

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

CARLOS EDUARDO BIASUZ

**UM ESTUDO SOBRE O MERCADO DE URÂNIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
NUCLEAR E O IMPACTO NOS ATIVOS FINANCEIROS DE URÂNIO**

**CAXIAS DO SUL
2020**

CARLOS EDUARDO BIASUZ

**UM ESTUDO SOBRE O MERCADO DE URÂNIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
NUCLEAR E O IMPACTO NOS ATIVOS FINANCEIROS DE URÂNIO**

Monografia apresentada como requisito obrigatório para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências Econômicas na Universidade de Caxias do Sul.

Sob orientação do Professor Me. Mosar Leandro Ness.

CAXIAS DO SUL

2020

UM ESTUDO SOBRE O MERCADO DE URÂNIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E O IMPACTO NOS ATIVOS FINANCEIROS DE URÂNIO

Aprovado em: ____/____/____

Prof^a. Ma. Tatiana Silva Fontoura de Barcellos Giacobbo
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo econométrico para analisar e avaliar o impacto de choques exógenos no preço da variável dependente. Por meio de cinco séries históricas de preço, sendo quatro *commodities* e um estoque de capital, foi reproduzido a função impulso-resposta sobre o preço de urânio. O modelo econométrico selecionado foi o vetor autorregressivo. Este, por meio da defasagem das variáveis escolhidas e da interdependência entre estas, permite chegar ao resultado da função impulso-resposta. Assim, permanece o escopo estatístico do trabalho, ou seja, identificar qual dos intervalos possui maior influência na determinação do preço de urânio após um choque exógeno sobre o mesmo. Dessa forma, conclui-se que a energia elétrica possui maior impacto amplitudinal no preço do urânio – sendo, a sua variabilidade. O petróleo é a variável de maior resposta do choque no tempo, seguido pelas variáveis de carvão, gás natural veicular e urânio.

Palavras-chave: Urânio. Nuclear. Sustentabilidade. VAR. Impulso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Molécula de urânio.....	25
Figura 2 – Fissão nuclear.....	26
Figura 3 – <i>The UN's Sustainable Development Goals</i>	28
Figura 4 – <i>HDI and annual energy consumption per capita, 2017</i>	29
Figura 5 – <i>Comparing the economics of different forms of electricity generation</i>	31
Figura 6 – Produção e demanda de urânio	32
Figura 7 – <i>World uranium production and reactor requirements</i>	33
Figura 8 – Gasto de construção e manutenção de um reator nuclear	34
Figura 9 – Gráfico de série temporal do preço de urânio em USD desde 10/2007	39
Figura 10 – Gráfico de série temporal do preço de petróleo em USD desde 10/2007 ...	39
Figura 11 – Gráfico de série temporal do preço do carvão em USD desde 10/2007	40
Figura 12 – Gráfico de série temporal do preço do GNV em USD desde 10/2007	41
Figura 13 – Gráfico de série temporal do preço da energia elétrica em USD desde 10/2007.....	41
Figura 14 – Gráfico de raízes inversas do modelo VAR.....	48
Figura 15 – Resposta do preço de urânio a um choque de urânio	49
Figura 16 – Resposta do preço de urânio a um choque de petróleo	50
Figura 17 – Resposta do preço de urânio a um choque de carvão.....	51
Figura 18 – Resposta do preço de urânio a um choque de GNV	51
Figura 19 – Resposta do preço de urânio a um choque de energia elétrica	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teste de ADF.....	42
Tabela 2 –Teste de KPSS	43
Tabela 3 – Regressão de cointegração	44
Tabela 4 – Seleção de defasagens VAR	45
Tabela 5 – Teste para maior defasagem VAR	46
Tabela 6 – Equação 01:d_i_Petróleo	46
Tabela 7 – Equação 02: d_i_Carvão	47
Tabela 8 – Equação 03: d_i_GNV.....	47
Tabela 9 – Equação 04: d_i_EE.....	47
Tabela 10 – Equação 05: d_i_Urânio	48
Tabela 11 – Decomposição da variância para o preço do urânio	49

LISTA DE SIGLAS

ADF	Dickey-Fuller Aumentado
AIC	Critério de Akaike
BIC	Critério Bayesiano de Schwarz
CO ₂	Gás carbônico
EE	Energia elétrica
EROI	<i>Energy Return on Investment</i>
EUA	Estados Unidos da América
GNV	Gás Natural Veicular
HQC	Critério Hannan-Quinn
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IPCC	Painel Intergovernamental da Mudança Climática das Nações Unidas
ISL	<i>In Situ Leach</i>
KPSS	Kwiatkowski, Phillips, Schmidt e Shin
LCOE	Custo Nivelado de Energia Elétrica
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PV	Presente valor
VAR	Vetor autorregressivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	10
1.2	DEFINIÇÃO DAS HIPÓTESES	11
1.2.1	Hipótese principal	11
1.2.2	Hipóteses secundárias	11
1.3	JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA	12
1.4	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS	12
1.4.1	Objetivo geral	12
1.4.2	Objetivos específicos	12
1.5	METODOLOGIA	13
2	TEORIA DE MERCADO.....	14
2.1	ESTRUTURAS DE MERCADO	14
2.1.1	Competição monopolística	14
2.1.2	Concorrência perfeita	16
2.2	OLIGOPÓLIO	17
2.2.1	Modelo de Cournot	18
2.2.2	Modelo de Stackelberg.....	18
2.2.3	Modelo de Bertrand	19
2.2.4	Cartel.....	20
2.3	ECONOMIA AMBIENTAL	21
2.3.1	Economia ambiental neoclássica.....	21
2.3.2	Economia ecológica	22
2.3.3	Economia dos recursos naturais	23
3	O QUE É URÂNIO?	25
3.1	DEMANDA DE URÂNIO	27
3.1.1	Desenvolvimento sustentável.....	27
3.1.2	Mais energia e menos emissões	29

3.1.3	O pilar econômico	30
3.2	OFERTA DE URÂNIO	31
3.2.1	Mineração de urânio	32
3.2.2	Retorno do investimento em energia	33
3.3	ASPECTOS PECULIARES DA DEMANDA E OFERTA DE URÂNIO	34
3.3.1	Inelasticidade do preço de urânio	35
3.3.2	Mercado de longo prazo x mercado spot	35
3.3.3	<i>Underfeeding</i>	36
4	UM ESTUDO SOBRE O MERCADO DE URÂNIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E O IMPACTO NOS ATIVOS FINANCEIROS DE URÂNIO	38
4.1	O QUE É MODELO VAR?	38
4.1.1	Aplicação do modelo VAR	38
4.1.2	Teste de raiz unitária	42
4.1.3	Teste de cointegração	44
4.1.4	Seleção de defasagens	44
4.2	ESTIMAÇÃO DO MODELO VAR	45
4.2.1	Equações do sistema VAR	46
4.2.2	Decomposição da variância	49
4.2.3	Função impulso-resposta	49
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O recente crescimento no padrão de vida médio da população mundial, juntamente com a necessidade de um desenvolvimento sustentável, trouxe a demanda de uma nova matriz energética livre de gás carbônico (CO_2), escalável e de menor custo econômico. Assim, a geração de energia elétrica (EE), por meio da fissão nuclear de urânio enriquecido, obtém espaço no cenário global para discussão.

O presente trabalho analisa questões que envolvem a necessidade de uma matriz energética menos nociva ao ecossistema global, além da geração de energia nuclear como resposta e seu subsequente assimétrico mercado de urânio para abastecimento das *utilities*¹. Para tanto, aprofundou-se o estudo em aspectos do modelo de mercado de produção de urânio e suas curvas de oferta e demanda, bem como de peculiaridades da mineração e enriquecimento de urânio.

