ferramenta eficiente para a conservação de energia.

Por outro lado, Lee (2005) conclui que o crescimento da demanda de energia impacta o crescimento econômico. O autor, investiga o co-movimento e a relação de causalidade entre o consumo de energia e o PIB em 18 países em desenvolvimento, utilizando dados do período entre 1975 a 2001. São utilizados testes para a raiz unitária do painel, cointegração do painel heterogêneo e painel baseado em modelos de correção de erros. Evidencia-se que no longo e no curto prazo as causalidades passam do consumo de energia para o PIB, mas não vice-versa. Este resultado indica que a conservação de energia pode prejudicar o crescimento econômico nos países em desenvolvimento, independentemente de ser transitória ou permanente.

Por fim, Belke, Dreger e de Haan (2010) e Magazzino (2014) evidenciam a existência de uma relação causal bidirecional entre a demanda de energia e o crescimento da economia. Belke, Dreger e de Haan (2010) examinam a relação de longo prazo entre o consumo de energia e o PIB, incluindo os preços da energia, para 25 países da OCDE de 1981 a 2007. A distinção entre fatores comuns e componentes idiossincráticos, usando a análise do componente principal, permite distinguir entre o desenvolvimento em um plano internacional e um nível nacional como drivers da relação de longo prazo. De fato, a cointegração entre os componentes comuns das variáveis subjacentes indicam que o desenvolvimento internacional domina a relação de longo prazo entre o consumo de energia e o PIB real. Além disso, os resultados sugerem que o consumo de energia é inelástico em termos de preços. Os testes de causalidade indicam a presença de uma relação causal bidirecional entre o consumo de energia e o crescimento econômico. Já Magazzino (2014), aplica metodologias de séries temporais

para examinar a relação causal entre a demanda de eletricidade, o PIB per capita e a força de trabalho na Itália entre 1970 e 2009. Os resultados obtidos indicam que existe uma relação de cointegração entre essas variáveis, com coeficientes estatisticamente significativos ao nível de 1%. Além disso, o estudo aponta um fluxo bidirecional de causalidade de Granger entre o PIB per capita e a demanda elétrica. O teste de cointegração multivariada indicou que a energia entrou significativamente no espaço de cointegração.

Percebe-se, portanto, a existência de evidências distintas e conflitantes em relação ao crescimento do consumo de energia e o crescimento econômico.

3. Abordagem Metodológica e Dados Utilizados

De acordo com Böhringer e Rutherford (2008), existem duas abordagens para previsão de demanda energética: *bottom-up* e *top-down*. A abordagem *bottom-up* é baseada na análise dos usos finais de eletricidade em cada setor da economia e dos equipamentos de transformação da energia em energia útil, uma abordagem mais associada aos modelos microeconômicos, com forte base de engenharia e estudo dos requisitos de energia de equipamentos e máquinas. Essa abordagem envolve modelos que, na maioria das vezes, negligenciam o impacto macroeconômico das políticas energéticas. Enquanto a abordagem *top-down*, por outro lado, procura correlacionar o consumo de energia elétrica com variáveis de cenário, como o PIB e a população, e possivelmente com variáveis setoriais. Tem como principal enfoque as interações entre economia e energia, sob uma perspectiva macroeconômica, que considera distorções iniciais do mercado, externalidades pecuniárias e efeitos de renda. Dessa forma, sua principal limitação é que, usualmente, não incorpora detalhes sobre as possibilidades tecnológicas atuais e futuras, que poderiam ser relevantes para uma melhor avaliação. As duas visões são válidas e complementares, sendo necessário optar pela mais adequada aos objetivos, ou adotar um modelo que incorpore ambas. Este trabalho está claramente alinhado com a abordagem *top-down*.

Para estimativa dos coeficientes de elasticidade renda do consumo nos setores residencial, industrial, comercial e outros foram estimados por intermédio de um modelo de regressão linear simples as variáveis estão transformadas pelo logaritmo de cada uma das variáveis em questão consumo de energia per capita e renda per capita dado pelo PIB. Onde o PIB representa a variável independente e o consumo de energia é a variável dependente e supõem-se que os parâmetros consistem em magnitudes que permanecem constantes no âmbito de um fenômeno concreto. Por fim, o termo aleatório engloba fatores irrelevantes, não incorporados ao modelo devido à impossibilidade de se observar, ou por seu desconhecimento. O termo aleatório produz um desvio ou erro em relação ao que a variável dependente deveria ser. O modelo descrito acima foi estimado pelo método dos mínimos quadrados ordinários. O método de estimação está descrito nos principais manuais de econometria tais como Gujarati e Porter (2011) ou Wooldridge (2014), entre outros, onde se pode recorrer para um maior aprofundamento do método aqui utilizado. Dadas as propriedades das estimativas dos mínimos quadrados e os pressupostos que garantem serem os estimadores dos mínimos quadrados para os parâmetros do modelo de regressão os melhores estimadores lineares não tendenciosos segundo Gauss e Markov. Um desses parâmetros é o coeficiente de elasticidade renda do consumo objeto deste trabalho.