Por meio de dados históricos do preço de *commodities*² destinadas à geração de energia elétrica, extraiu-se o resultado da função impulso-resposta. O modelo vetorial autorregressivo (VAR) possibilita identificar qual intervalo possui maior influência no comportamento da variável dependente (urânio) estudada. Dessa forma, é permitido explorar os possíveis cenários do mercado de mineração de urânio para supostos choques exógenos no preço. O intuito da pesquisa é compreender a oferta e demanda por urânio e mensurar o comportamento de preço do mineral a partir de choques externos.

O estudo traz como hipótese principal o mercado de urânio para produção de energia nuclear exposto a choques exógenos em seu preço. Assim, será abordado o modelo econômico de mercado, o desenvolvimento sustentável, os produtores de urânio e suas respectivas demandas, como, também, a inelasticidade do preço da demanda e o resultado estatístico dos choques no preço. Realizou-se essa análise por meio de um método quali-quantitativo, o qual permitiu discorrer acerca das características desse mercado e – consequentemente – realizar uma análise estatística da hipótese principal.

¹ Serviços de utilidade pública.

² Bem de consumo básico intercambiável com outras mercadorias.

Assim, o primeiro capítulo introduz o leitor ao tema geral sobre a necessidade de uma energia sustentável, a geração de energia elétrica nuclear e o mercado de mineração de urânio. O capítulo dois aborda as estruturas de mercado. Já, o capítulo três discorre acerca do tema do mercado de urânio, sua demanda e oferta e peculiaridades do objeto de estudo. Por fim, o capítulo quatro analisa as variáveis escolhidas por meio de um modelo autorregressivo para identificar a função impulso-resposta sobre o intervalo dependente (urânio) e apresenta os resultados obtidos.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

O aumento do padrão de vida da população mundial, liderado por países em desenvolvimento como a China e a Índia, demanda uma crescente capacidade de geração de energia mais barata, sustentável e segura em relação à convencional.

A partir desse fato, ressurgiu a necessidade de produção de urânio. Desde o acidente nuclear de Fukushima, países ao redor do mundo anunciaram o desligamento de seus reatores nucleares – como a Alemanha e o Japão, que divulgaram a intenção de desligar 17 e 54 usinas nucleares, respectivamente. No entanto, desde 2011, os países têm religado seus reatores e declarado a construção de novos. No momento, existem 55 reatores em construção pelo mundo.

Em Taiwan, 59,5% da população aprovou o uso de energia nuclear como matriz energética – contrapondo-se à decisão do governo de encerrar as usinas nucleares até 2025. O preço pago por kWh na Alemanha está em máximas históricas, devido à política de energias renováveis. Estas são contrárias ao uso de energia por fissão nuclear.

Nesse contexto, este estudo pretende analisar e conceder uma perspectiva sobre o mercado de urânio para a produção de energia nuclear. Conforme a conjuntura exposta anteriormente, o presente trabalho procura responder às seguintes questões:

- a) em qual estrutura de mercado está inserida a exploração de urânio?
- b) por que optar por uma geração de energia elétrica sustentável?
- c) qual é a curva de demanda por urânio?

- d) qual é a curva de oferta por urânio?
- e) quais são as peculiaridades do mercado de urânio?
- f) quais são as variáveis capazes de impactar no preço do urânio?
- g) qual resultado obtém-se para a análise de impactos exógenos no preço do urânio?

1.2 DEFINIÇÃO DAS HIPÓTESES

1.2.1 Hipótese principal

O mercado de urânio para produção de energia nuclear pode apresentar acentuadas oscilações por meio de choques externos no seu preço.

1.2.2 Hipóteses secundárias

- a) o mercado de urânio concentrou-se em forma de um oligopólio econômico;
- b) para sustentar o crescimento médio no padrão de vida mundial é preciso compreender a equidade intergeracional;
- c) hoje, 445 reatores nucleares em funcionamento possuem contratos de compra de urânio e outros novos 48 entrarão em funcionamento até 2023;
- d) o Cazaquistão e o Canadá são os maiores produtores de urânio do mundo, porém, a maior parte das minas estão desligadas, o que debilita o abastecimento futuro;
- e) há inelasticidade do preço-demanda para o minério de urânio, mercado spot x mercado de longo prazo assimétricos e esgotamento do *underfeeding*³;
- f) choques de preço em outros minerais destinados à produção de energia elétrica podem impactar a cotação de urânio;
- g) variações amplitudinais ao longo do tempo influenciam o preço do minério.

³ Processo de subutilização de centrífugas utilizadas para produção de urânio enriquecido.

1.3 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

Entender a presente conjuntura do mercado de urânio importa para antecipar possíveis choques em seu preço e identificar quais os vetores desse impacto. Também, configura-se como importante para a reflexão acerca do comportamento futuro da variável, por meio de supostos choques exógenos.

A mineração de urânio, necessária para o abastecimento das *utilities* no médio prazo, será incapaz de atender a oferta. Assim, o preço abaixo do custo de produção debilitou os produtores do minério e, também, exauriu fontes secundárias de oferta, bem como tornou a energia nuclear uma resposta viável diante de uma demanda pela energia descarbonizada.

Dessa forma, além de compreender o comportamento do preço de urânio, será estudada a finalidade energética do material e sua contribuição. A partir da ótica da oferta, será abordado o problema da produção atual do mineral por meio da demanda e de sua crescente procura.

O presente projeto se justifica, pois tem-se como objetivo o estudo do mercado de urânio para produção de energia nuclear e a compreensão das variáveis que impactam em seu preço.

1.4 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Analisar a relação de fatores econômicos no mercado de urânio e mensurar o impacto de possíveis choques exógenos em seu preço.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) revisar as estruturas de mercado para compreender a dinâmica do mercado de urânio;

- b) assimilar a necessidade e as vantagens de uma matriz energética mais sustentável;
- c) compreender o impacto ambiental;
- d) discorrer sobre o processo de energia nuclear e mineração de urânio;
- e) analisar o retorno sobre o investimento em energia nuclear;
- f) abordar a principal fonte de demanda por urânio: a construção de novos reatores nucleares;
- g) entender o impacto do *underfeeding*.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia refere-se à preocupação com o instrumental da investigação. É a forma pela qual se atinge o objetivo da pesquisa: a ciência. O método cuida dos procedimentos, das ferramentas e do caminho utilizado para transformar a realidade teórica e prática. Para se chegar a esse objetivo, faz-se necessário o uso de regras que solidifiquem o trabalho. É disso que trata a metodologia (DEMO, 1985).

No capítulo dois, será desenvolvida uma pesquisa teórico-descritiva, na qual serão discorridas as características das estruturas de mercado, a fim de analisar o mercado de urânio.

O capítulo três utilizará um estudo de caso sobre as características do mercado de urânio. Serão levantados aspectos sobre o minério de urânio, energia nuclear, desenvolvimento sustentável e a demanda e a oferta deste elemento químico, com o objetivo de compreender a conjuntura do mercado do mineral.

Por fim, no capítulo quatro, será utilizada uma abordagem estatística econométrica para o entendimento das variáveis independentes capazes de afetar o preço do urânio. Assim, analisa-se o efeito de transmissão sobre o preço da *commodity*, a partir de choques exógenos sobre a cotação do minério.

2 TEORIA DE MERCADO

A microeconomia trata dos aspectos econômicos individuais. Dessa forma, seu dever é explicar as razões que os agentes econômicos consideram para a sua tomada de decisões, como a determinação de preços e quantidades. Mais especificamente, neste capítulo será apresentada a estrutura dos mercados imperfeitos. A Teoria da Competição Imperfeita baseia-se em três grandes obras: Cournot⁴, Chamberlin⁵ e Robinson⁶. O tratamento dos mercados imperfeitos foi fundado pelo economista Francês Augustin Cournot, em 1838, no livro *Researches Into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth*. A competição imperfeita é um conceito teórico que designa modelos de competição que desobedecem às leis dos mercados perfeitos, ou seja, estas firmas definem seus preços e quantidades, possuem consideráveis fatias de mercado e são protegidas por barreiras de entrada. A seguir, será possível entender o funcionamento dos mercados.

2.1 ESTRUTURAS DE MERCADO

As estruturas de mercado estão condicionadas a três variáveis principais. São elas: o número de competidores no mercado; a diferenciação existente do produto de cada firma; a existência de barreiras de acesso ao mercado por novas empresas. Neste capítulo, serão abordados os tipos de estruturas de mercado e suas características determinantes.

2.1.1 Competição monopolística

Competição monopolística é a situação econômica em que as empresas podem livremente participar do mercado, sendo que cada uma deve produzir um bem

⁴ COURNOT, Augustin. **Researches into the mathematical principles of the Theory of Wealth**. New York: Macmillan, 1897.

⁵ CHAMBERLIN, Edward Hastings. **The theory of monopolistic competition**: a re-orientation of the Theory of Value. 8. ed. Cambridge: Harvard University Press, 1962.

⁶ ROBINSON, Joan. **Economía de la competencia imperfecta**. Barcelona: Ediciones Martínez Roca, 1973.

diferenciado a preços superiores do seu custo marginal. Os mercados monopolistas, geralmente, atendem a duas importantes características: a elasticidade preço da demanda cruzada é grande, ou seja, possui substitutos perfeitos; existe, pela ótica da oferta, uma facilidade das firmas em participar ou sair do mercado, quando houver prejuízo (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

A competição no mercado monopolista rejeita algumas características da competição perfeita. Nesse modelo, há o peso morto do monopólio, causado pelo *markup*⁷ sobre o mercado, em que o preço dos bens ou serviços são estabelecidos acima do custo marginal. O número de empresas pode ser muito grande ou limitado a algumas poucas firmas. A diferenciação dos produtos no modelo de competição monopolística leva as empresas a adotarem práticas de assimetria de informação para conseguir vantagens econômicas sobre os consumidores e competidores (MANKIW, 2013).

O equilíbrio em um mercado monopolisticamente competitivo defronta-se com o mesmo caso dos monopólios: os dois encontram curvas de demanda descendentes⁸ (curva de demanda da empresa). No curto prazo, a quantidade capaz de maximizar os retornos Q_{cp} para D_{cp} encontra-se no ponto de interseção entre a receita marginal e o custo marginal. Já no longo prazo, o excedente de lucro da firma monopolista irá atrair novos competidores. Esses entrantes irão deslocar a curva de demanda das firmas para baixo. Dessa forma, como novas firmas pressionarão Q_{lp} e P_{lp} para baixo, o lucro implícito será igual a zero, pois o preço é igual ao custo médio. Porém, ainda assim, a empresa tem poder de monopólio devido à curva de demanda descendente (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

Os mercados de competição perfeita são desejáveis, pois são eficientes economicamente – no sentido de Pareto⁹. Já no modelo de competição monopolística, existem duas fontes de ineficiência: o valor atribuído pelos consumidores, acima do custo marginal a unidades adicionais de determinado bem gera um peso morto de excedente; e, em termos de quantidade, o lucro zero ocorrerá antes do custo médio

⁷ *Markup* é um termo utilizado em economia para informar o quanto o preço de um produto está acima do seu custo final.

⁸ Curva de demanda descendente caracteriza-se pela relação inversa entre preço e quantidade.

⁹ De acordo com a Encyclopædia Britannica (2020b), o Ótimo de Pareto ocorre quando não é possível melhorar a condição de uma pessoa ou de um mercado sem piorar a condição de outro agente.

mínimo. Entretanto, a competição monopolística é o modelo competitivo de mercado mais comum encontrado entre as indústrias.

2.1.2 Concorrência perfeita

O mercado de rosas vermelhas em uma grande cidade é um exemplo de concorrência perfeita. Para um mercado ser considerado de concorrência perfeita deve obedecer aos seguintes critérios: ser fragmentado e numeroso, ou seja, a atividade de consumidores e ofertantes individuais não é capaz de afetar a curva de preços e de quantidades; as empresas são produtoras de bens homogêneos; os consumidores consideram que os produtos são idênticos, independente de quem os produza. Como os compradores não identificam a diferenciação entre os produtores, a competição, sob ótica da oferta, ocorre por meio do nível de preço estabelecido por cada empresa. Nesse mercado, os consumidores conhecem a informação de forma total acerca dos preços praticados, pois o preço é o principal determinante do consumo em um mercado de concorrência perfeita; a indústria tem baixas barreiras de entrada. Todas as firmas, já atuantes no mercado e as possíveis entrantes, possuem acesso a mesma tecnologia e insumos disponíveis (VARIAN; HAL, 2015).

As firmas no mercado de concorrência perfeita são chamadas de tomadores de preço (P), pois a curva de P é conhecida pelo mercado. Para essas empresas, cada unidade adicional vendida aumenta a receita marginal na mesma proporção dos preços praticados no mercado, sendo $RM = P$. A cada vez que determinada empresa aumenta sua quantidade produzida, admitindo que $P > CM$, o lucro aumenta em $P - CM$ – diferença entre receita marginal e custo marginal. Nesse momento, a empresa estará maximizando seu lucro até a intersecção, em que $P = CM$ quando a quantidade produzida igualar o custo marginal ao preço de mercado.

O equilíbrio do mercado competitivo é encontrado quando a demanda dos consumidores se iguala à quantidade produzida pelos ofertantes. No longo prazo, o lucro da firma será zero, pois as barreiras de entrada permitirão novos competidores e nenhum consumidor ou ofertante será capaz de influenciar o preço de mercado individualmente (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

2.2 OLIGOPÓLIO

Em mercados oligopolistas, a característica predominante é a concentração de oferta de bens ou serviços em somente alguns produtores. Nesse mercado, as empresas dominantes alcançam lucros substanciais no longo prazo devido às economias de escala¹⁰ gerarem barreiras de entrada à competição. O difícil acesso de competidores ao mercado pode ser causado pela tecnologia imposta, tempo para o negócio se tornar lucrativo, regulação de mercado, entre outros. Esses impedimentos de acesso ao mercado são denominados de “barreiras naturais” à entrada de competidores. Além disso, no mercado oligopolista, as empresas adotam diferentes estratégias de negócio para desestimular a competição (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

Assim como em outros modelos de mercado, no oligopólio as empresas competidoras precisam determinar o equilíbrio de mercado em quantidades e preços, para maximizarem o seu lucro. No mercado oligopolista, as firmas equacionam preços e quantidades a partir de considerações estratégicas adotadas pelo concorrente. Para melhor entendimento, parte-se de um princípio subjacente para elucidar o equilíbrio de mercado em um oligopólio: o Equilíbrio de Nash¹¹, definido como um “conjunto de estratégias ou ações em que cada empresa faz o melhor que pode em função do que as concorrentes estão fazendo” (PINDYCK; RUBINFELD, 2013, p. 454). A firma, ao assumir que irá fazer o seu melhor para maximizar o lucro, define preços e quantidades, o que implica em outras firmas adotarem o mesmo pressuposto para sua maximização de lucro. Em função dos concorrentes, a maximização dos resultados leva ao equilíbrio de mercado no oligopólio.