Na estimação desses modelos alguns importantes pressupostos tais como normalidade dos termos estocásticos e estacionariedade são vistos e destacados, assim como a hipótese de cointegração entre as duas variáveis aqui utilizadas. Para verificação da normalidade o teste utilizado foi o de Jarque-Bera, o qual utiliza os parâmetros de assimetria e curtose para checar se determinada distribuição é normal. Para maior conhecimento do teste em questão pode-se recorrer a Gujarati e Porter (2011). A estacionariedade e a cointegração são fatores essenciais para a escolha do modelo mais adequado. Apesar de o presente trabalho não visar a realização de projeções, mas sim estudar a relação entre PIB e a demanda de energia elétrica, o comportamento do consumo dessa energia ao redor do mundo e o desempenho dos modelos mais comumente utilizados, a análise dos resultados destes testes são para a compreensão do comportamento das séries de consumo e para a análise comparativa entre os modelos e escolha, ou determinação, dos mais adequados. Para garantir a confiabilidade dos modelos vetoriais autoregressivos, VAR e VEC, a realização do teste de estacionariedade é essencial, pois ambos assumem essa premissa como verdadeira. Um processo estacionário tem como principal característica a constância da média, da variância e da estrutura de

autocorrelação, isto é, estes parâmetros não mudam no decorrer do tempo. De acordo com Gujarati e Porter (2011), a não-estacionariedade comumente causa regressões espúrias, mesmo em amostras grandes. O teste de estacionariedade utilizado no estudo em questão foi o Dickey-Fuller Aumentado (ADF). É importante destacar que a ausência de estacionariedade pode ser facilmente corrigida através de processos de diferenciação da ou das variáveis em questão. Para maior detalhamento do teste ADF pode-se recorrer a Gujarati e Porter (2011).

Outro fator bastante relevante para os modelos analisados é a cointegração. A cointegração em séries temporais é extremamente importante para a avaliação de séries econômicas, pois permite determinar as relações entre as séries envolvidas. A aceitação da hipótese de cointegração tem implicação direta na construção de modelos de regressão, uma vez que deve-se utilizar um mecanismo de correção de erros no modelo, já que as variáveis compartilham das mesmas propriedades estocásticas no longo prazo. Dessa forma, a presença da cointegração torna o modelo VEC mais adequado, como será abordado nos próximos tópicos. Para verificar a existência de cointegração entre as séries analisadas utilizou-se o teste de Johansen, amplamente utilizado para este fim ou o teste ADF, o mesmo está detalhado em Gujarati e Porter (2011).

Os modelos vetoriais autorregressivos, modelos VAR, ou modelos VEC, que vem a ser modelos VAR com mecanismos de correção de erros, dados pelo cointegração entre as variáveis em questão, buscam encontrar padrões e relações entre as variáveis envolvidas, no caso o consumo per capita de energia, dos setores residencial, comercial, industrial e outros, e a renda, dada pelo PIB per capita. É definido como autorregressivo pois correlaciona os valores passados defasados das variáveis analisadas com o valor presente de cada variável. No presente trabalho, a defasagem, ou lag (p), foi definida de acordo com o critério de Akaike. Os modelos VAR e VEC podem ser melhor detalhados em Gujarati e Porter (2011) ou Wooldridge (2014).

É importante destacar que em toda aplicação do modelo VAR haverá uma equação-resultado para cada uma das variáveis analisadas. No caso estudado haverá uma equação para o PIB e uma para o consumo. No entanto, como o interesse da análise é apenas na influência do PIB no consumo, serão apresentados apenas os resultados referentes a este caso. Além disso, a utilização de modelos VAR está condicionada a premissa básica de que as séries temporais analisadas são estacionárias, caso contrário, a regressão será espúria. Ao observar que a grande maioria das séries só era estacionária em *lag 2*, utilizou-se como dados de entrada para as estimativas as diferenças de primeira ordem em *lag 2*. Essas diferenças em *lag 2* suavizam as séries, de forma a evitar que picos pontuais ou com impacto “atrasado” causem distorções no modelo. Como observado, o modelo VEC é basicamente um modelo VAR nas primeiras diferenças acrescido de uma componente de correção de erros. Esta componente de correção de erros indica a velocidade de ajuste de qualquer desequilíbrio de curto prazo em direção a um estado de equilíbrio de longo prazo. Ou seja, este modelo, ao mesmo tempo que permite as dinâmicas de curto prazo, restringe o comportamento de longo prazo das variáveis, de forma que elas converjam para as relações de cointegração, a qual representa o equilíbrio de longo prazo. O que permite associar as duas variáveis utilizadas neste trabalho.

Os dados utilizados para a realização do presente estudos foram: consumo elétrico setorial, PIB, PIBs setoriais e população. A fonte utilizada para coleta dos dados de consumo de energia elétrica para os distintos setores da economia foi a *International Energy Agency* (IEA). A IEA é uma organização autônoma sediada em Paris e ligada a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), cujo objetivo é garantir energia confiável, acessível e limpa para seus 29 países membros. Desse modo, devido a confiabilidade e abrangência dos seus dados, foi a fonte eleita para os dados de consumo de energia elétrica. Em seu *website* é possível encontrar dados anuais de consumo elétrico para os setores residencial, comercial, industrial e “outros” para diversos países do mundo e para o período entre os anos de 1990 e 2014. Os dados de receita, representada pelo PIB, e de população foram obtidos através do *website* do Banco Mundial. Os dados anuais foram atualizados no início de 2017 e cobrem o período de 1990 a 2014, para os 143 países da amostra.

Com os dados compilados, foram calculados os consumos e PIBs per capita anuais para cada setor e cada país analisados. Os dados per capita são mais comparáveis e consideram implicitamente uma variável importante no consumo energético: o tamanho da população. A utilização dos dados gerais, não per capita, dificultaria possíveis comparações entre países com PIBs ou consumos muito diferentes entre si. Além disso, o PIB per capita usualmente está mais relacionado com o nível de desenvolvimento, social e econômico, de um país do que o seu PIB. Ademais, nas análises de

desempenho dos diferentes modelos, foram utilizados os logaritmos dos dados. O modelo log-log é útil, pois a conversão logarítmica promove a transformação um modelo não-linear em linear, isto é, ela “lineariza” os parâmetros, de forma a facilitar a análise e comparação dos modelos, alvo deste estudo, e permite a determinação direta das elasticidades associadas aos modelos

Analisando as informações, referentes aos setores residencial, comercial e industrial é possível constatar que a normalidade não pode ser aceita a 10% para a maior parte dos dados, entre 80% e 90% dos países de cada setor. No entanto, por falta de um modelo mais adequado, a normalidade será assumida para a aplicação dos modelos. Quanto a estacionariedade, esta não pode ser rejeitada, considerando uma significância de 10%, para mais de 50% dos países em todos os setores. O setor que apresentou maior percentual de países com estacionariedade foi o industrial, com aproximadamente 72%. Por fim, checkou-se que a cointegração não pode ser rejeitada a 10% para 7% dos países no setor outros, 9% no industrial, 22,5% no residencial e 36% no comercial.

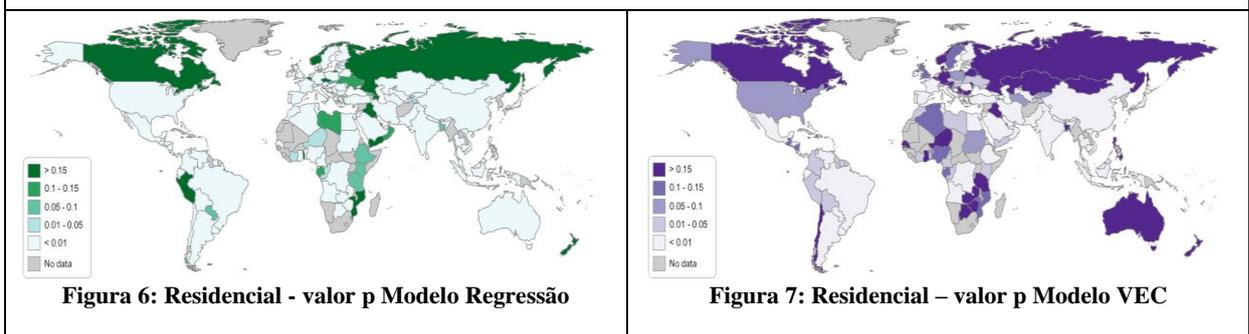
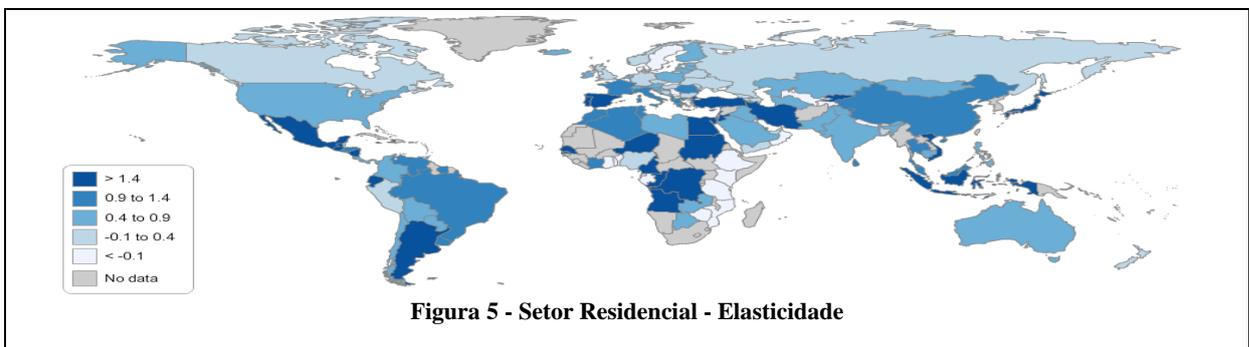
4. Análise dos Resultados Obtidos

Foram realizadas duas abordagens diferentes para comparação: resultados individuais para todos os países e resultados para grupos de países. Aqui, serão apresentados os resultados obtidos para os modelos de regressão linear e modelos vetoriais auto regressivos através de mapas. Serão destacados a elasticidade da renda do modelo de regressão linear, os coeficientes do vetor de correção de erro e dos valores defasados de energia para o modelo VEC e os respectivos p valores. Deve-se observar que os resultados para o modelo VAR não serão exibidos, uma vez que foram muito similares aos do modelo VEC.

Como hipótese inicial imaginou-se que países com nível de desenvolvimento e econômico parecidos apresentariam resultados similares. Uma vez que, como mencionado anteriormente, existe uma forte relação entre o PIB e o consumo energético, e diversos estudos apontam que, à medida em que um país se desenvolve economicamente, a tendência é que sua elasticidade-renda diminua. Assim, supôs-se que o consumo de energia dos locais que estão em um mesmo momento econômico reagiria da mesma forma às mudanças econômicas. A fim de verificar essa hipótese e exibir os resultados de forma ilustrativa serão apresentados mapas para cada setor.