¹⁰Economia de escala é aquela em que o aumento do nível de produção resulta em uma queda do custo médio do produto.

¹¹NOBEL PRIZE. **John F. Nash Jr.**: prize seminar. 1994. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/1994/nash/lecture/>. Acesso em: 20 out. 2020.

2.2.1 Modelo de Cournot

O modelo de Cournot pressupõe que as firmas competidoras – duopólio, em que apenas duas firmas possuem parte significativa do mercado – produzam produtos homogêneos e conheçam a curva de demanda do mercado. Dessa forma, as firmas decidirão o quanto produzir e deverão tomar essa decisão simultaneamente (VARIAN; HAL, 2015). Para estimar o nível de produção, a firma considerará a oferta de outros participantes no mercado, para, assim, determinar o preço em função da quantidade total ofertada pelo mercado. A consistência do modelo de Cournot na determinação da oferta está em admitir que a quantidade produzida pelo competidor é fixa.

O cálculo a ser realizado é uma relação de produção da *Empresa 1* em função do nível de produção da *Empresa 2*. Assim, a maximização do resultado da *Empresa 1* dependerá da determinação de oferta da *Empresa 2*. Essa projeção é denominada de curva de reação, na qual o nível que maximiza os lucros da empresa dependerá da projeção de o quanto esta pressupõe que seus concorrentes irão produzir.

Determinada a curva de reação de cada uma das firmas, pode-se encontrar o nível de produção geral ou o ponto de intersecção, em que ocorre o equilíbrio de Cournot. Nesse ponto, as firmas estimam corretamente a quantidade que seus concorrentes irão produzir e, assim, maximizam o lucro.

2.2.2 Modelo de Stackelberg

O modelo duopolista descrito anteriormente pressupõe que os competidores no mercado tomam decisões simultâneas. No modelo de oligopólio de Stackelberg, uma empresa determina o nível de produção antes que outras empresas o façam (VARIAN; HAL, 2015). Nesse modelo, a firma deve avaliar duas questões: a vantagem de ser o primeiro a agir e quais quantidades cada empresa produzirá. Agora, será explanado o que ocorrerá em um modelo prático de oligopólio de Stackelberg.

A *Empresa 1* ao determinar seu nível de produção anteriormente à *Empresa 2*, deverá considerar como a *Empresa 2* reagirá. Esse modelo de oligopólio difere do modelo de Cournot, pois nenhuma das empresas têm capacidade de reação. A

Empresa 2 considera a produção da *Empresa 1* como fixa. Assim, para maximizar seu lucro deverá optar por um nível de produção menor. Esse fato, consumado no modelo, gera o benefício do primeiro a agir – no exemplo citado, a *Empresa 2* produzirá em maiores quantidades até a intersecção, em que $P = CM$ (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

Os modelos de Cournot e Stackelberg são interpretações alternativas do comportamento de agentes oligopolistas. Enquanto o modelo de Cournot pode ser melhor interpretado em um setor de empresas que produzem bens semelhantes, o modelo de Stackelberg deve ser utilizado para analisar um setor em que uma grande empresa lidera o lançamento de produtos ou determinação de preço. Como, por exemplo, o mercado de computadores *mainframe*, sendo a *International Business Machines Corporation* (IBM) o líder principal.

2.2.3 Modelo de Bertrand

Parte-se do pressuposto que as firmas, em um oligopólio, concorrem por meio da determinação do nível de produção. Entretanto, em muitos mercados oligopolistas, a determinação do consumo e, conseqüentemente, a concorrência entre empresas se dá em termos de preços. O modelo de Bertrand é composto por empresas que produzem um bem homogêneo, em que o preço dos concorrentes é considerado fixo e todas decidem simultaneamente qual será o nível de preço (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

Como os consumidores não diferenciam o produto dos vendedores, mas apenas o preço cobrado, a empresa que vender a um preço menor, abastecerá todo mercado; aquela com preço maior não será capaz de competir. Se o nível de preços entre as duas empresas for o mesmo, o mercado será dividido entre elas. Dessa forma, considerando o incentivo inerente do modelo de Bertrand à redução do nível dos preços, o equilíbrio corresponde ao mesmo da situação de um mercado competitivo, no qual $P = CM$.

2.2.4 Cartel

Em um cartel, os produtores concordam em agir em conjunto para determinar preços e níveis de quantidades. A maioria dos cartéis são compostos por poucos produtores, os quais possuem uma grande fatia de mercado, têm poder o suficiente para determinar as curvas de demanda e oferta, além de ofertarem ao consumidor um bem inelástico. O sucesso de um cartel é determinado por dois fatores.

A primeira condição é o nível organizacional ou poder de monopólio dos membros. Os membros de um cartel devem convergir para estratégias similares, além de que as regras impostas devem atender aos custos, capacidade de produção e objetivos dos participantes. A segunda condição é referente ao potencial de imposição do monopólio. Ou seja, caso o cartel consiga organizar o melhor conluio possível para os membros, ainda, o bem produzido não poderá ter uma elasticidade alta. Isso significa que o cartel apenas conseguirá impor preços e quantidades caso o bem ofertado seja inelástico à renda do consumidor (VARIAN; HAL, 2015). De acordo com Crandall (1984 apud VARIAN; HAL, 2015, p. 723):

Na década de 1980, as empresas automobilísticas japonesas concordaram em aderir a uma 'restrição voluntária de exportações' (RVE). Isso significava que elas reduziram 'voluntariamente' suas exportações de automóveis para os Estados Unidos. O consumidor americano típico achou que isso constituiu uma grande vitória dos negociadores comerciais dos Estados Unidos. Mas se refletirmos sobre isso por um instante, as coisas parecerão bem diferentes. Quando examinamos o oligopólio, vimos que o problema que as empresas enfrentam em um setor refere-se à forma de restringir a produção para suportar preços mais altos e desencorajar a concorrência. Conforme vimos, haverá sempre a tentação de burlar os acordos de produção; todo cartel tem de encontrar um jeito de detectar e coibir essas violações. É muito conveniente para as empresas que uma terceira parte, como o governo, possa fazer isso. Foi exatamente esse o papel que o governo americano desempenhou para os fabricantes japoneses de automóveis! Segundo estimativa, os automóveis japoneses importados custavam em 1984, nos Estados Unidos, US\$2.500 a mais do que custariam se não houvesse as RVEs. Além disso, os preços mais altos dos carros importados permitiram aos fabricantes americanos vender seus automóveis cerca de US\$1.000 mil mais caros do que teriam vendido de outra forma.

O cartel pode ser analisado por meio do modelo de empresa dominante. Nesse modelo econômico, o mercado possui poucas empresas, os produtos são

homogêneos, algumas das empresas escolhem o preço e as demais são tomadoras de preço e escolhem sua produção. Um exemplo bem conhecido é o cartel da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Como a OPEP possui custos menores que os concorrentes, no curto prazo sua demanda será inelástica. Assim, Q_{OPEP} que maximizará seus lucros deverá ser P^* acima da oferta competitiva. Isso, produz o poder de monopólio da OPEP e sua capacidade de definir preços e quantidades frente aos concorrentes (PINDYCK; RUBINFELD, 2013).