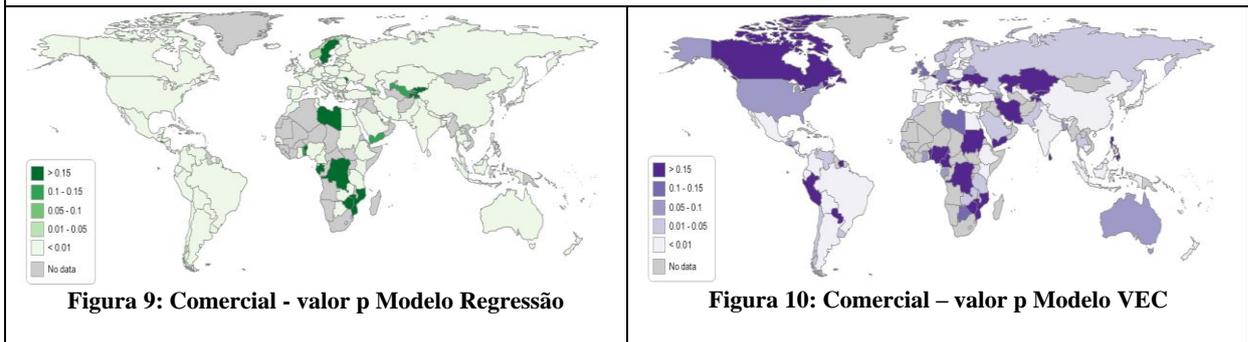
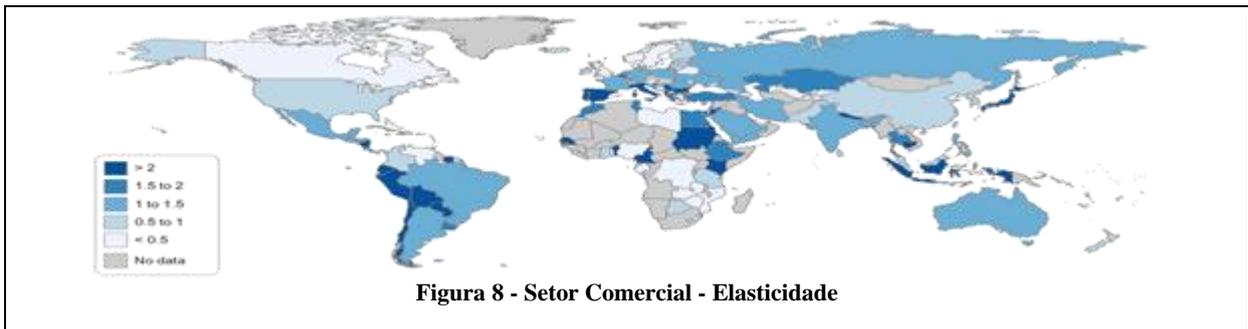
Na Figura 5 o mapa apresentado mostra os resultados do coeficiente de elasticidade para o consumo do setor residencial, onde se observam valores da elasticidade renda do consumo de energia residencial entre -0,1 e 0,4 para diversos países da Europa e para o Canadá. Valores considerados baixos, uma vez que se esperava um coeficiente próximo da unidade para países em desenvolvimento e mais baixos para países desenvolvidos, indicando que para estes países o PIB não é tão determinante no consumo elétrico residencial. Além disso, considerando a localização dos países que obtiveram este resultado difere do esperado. Pois a grande maioria desses países está bem ao norte do planeta, regiões usualmente mais frias, o que possivelmente é um fator mais relevante para o consumo de energia elétrica residencial do que o desenvolvimento econômico nessas regiões. Cabe observar que a dispersão dos coeficientes de elasticidade é alta em especial entre grupos de países e blocos econômicos não permitindo se observar similaridades, o que fica patente com nos resultados da América Latina, que apresenta todas as faixas da elasticidade renda do consumo de energia elétrica no setor residencial. O mesmo acontece na África. Embora com valores mais baixos o mesma inferência pode ser feita para a Europa. No que se refere a comportamentos homogêneos, ou a situações de similaridades, é possível notar que para o Brasil e a China, países do bloco dos BRICS, as elasticidades estão próximas e com valores relativamente altos, como se esperado para países em desenvolvimento. Austrália, Estados Unidos da América, Chile e países da Europa, por sua vez, também correspondem às expectativas ao apresentar coeficientes de elasticidade renda mais baixos, como se esperado para países mais desenvolvidos. Cabe destacar que o Chile, apesar de não ser considerado um país desenvolvido, é o país da América Latina com comportamento mais similar ao dos países desenvolvidos. Deve se observar que as supracitadas inferências referentes as elasticidades renda do consumo da energia elétrica residencial estão condicionadas ao nível de significância, ou a significância estatística, da estimativa do modelo de regressão linear log-log estimado para explicar o consumo de energia elétrica residencial per capita através do PIB per capita. Deste modo, o mapa apresentado na Figura 5 deve ser analisado em conjunto com o teste F do modelo, o qual representa a sua significância, e pode ser representado pelo resultado do teste F da análise de variância ou pelo respectivo valor p, cujo mapa com os resultados para os países está apresentado na Figura 6 adiante.

De acordo com os p valores obtidos, é possível afirmar que as regressões para a grande maioria dos países são significativas, comprovando a relação entre PIB e consumo, de forma que é possível utilizá-las para as inferências relacionadas ao coeficiente de elasticidade. Todavia, para a Rússia, o Canadá e alguns países europeus, os quais apresentaram valores muito baixos para a elasticidade e diferentes do esperado, os p valores da Figura 6 indicam que os modelos de regressão não devem ser estatisticamente significativo. Além dos resultados descritos acima, na Figura 7 são apresentados os p valores para o teste F do modelo VEC. A primeira constatação a partir do mapa da Figura 7 é que os p valores são mais altos, de forma geral, o que indica que este modelo não deve ser apresentar significância em um número maior de países do que acontece com o modelo de regressão linear. O modelo pode ser considerado significativo a 10% para aproximadamente metade dos países analisados, apresentando p valores abaixo de 1% no Brasil, Argentina, México, Índia, China, entre outros. Fazendo uma análise comparativa, observa-se que o modelo de regressão linear apresentou p valor para o teste F inferior ao do modelo VEC para 78% dos países analisados, indicando maior significância estatística desse modelo.



A Figura 8 apresenta um mapa com os resultados dos coeficientes de elasticidade renda do consumo de energia elétrica no setor comercial. Os valores inferiores a 0,5 para elasticidade para de alguns países da Europa e para o Canadá o que indica a pequena relevância do PIB comercial no consumo elétrico do setor comercial. Resultado diferente do esperado uma vez ser esse um indicador econômico específico e talvez mais adequado para explicar esse consumo de energia. No consumo comercial a dispersão dos coeficientes de elasticidades também é alta. Na América Latina, podem ser observados dois grupos de países com intervalos para os coeficientes de elasticidade bastante similares, a saber, primeiro grupo formado pelo Brasil, Argentina, México e América Central, com valores no intervalo [1,0; 1,4] e um segundo grupo formado pelo Equador, Peru, Bolívia, Chile e Paraguai, com valores mais elevados, sempre acima de 2,0. Os demais países não se encaixam em nenhum desses grupos. Na Europa o comportamento dos países é mais variado, mas ainda é possível notar grupos com comportamento similar: Portugal, Espanha, Bélgica, Itália, Albânia, Bulgária e Turquia apresentam valores no intervalo [2,0; 2,5]; França, Croácia, Grécia, Holanda, Alemanha, Polônia, Rússia, Islândia, Estônia, Romênia e Ucrânia possuem elasticidades bastante próximas da unidade; um terceiro grupo apresenta valores próximos a 0,8 e um quarto grupo apresentou os coeficientes no intervalo [0,4; 0,6]. Os demais países europeus apresentam valores mais extremos e não se encaixam em nenhum dos grupos identificados. Na África os países apresentam resultados muito dispersos ou com alta variabilidade. Como pode ser visto na Figura 9, De acordo com os p valores obtidos nos testes de significância dos modelos de regressão linear utilizados nas inferências

das elasticidades é possível inferir serem esses modelos estatisticamente significativos em sua maioria com p valores próximos de 1%, exceto para o modelo da Suécia e de alguns países na Ásia e na África. Diferente do ocorrido no setor residencial, algumas elasticidades muito pequenas se mostraram significativas. Isso demonstra que o PIB comercial de fato influencia no consumo elétrico do setor mas não causa grande impacto no consumo do setor. O mapa apresentado na Figura 10 apresenta os p valores dos testes F de significância dos modelos VEC, onde pode-se observar que o Canadá, Peru, Paraguai e alguns países da África, Ásia e Europa os valores estão acima de 15% indicando não serem esses modelos significativos. Por outro lado, apresentam p valores abaixo de 1% para o Brasil, Argentina, Bolívia, México, Índia, China, para a maioria dos países da América Central, diversos países da Europa, entre outros. Fazendo uma análise comparativa, observa-se que o modelo de regressão linear apresentou p valor para o teste F inferior ao do modelo VEC para 87% dos países analisados, indicando maior significância estatística.



O mapa apresentado na Figura 11, mostra os resultados de elasticidade renda do consumo de energia elétrica do setor industrial, destacando os baixos valores -- inferiores a 0,2 -- para a Austrália, Estados Unidos da América e alguns países da Europa e da África. O que indica que para esses países o PIB industrial não é tão relevante no consumo elétrico do setor, resultado diferente do esperado uma vez se tratar de um indicador econômico avançado do setor. Outra observação que se sobressai é a variabilidade dos coeficientes de elasticidades, em todos os continentes e entre todos os grupos de países, sejam desenvolvidos ou não. De acordo o mapa apresentado na Figura 12 pode-se inferir que as estimativas dos modelos de regressão são estatisticamente significativos, uma vez que os p valores dos respectivos testes de significância estatística estão abaixo de 5%. Cabe destacar que para o Paraguai, Austrália, Estados Unidos e alguns países da Europa e da África, os modelos de regressão linear se mostraram espúrios. Assim como acontece para o consumo do setor residencial, praticamente todos os países que apresentaram elasticidades demasiadamente baixas obtiveram regressões não-significativas. Ou seja, de acordo com esses modelos de regressão, não há relação significativa entre o PIB industrial do país no seu consumo elétrico do setor diferente do que diz a teoria econômica. Na Figura 13 são apresentados os p valores para o teste F dos modelos VEC, onde pode-se observar valores elevados para muitos países, incluindo toda a América do Norte, Austrália e diversos países da América Latina, Ásia, Europa e África. Com isso, rejeita-se a hipótese da significância dos modelos VEC para esses países. O mesmo não ocorre para a Rússia, Índia, China, Chile, Argentina, Bolívia, Venezuela, para a maioria dos países da Ásia, entre outros. Comparando-se a significância obtida com cada um dos modelos estocásticos envolvendo o consumo industrial de energia elétrica e o PIB industrial através do