2.3 ECONOMIA AMBIENTAL

Os problemas ambientais tornaram-se desafios à ciência econômica. Em anos recentes, a teoria econômica começou a utilizar seu instrumental analítico para avaliar questões como a mudança climática¹² e a perda da biodiversidade. Partindo do princípio que a sociedade e o meio ambiente coexistem em um ecossistema, a economia ambiental tenta explicar as relações sociais com o meio ambiente, a gestão de recursos naturais, a otimização de fontes extraídas do meio ambiente, entre outros¹³. Esse capítulo tem o objetivo de apresentar as linhas teóricas e metodológicas que tentam compreender as relações entre economia e sistemas naturais (*Environmental and Ecological Economics*).

2.3.1 Economia ambiental neoclássica

O postulado da economia ambiental neoclássica é de que o meio ambiente é um fornecedor de materiais e, ao mesmo tempo, receptor dos resíduos transformados pelo homem (AMAZONAS, 2002). A análise econômica desse pressuposto está ligada com o estudo da escassez de recursos e a poluição ao meio ambiente. Nesse sentido, surgem duas correntes ligadas à teoria ambiental neoclássica: teorema da poluição e teoria dos recursos naturais.

¹² NORDHAUS, William D. A review of the stern review on the economics of climate change. **Journal of Economic Literature**, v. 45, n. 3, p. 686-702, set. 2007.

¹³ GROSSMAN, Gene; KRUEGER, Alan. **Economic growth and the environment**. 1994. 37 f. Working Paper n.º 4634 (Department of Economics) – National Bureau of Economic Research. Cambridge: USA, 1994.

A primeira refere-se ao bem-estar social e à teoria dos bens públicos e busca entender quais as relações entre danos ao meio ambiente e benefícios causados pela implementação de controles da poluição. Em outras palavras, a economia da poluição é uma tentativa de interpretar as implicações da poluição em um ótimo de Pareto. A assimetria existente no modelo diz respeito às diferenças de externalidades. Desse modo, os custos marginais atrelados à sociedade diferem do ótimo privado. Ou seja, há uma falha de mercado na relação entre economia e meio ambiente, na qual o mercado não é capaz de gerar um ótimo social (ANDRADE, 2008).

A economia dos recursos naturais, de outro modo, analisa o meio ambiente sob a ótica de provedor de recursos ao sistema econômico. Procura-se entender sobre o padrão ótimo de uso dos recursos naturais, gestão sobre eles e taxa ótima de depreciação. O princípio subjacente dos recursos naturais é que sua escassez deve ser resolvida por meio de uma equação de alocação intertemporal da sua extração (PEARCE; TURNER, 1990).

2.3.2 Economia ecológica

A economia ecológica¹⁴ advoga que estudar as relações ambientais vigentes apenas pelo viés econômico gera respostas insuficientes aos dilemas ambientais. O princípio da nova metodologia¹⁵ é integrar os conceitos das ciências econômicas e das ciências naturais – visando, em primeiro lugar, fornecer soluções estruturais para os problemas ambientais (VAN DEN BERGH, 2001). De acordo com Constanza (1994, p 111):

A economia ecológica é uma nova abordagem transdisciplinar que contempla toda a gama de inter-relacionamentos entre os sistemas econômico e ecológico. [Ela] engloba e transcende esses limites disciplinares e vê a economia humana como parte de um todo superior. Seu domínio é a totalidade da rede de interações entre os setores econômico e ecológico.

¹⁴ COMMON, Michael; STAGL, Sigrid. **Ecological economics**: an introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

¹⁵ COSTANZA, Robert. Economia ecológica: uma agenda de pesquisa. *In*: MAY, Peter Herman; MOTTA, Ronaldo Seroa da (Orgs). **Valorando a natureza**: a análise econômica para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Campus, 1994. p. 100-140.

Além disso, esse escopo vislumbra a economia como um sistema subjugado de um ecossistema global maior – o qual impõe limites ao crescimento econômico. Também, os economistas da escola ecológica vão além ao estudarem os processos subjacentes da natureza e seu relacionamento com a economia. Dessa forma, buscam compatibilizar os fundamentos biofísicos-ecológicos e a dimensão socioeconômica (AMAZONAS, 2002b).

O resultado desse modelo reside no desenvolvimento de respostas sob o sistema de multicritério, em que o valor monetário ou econômico será ponderado pela ótica de valores não-monetários.

2.3.3 Economia dos recursos naturais

A economia ambiental busca identificar as externalidades da atividade econômica sobre o meio ambiente e avaliar as políticas públicas regulatórias sobre essa relação (MAY, 2010). Nesse escopo de estudo, surge a economia dos recursos naturais¹⁶. Tradicionalmente, os recursos naturais atraem a atenção dos economistas sob dois âmbitos de estudo. Primeiro, a otimização econômica da escassez para o uso em prol da humanidade e, segundo, a gestão sobre um sistema de recursos naturais sustentáveis (HACKETT, 2006). Em economia dos recursos naturais, um elemento da natureza é considerado recurso natural, de finalidade econômica, quando útil para o homem ou quando por meio da tecnologia é possível extrair algo de valor.

Dentre os recursos naturais, existem aqueles que são renováveis e aqueles não renováveis. Por exemplo, em um sistema de recursos naturais, em que a matéria-prima deriva de um estoque fixo que não se recompõe durante a existência humana, este será considerado não renovável, como é o caso de combustíveis fósseis ou recursos minerais. Para tal sistema, a questão principal a ser tratada é sobre as taxas de extração durante o tempo e a depreciação das reservas existentes (HACKETT, 2006). Muitos recursos naturais não renováveis possuem um sistema crescente secundário de oferta. São eles: o alumínio e o metal. Esse modelo econômico é capaz de criar sua

¹⁶PEARCE, David W; TURNER, R. Kerry. **Economics of natural resources and the environment**. Londres: Harvester Wheatsheaf, 1990.

própria competição futura. Desse modo, a eficiência tecnológica aumenta com o passar do tempo, diminuindo a necessidade da utilização de recursos naturais.

O declínio de oferta ou o aumento de demanda no estoque total do recurso será antecipado pelo mercado, mitigando riscos recorrentes de choques nos preços. Nessa condição, encontra-se o equilíbrio dos mercados de recursos não renováveis. A razão por trás disso baseia-se nas expectativas que os agentes possuem sobre o futuro. Maiores preços no futuro irão restringir a quantidade ofertada atualmente. Consequentemente, maiores preços no presente incentivarão os agentes a conservar as reservas existentes para consumo em t_1 .

De acordo com a regra de Hotelling, a dinâmica eficiente ocorrerá quando o presente valor (PV) da oferta é maximizado. Admitindo-se um bem não renovável e não reciclável, essa condição é atingida no momento em que $P - MC$ é equalizado durante o tempo. Ou seja, os custos de extração marginal permanecem relativamente constantes e os preços aumentam gradualmente. Essa dinâmica irá gerar excedentes de monopólio das firmas e incentivará a substituição do bem no longo prazo pelos consumidores (HOTELLING, 1931).

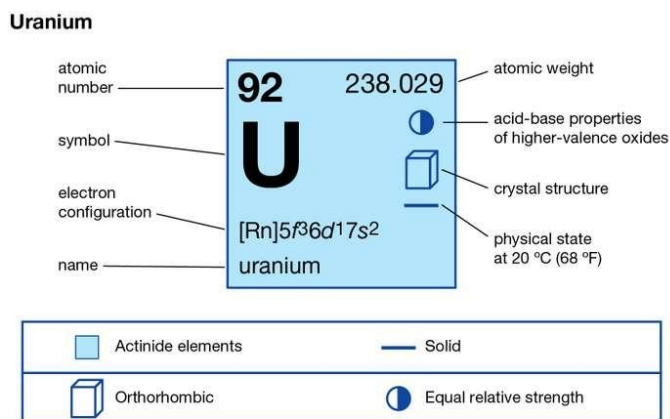
A outra classe de recursos naturais são os associados à autorregulação do ecossistema e a vida na terra. A matéria da teoria econômica dos recursos renováveis abrange entender a máxima utilização (*maximum sustained yield*¹⁷) dessas fontes, sem prejudicar a capacidade de valor do ecossistema (PEARCE; TURNER, 1990). Geralmente, os recursos naturais renováveis sofrem de externalidades de apropriação. Ou seja, a impossibilidade de identificar o uso dos bens individualmente permite aos agentes usufruírem dos lucros e diluírem os custos sobre a sociedade. Uma empresa pode utilizar métodos de produção que danificam o ecossistema, ao mesmo tempo que maximizam seu lucro. De acordo com Ostrom (1990), a tragédia dos bens comuns pode ser evitada por meio da construção e manutenção de estruturas de governança.