p valor, pode-se observar que em 76% dos países o modelo de regressão linear apresentou p valor para o teste F inferior ao do modelo VEC, indicando maior número de modelos estocásticos significativos.

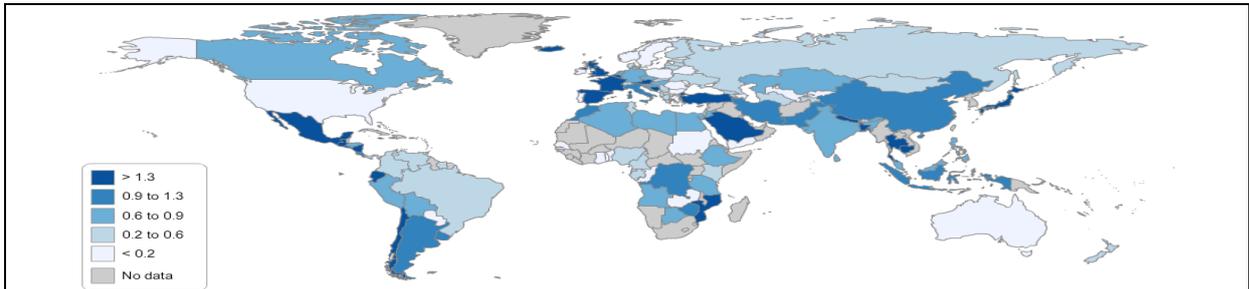


Figura 11 - Setor Industrial - Elasticidade

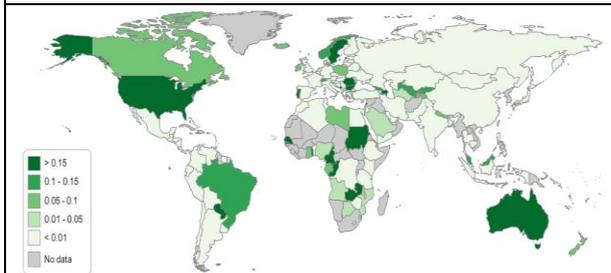


Figura 12: Industrial - valor p Modelo Regressão

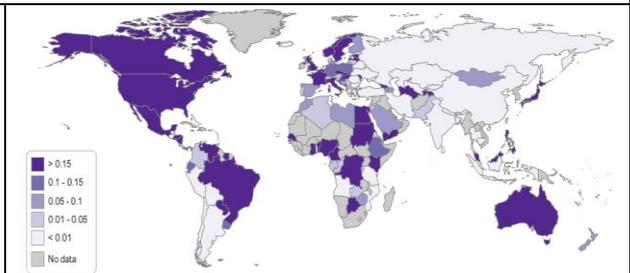


Figura 13: Industrial – valor p Modelo VEC

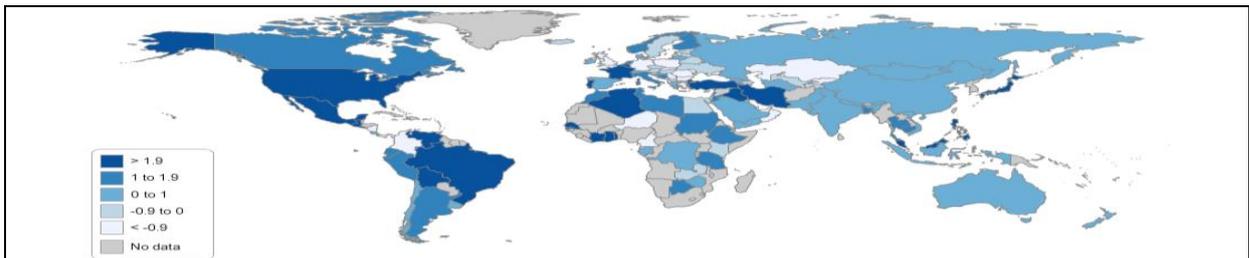


Figura 14: Setor Outros - Elasticidade

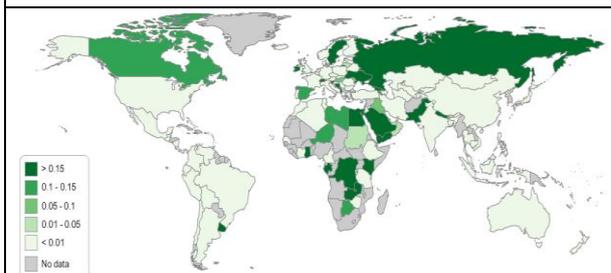


Figura 15: Setor Outros - valor p Modelo Regressão

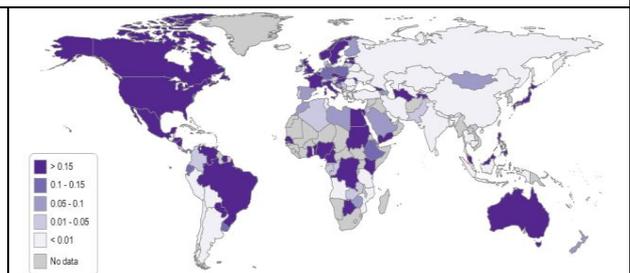


Figura 16: Setor Outros – valor p Modelo VEC

O mapa apresentado na Figura 14 mostra os resultados de elasticidade da renda para o setor outros, setor que agrupa todo o consumo que não se classifica em nenhum dos outros setores da economia estudados, isto é, não pertence ao setor residencial, comercial ou industrial. Por agrupar consumos de origens muito diversas, como pesca e agricultura, a expectativa é que ele apresente os resultados incoerentes, como por exemplo, p valores do teste F mais altos e elasticidades mais dispersas. Deve-se observar a amplitude do intervalo dos valores dos coeficientes de elasticidade da renda que estão no intervalo $[-0,9; 1,9]$, com significância estatística em todas as classes ou subintervalos. Com isto, não se pode afirmar a hipótese anterior de que este é o grupo menos “comportado”. Um fato interessante é que muitos países na Europa apresentaram coeficientes de elasticidade renda negativos, indicando que o consumo nesta categoria aumenta quando o PIB cai, e

vice-versa. Cabe observar que a Oceania e Ásia, em sua grande maioria, apresenta valores de elasticidades no intervalo $[0,0; 1,0]$. O continente americano, por sua vez, é o que apresenta os valores mais elevados de elasticidade. Enquanto a África é o continente com maior dispersão dentre os coeficientes de elasticidade renda. Pode-se notar que neste conjunto de outros setores parece existir uma certa similaridade de elasticidade renda entre países próximos, ou de uma mesma região ou continente. Possivelmente isso se deve a componentes semelhantes no agregado outros. Dada a importância da significância do modelo, o mapa apresentado na Figura 15 mostra os resultados de p valores dos testes de significância estatística dos modelos de consumo estimados para os países estudados. De acordo com os p valores obtidos, é possível afirmar que as regressões para grande parte dos países são significativas a 1%. Contudo, para a Rússia e alguns países da Europa, África e Ásia, a regressão se demonstrou espúria. Por fim, na Figura 16 são apresentados os p valores para o teste F do modelo VEC. A primeira constatação a partir do mapa é que os p valores são bastante altos para