¹⁷ Rendimento máximo sustentável.

3 O QUE É URÂNIO?

Urânio é um elemento químico da série dos actinoides da tabela periódica – número atômico 92 (U-92). O principal uso do U-92 refere-se à geração de energia atômica. O minério de urânio pode ser encontrado na crosta terrestre em forma de *pitchblenda* (impuro: U_3O_8), uraninite (UO_2), carnotite (urânio em forma de potássio), autunite (urânio em forma de fosfato) e torbernite (cobre de urânio em forma de fosfato). Estes e outros formatos da molécula de urânio são o combustível para a obtenção da energia nuclear (MILLER; BAMBROUGH, 2007). A Figura 1 apresenta informações sobre a molécula de urânio.

Figura 1 – Molécula de urânio



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Fonte: Encyclopedia Britannica (2020a).

Em 1869, o urânio obteve a atenção do físico Dmitry Mendeleyev, durante a formulação da tabela periódica, por se tratar do elemento químico mais denso encontrado até então. Em 1896, o físico francês, Henri Becquerel, descobriu o fenômeno da radioatividade. No ano de 1938, os químicos alemães, Otto Hahn e Fritz Strassmann, constataram o processo de fissão nuclear após bombardearem o urânio com elétrons de baixa frequência (abaixo de 1 eV). Em 1939, o físico ítalo-americano, Enrico Fermi, sugeriu que os nêutrons seriam o produto para a fissão de um átomo e poderiam ser replicados em uma linha de reação em cadeia. Após a criação desta hipótese, uma série de cientistas confirmaram que a fissão nuclear ocorre na média de

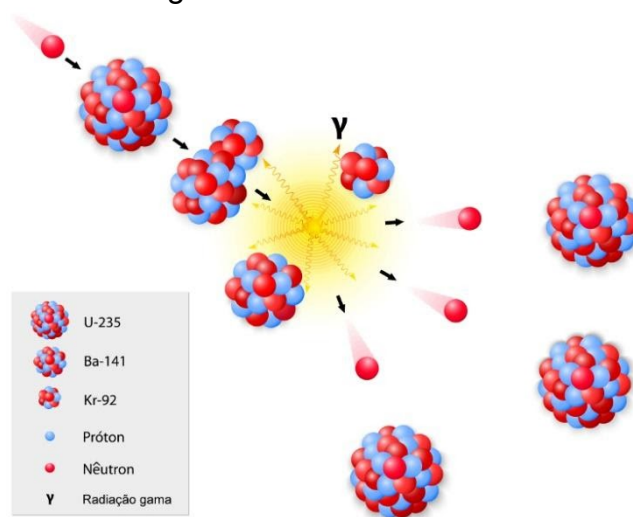
2,5 nêutrons por átomo. Estas descobertas sustentaram a primeira reação nuclear em cadeia produzida (02 de dezembro de 1942), a primeira bomba atômica (16 de julho de 1945) e o primeiro gerador de energia nuclear (31 de outubro de 1957).

Para a geração de energia em usinas nucleares, é utilizado o processo em cadeia controlada de fissão nuclear. O núcleo de um átomo de urânio – que é instável – ao sofrer um bombardeamento com nêutrons moderados, é dividido em dois. Assim, origina duas ou três moléculas de nêutrons, além da energia liberada por meio do processo. A seguinte equação explica o efeito acima:



Por sua vez, as partículas de nêutrons liberadas podem atingir outros átomos de urânio, assim, iniciando – novamente – o processo de fissão nuclear em reação em cadeia (VANDENBOSCH; HUIZENGA, 1973), o que está elucidado na Figura 2.

Figura 2 – Fissão nuclear



Fonte: Brasil Escola (2020).

Ao monitorar o número de nêutrons com a quantidade de U-235 (U = 92 prótons + 143 elétrons), por exemplo, pode-se controlar a taxa de fissão ao longo do tempo por meio de um reator. Dessa forma, o urânio torna-se fissionável para produção de energia elétrica.

3.1 DEMANDA DE URÂNIO

Atualmente, há uma relação positiva entre o consumo de energia e o desenvolvimento humano. Ao alcançar um nível acima de 100 GJ – consumo ainda a ser atingido por 80% da população global – pode-se aumentar a qualidade de vida, a partir de melhores serviços providos pelo sistema de saúde, educacional e econômico (STEINBERGER, 2016). A cada uma pessoa, dentre as 4 bilhões mais pobres do mundo, consome o equivalente a 5% do montante de energia utilizado por um cidadão médio de um país desenvolvido. Para elevar este patamar a 15%, é necessário produzir uma demanda anual maior de energia equivalente à consumida nos Estados Unidos da América (EUA).

No presente, mais de 80% da energia consumida é originada pela queima de combustíveis fósseis, gás e carvão (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). No entanto, o uso contínuo desta matriz energética está causando alteração no clima global (WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2018) além da morte prematura de 7 milhões de pessoas a cada ano (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2018 apud GONZALEZ, 2018, não paginado).

Assim, para o aumento global no consumo de energia *per capita*, será necessário produzir mais energia de fontes limpas, com o intuito de não prejudicar o ecossistema. Dessa maneira, surge o papel do urânio neste problema global, como uma alternativa de baixa emissão de carbono escalável e de baixo custo. A seguir, serão revisados os três pilares que exigirão uma maior demanda de urânio para a próxima década: desenvolvimento sustentável; maior energia e menor emissão de CO₂; economia efetiva.

3.1.1 Desenvolvimento sustentável

Uma quantidade numerosa de conceitos tem sido utilizada para definir o desenvolvimento sustentável. Para este trabalho, a definição escolhida é: o “desenvolvimento sustentável procura atender as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem suas próprias

necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987, não paginado, tradução nossa).¹⁸

Essa forma de desenvolvimento é considerada um caminho para a sustentabilidade. Para um ecossistema ser considerado sustentável, deve-se contemplar os pilares sociais, econômicos e ambientais. Em 2015, os 193 membros da Organização das Nações Unidas adotaram a *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável* – um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, aliado com os três pilares da sustentabilidade (UNITED NATIONS, 2015). Para atingir a *Agenda 2030*, a ONU concordou em dividir 17 metas para o desenvolvimento sustentável – *Sustainable Development Goals* (SDGs). A Figura 3 apresenta essas metas.

Figura 3 – *The UN’s Sustainable Development Goals*



Fonte: *United Nations* (2015).

Na Figura 3, são descritas uma série de metas, nas quais existe uma influência direta da produção de energia nuclear global e, conseqüentemente, da demanda de urânio.

¹⁸ **Do original:** “Sustainable development is development that meets the needs of the present, without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987, não paginado).

3.1.2 Mais energia e menos emissões

Entre os anos de 1990 e 2030, a previsão é de que o consumo de energia elétrica dobre no mundo (RÜHL; GILJUM, 2011). Se a humanidade continuar a aumentar o consumo de energia aos níveis atuais, até 2040, a demanda irá crescer na ordem de 1,3% ao ano (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Esse acréscimo ocorrerá – também – para abastecer as 850 milhões de pessoas que permanecem sem acesso à energia elétrica no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). A Figura 4 demonstra o índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo anual de energia *per capita* em 2017.

Figura 4 – *HDI and annual energy consumption per capita, 2017*



Fonte: *BP Energy Outlook* (2017).

O CO₂ lançado na atmosfera contribui com aproximadamente 2/3 do aquecimento global homocêntrico (LINDSEY, 2009). O Painel Intergovernamental da Mudança Climática das Nações Unidas (IPCC) determinou que para estabilizar a elevação das temperaturas no globo terrestre, mais de 80% das emissões de CO₂ devem ser reduzidas (SUWWAN, 2008).

Nesse sentido, quando o carvão – por exemplo – é substituído por uma fonte de energia derivada do urânio, o dióxido de carbono emitido na atmosfera diminui. A cada 22 toneladas de urânio (U₃O₈) utilizadas ao invés de carvão mineral, uma quantidade superior a 1 milhão de toneladas de CO₂ são retirados da atmosfera (MILLER; BAMBROUGH, 2007).

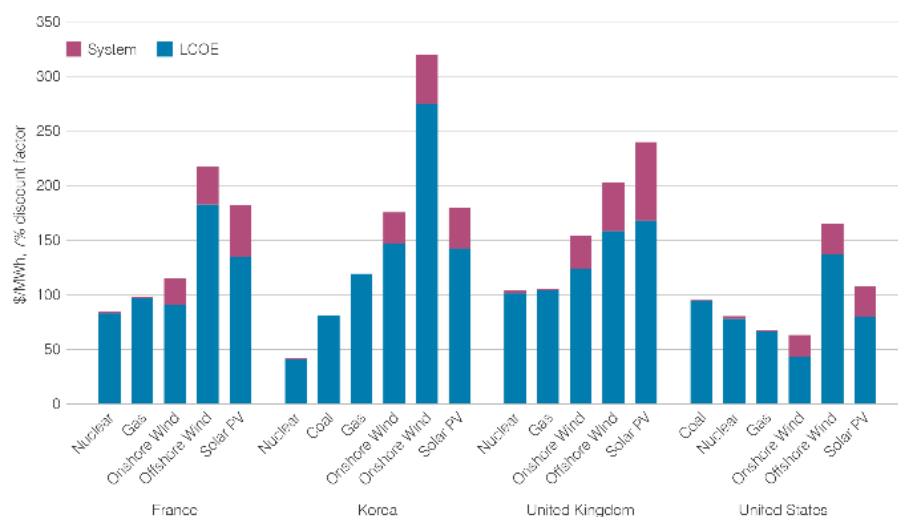
3.1.3 O pilar econômico

O urânio não possui outro uso significativo além da produção de energia nuclear. A geração de energia elétrica, a partir do urânio, possibilita que mais recursos estejam disponíveis para o restante das atividades econômicas. Os reatores nucleares estão distribuídos em uma série de países e geografias diferentes. Assim, é possível evitar o risco de futuros choques de mercado, como, por exemplo, as experiências das crises do petróleo de 1973 e 1979 (HAMILTON, 2011).

A crescente demanda por uma energia mais limpa ou renovável reflete a importância que a sociedade atribui à preservação dos recursos finitos para as demais atividades econômicas. Nessa análise, o princípio de equidade intergeracional é utilizado para comparar as vantagens entre as energias limpas ou renováveis que utilizam em sua infraestrutura materiais finitos e/ou que necessitam de um processo de emissão de CO₂ para seu uso. Conforme um estudo realizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2017), a energia nuclear possui significativas vantagens em termos de utilização de materiais finitos, como o cimento, o aço e o vidro em sua infraestrutura, dentre as energias de baixa emissão de carbono.

Um dos pontos principais da *Agenda 2030* reside em tornar a eletricidade limpa e economicamente acessível. A acessibilidade da energia elétrica é uma função do custo de geração e dos custos correlatos ao sistema como um todo. O custo total da produção de energia elétrica pode ser mensurado por meio do Custo Nivelado de Energia Elétrica (LCOE) (INSTITUTE OF CORPORATE FINANCE, 2020). A métrica mensura em uma razão o gasto total para geração de energia elétrica (capital e custo operacional) pela produção total de energia durante a vida útil de uma planta energética. A Figura 5 compara o LCOE de diferentes fontes energéticas.

Figura 5 – Comparing the economics of different forms of electricity generation



Source: Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition, OECD-NEA & IEA; Nuclear Energy and Renewables, OECD-NEA (2012)

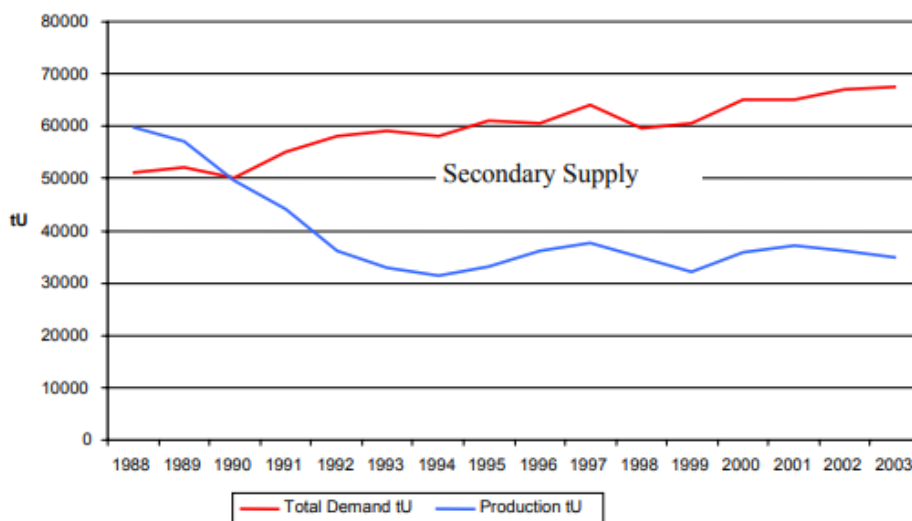
Fonte: World Nuclear Association (2020 b).

A economia da energia nuclear mostra um custo competitivo menor entre os seus pares, somado ao material utilizado em sua infraestrutura e as externalidades do setor.

3.2 OFERTA DE URÂNIO

Para atender cerca de 440 reatores nucleares no mundo, no ano de 2019 foram produzidos, pelas minas de urânio, 63,273 toneladas desse elemento (WORLD URANIUM MINING, 2019 apud WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2019). A quantidade citada corresponde a 80% da demanda total de urânio necessária para atender aos reatores com capacidade de geração de 390 GWe, sendo o restante suprido por fontes alternativas (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2019). Na Figura 6, tem-se a relação entre produção e demanda de urânio.