muitos países, especialmente na Europa, África e América Latina. Isto indica que o modelo não apresenta significância estatística para esses países, com pelo menos 15% de significância. Por outro lado, o mapa da Figura 16 apresenta p valores abaixo de 1% para a Rússia, Brasil, Austrália, Canadá, entre outros. Fazendo uma análise comparativa entre os modelos estimados para setor outros, observa-se que o modelo de regressão linear apresentou p valor para o teste F inferior ao do modelo VEC para 75% dos países analisados.

Uma nova tendência de integração energética tem se consolidado em várias partes do mundo, como forma de otimizar empreendimentos de geração existentes e, com sorte, minimizar a necessidade de expansão de novas usinas que agridam o meio ambiente, visando atender à crescente demanda dos países que venham a participar dessa integração. Como noticiado no *website* do jornal O Estado de São Paulo (2011), esse movimento já existe entre Canadá e EUA, Alemanha e Áustria, Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca e desenvolve-se na União Europeia, na África Austral e no Mercosul. Deve-se destacar que as experiências existentes no Mercosul são as Hidrelétricas de Itaipu, do Brasil e do Paraguai, Yacireta, da Argentina e do Paraguai, e Salto Grande, da Argentina e do Uruguai. Além disso, existe o gasoduto da Argentina com Brasil, Chile e Uruguai e o da Bolívia com Argentina, Brasil e Chile. Nessa perspectiva, dada a crescente tendência de integração energética, é possível afirmar que um próximo passo seria um planejamento em conjunto para países de uma mesma região. No cenário atual a maioria das interconexões existentes apenas permitem trocas energéticas em momentos em que algum país apresente excedente enquanto outros estão em déficit. Diante disso, o planejamento em conjunto potencializaria inúmeros benefícios, como a otimização da quantidade de plantas a serem instaladas, gerando menos impactos ao meio-ambiente. Por outro lado, é importante comentar que, apesar dos benefícios, a implementação desse tipo de integração energética encontra diversas barreiras, especialmente políticas. Como exemplo, é possível citar o caso da Bolívia, a qual nacionalizou as instalações da Petrobrás em seu território e diminuiu o envio de gás natural para o Brasil e a Argentina. Diante disso, dois blocos que possuem grande potencial para integração são a Europa e a América Latina.

5. Conclusão e Comentários Finais

Este trabalho teve como objetivo determinar as elasticidades renda do consumo residencial, comercial, industrial e de outros setores de 143 países ao redor do mundo. Assim pode-se afirmar que o objetivo foi atingido. Uma vez que além das estimativas dos coeficientes de elasticidades foram verificadas as significâncias das estimativas e a relação entre as variáveis por intermédio de modelos autoregressivos, VAR e VEC.

Ao analisar a relação entre o consumo de energia elétrica per capita e o PIB per capita de 143 países ao longo de 24 anos, percebe-se uma tendência de desaceleração do crescimento do consumo e, em alguns casos, ocorrendo até mesmo um decréscimo da demanda energética por habitante. Deve-se destacar que se esperava que a relação entre o consumo e o PIB fosse parecida para países com o nível similar de desenvolvimento econômico e/ou localização próxima. No entanto, não foi possível encontrar padrões, que fizessem sentido a priori, ao analisar os mapas com a representação gráfica dos resultados e os mapas detalhados para os países da Europa e da América Latina. O estudo indica dessa forma, que esta hipótese, frequentemente utilizada nas previsões de demanda para comparar a situação do país com a de regiões próximas e com nível de desenvolvimento similar, não pode ser comprovada.

Apesar das diferenças e falta de um padrão observadas, os resultados obtidos para as análises agregadas foram satisfatórios, obtendo sempre pelo menos um modelo estatisticamente significativo, com p valores baixos. Isso indica que o planejamento agregado faz sentido e pode potencializar os benefícios da integração energética. Isso ocorreria por meio da redução da necessidade de nova capacidade de geração, ao explorar os distintos comportamentos individuais, que quando agregados tendem a ser bem-comportados.

Outro ponto de relevância observado foi a diferença entre a elasticidade renda do consumo de energia obtida na análise dos países desenvolvidos, mais especificamente da Europa, e dos em desenvolvimento, representados na análise detalhada pela América Latina. A diferença foi ainda maior nos setores residencial e industrial, nos quais a elasticidade agregada da Europa foi praticamente um terço da encontrada para a América Latina. Esse comportamento já era de certa forma esperado, dada a tendência de aumento da eficiência energética e consumo consciente, as quais vem incentivando a desaceleração do crescimento e até redução da demanda, de forma que o mesmo varie em menor intensidade que o PIB. Por outro lado, nos países em desenvolvimento estas tendências ainda são pouco relevantes e não impactam tanto a relação entre PIB e consumo, de forma que as variações na economia gerem flutuações ainda maiores na demanda elétrica. Além disso, cabe notar que o setor designado como “outros” na Europa parece ter comportamento bastante divergente de um país para o outro, apresentando modelos de regressão linear não significativos, mas sendo bem representado pelo modelo VEC. Na América Latina, essa categoria parece ser mais similar entre os países, obtendo uma regressão significativa a menos de 0,001% e apresentando uma elasticidade elevada, superior a 2.

Por fim, para futuros estudos sobre o tema podem ser verificadas as performances de modelos de previsão de consumo e se acrescentar nos modelos aqui utilizados novas variáveis explicativas, como por exemplo a tarifa elétrica, assim como se utilizar um período de análise mais extenso, uma vez que o tamanho da amostra utilizado compromete a robustez dos resultados aqui obtidos. Seria interessante, ainda, realizar um estudo mais aprofundado da correlação entre os distintos setores de consumo e da variabilidade das previsões de longo prazo, testando-se os pressupostos básicos de análise de regressão e utilizando-se modelos heterocedásticos, se necessários. Além disso, outros métodos de inferência estatística devem ser considerados para que talvez se obtenha resultados mais robustos.

Referências

- Belke, A., Dreger, C., E DE HAAN, F. (2010) Energy Consumption and Economic Growth - New Insights into the Cointegration Relationship. *Ruhr Economic Papers*, v. 190.
- Böhringer, C., Rutherford, T. (2008) Combining bottom-up e top-down. *Elsevier*, v. 30, pp. 574–596.
- Castro, N. J., Brandão, R. (2009) A Crise Econômica-Financeira e os Impactos no Setor Elétrico Brasileiro. Disponível em: <<http://www.gesel.ie.ufrj.br/>>. Acesso em: 13/08/2017.
- O Estado de São Paulo (2011) Integração energética no Mercosul. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,integracao-energetica-no-mercosul-imp-,684334>>. Acesso em: 27/11/2017.
- Finkler, A., Finkler, D., Castro, J. (2016) Relação do crescimento econômico e consumo de energia elétrica. *Seminário de Iniciação Científica da UNIJUÍ, Ijuí, Rio Grande do SUL, Brasil*.
- Gujarati, D., Porter, D. (2011) *Basic Econometric*. 4 ed. New York, The McGraw–Hill Companies.
- Wooldridge, J. (2014) Introduction to Econometrics: EMEA Edition, 1st Edition.
- Huang, Y. (2014) Drivers of rising global energy demand: The importance of spatial lag e error dependence. *Elsevier*, v. 76, pp. 254–263.
- IEEE, 2008, "World Energy Consumption".
- Jamil, F., Ahmad, E. (2011) Income e price elasticities of electricity demand: Aggregate e sector-wise analyses. *Elsevier*, v. 39, pp. 5519–5527.
- Kraft, J., Kraft, A. (1978) On the Relationship between Energy e GNP. *Journal of Energy Development*, v. 3, pp. 401–403.
- Lee, C. C. (2005) Energy consumption e GDP in developing countries: A cointegrated panel analysis. *Energy Economics*, v. 27, pp. 415–427.
- Magazzino, C. (2014) Electricity demand, GDP e employment: Evidence from Italy. *Frontiers in Energy*, v. 8, pp. 31–40.