Figura 6 – Produção e demanda de urânio



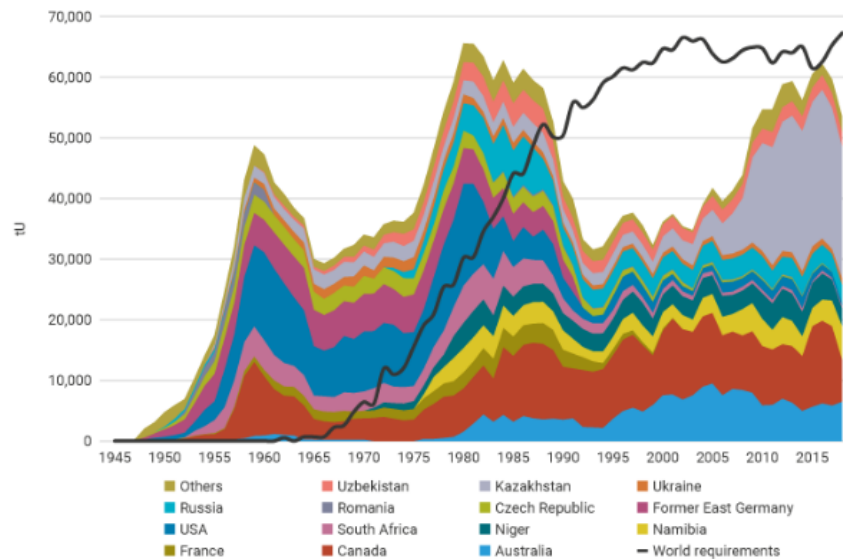
Fonte: *World Nuclear Association* (2020d).

Estima-se que a população mundial irá crescer de 7,6 bilhões para 9,7 bilhões em meados de 2050 – o que significa um crescimento de uma população de Shangai a cada quatro meses. Isso fará com que a população urbana alcance 2/3 da representação total, frente aos atuais 55% (UNITED NATIONS, 2018). Para atender a esse aumento de demanda, a seguir, serão apresentados os principais vetores da oferta de urânio: mineradoras de urânio, Retorno no Investimento em Energia (EROI) e mercado de urânio.

3.2.1 Mineração de urânio

A concentração de minério de urânio na crosta terrestre é de 2,8 partes por milhão. Isso significa que o U308 é mais abundante que o ouro, a prata ou o mercúrio. O Cazaquistão detém grande parte da produção global de urânio (43%), seguido pelo Canadá (13%) e Austrália (12%) (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020c). Por outro lado, as maiores reservas do minério já descobertas são encontradas na Austrália (30%), Cazaquistão (14%) e Canadá (8%) (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020c). A Figura 7 exibe a produção mundial de urânio.

Figura 7 – *World uranium production and reactor requirements*



Fonte: *World Nuclear Association* (2020c).

Atualmente, 57% da mineração global de urânio utiliza o método *In Situ Leach* (ISL) (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020c). A extração do minério consiste em retirar o U_3O_8 presente na crosta terrestre de rochas e outros materiais pesados do solo. O método de ISL envolve diluir minérios presos ao urânio e, em seguida, realizar o tratamento desses minerais com um reagente especial, para que possam ser recompostos ao ecossistema. Consequentemente, não há uma perturbação abrupta do solo ou desperdício de minerais essenciais à vida (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2010).

3.2.2 Retorno do investimento em energia

O *Energy Return on Investment* (EROI) é um indicador do montante de energia obtido por meio de uma determinada fonte sobre o total gasto de energia para produzi-la ($EROI = \text{Energy Output} / \text{Energy Input}$). O EROI pode determinar o preço e a rentabilidade da energia, pois o cálculo inclui uma cadeia de gastos específicos sobre a receita gerada. Quanto maior o resultado do indicador, melhor será a rentabilidade do investimento – sendo desejável a fonte de energia capaz de provar o maior número possível (CHEN, 2019).

A Figura 8 demonstra os dados extraídos de Weissbach et al (2013 apud WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020a) sobre o gasto de construção e manutenção de um reator nuclear ajustado por 1 GWe – incluindo o descomissionamento. Na última linha, pode-se considerar o resultado total da energia despendida por uma planta nuclear e seu retorno em T_n .

Figura 8 – Gasto de construção e manutenção de um reator nuclear

Inputs (100% load basis)	GWh (e)	TJ (th) Annual	PJ (th) 40 year	PJ (th) 60 year
Mining & milling – 230 t/yr U_3O_8 /195 tU, at Ranger		63	2.51	3.8
Conversion (Schneider 2010)			1.74	2.6
Initial enrichment: Urenco centrifuge	10.0		0.11	0.11
Reload enrichment: Urenco centrifuge	5.8	62	2.48	3.72
Fuel fabrication (Schneider 2010)			1.0	1.5
Construction of plant (Weissbach 2013)			3.0	3.0
Operation of plant (Weissbach 2013)			3.43	5.15
Fuel storage, waste storage, transport (ERDA 76-1, Perry 1977, Sweden 2002)			1.5	2.25
Decommissioning (Weissbach 2013)			0.9	0.9
Total			18.4	23.0
Output: 7.5 TWh/yr (86% capacity factor)	7500 GWh	27,000 TJ(e)	1080 PJ(e)	1620 PJ(e)
Input percentage of lifetime output			1.70%	1.42%
Energy return on investment (output/input)			59	70

Fonte: *World Nuclear Association* (2020a).

De acordo com o *Vattenfall's 2014 Environmental Product Declaration* (VATTENFALL, 2014), a planta nuclear de *Forsmark* obteve *inputs*¹⁹ na ordem de 3,8% durante sua vida útil; conseqüentemente, seu resultado foi de 56. No mesmo relatório, quando comparado por *inputs* de fazendas eólicas (6,3%), o EROI alcançado foi de 16 pontos nas suas premissas.

3.3 ASPECTOS PECULIARES DA DEMANDA E OFERTA DE URÂNIO

O mercado de urânio apresenta um modelo clássico de problema na oferta e demanda do bem. Pela ótica da oferta, desde a crise de 2008 até os dias atuais, ocorreu uma destruição de produtores globais. Enquanto isso, 55 novos reatores nucleares estão sob construção em 15 países e outros 100 sob planejamento com capacidade de gerar 120,000 Mwe, como também existem mais de 300 outros reatores

¹⁹ Expressão da língua inglesa que significa “entrada”.

propostos (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020). De acordo com a International Energy Agency (2019), em 2040, a capacidade total de geração energia elétrica a partir do urânio atingirá 13,109 GWe. Nesse cenário, surgem peculiaridades na oferta e demanda do urânio no mercado estudado a seguir.

3.3.1 Inelasticidade do preço de urânio

De acordo com Sandroni (2016), a elasticidade-preço é a relação entre a variação na quantidade procurada ou ofertada de um bem em uma variação relativa de seu preço. Quando o coeficiente for menor que 1, a demanda será inelástica, ou seja, uma variação percentual no preço resulta em uma variação percentual menor na quantidade demandada.

Entre os países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), os custos de um reator nuclear com combustível estão entre 1/3 e 1/2 do dispêndio total quando comparados a outras fontes de energia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2017). Conforme sugere o *US Nuclear Energy Institute* (2020 apud WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020b), uma usina termoeletrica à carvão despende 78% do seu custo total com a aquisição da matéria-prima. A termoeletrica à gás emprega 87% dos seus recursos na compra do combustível. Já, em relação ao reator nuclear, o gasto com combustível representa 14% do custo total da planta ou 34% – quando incluídos os custos de gestão e descarte de material.

Essa vantagem torna o preço-demanda do urânio (UO_2) inelástico para as *utilities* (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2020c). Assim, as plantas geradoras de energia nuclear preferem optar por fornecedores capazes de entregar a quantidade demandada na data dos contratos ou de dióxido de urânio de maior qualidade, ao invés da decisão baseada no preço.

3.3.2 Mercado de longo prazo x mercado spot

O mercado à vista (spot) de urânio é formado por negociadores que transacionam estoques disponíveis não comprados por *utilities* ou adjacentes de

outras formas de uso do mineral. Assim, cria-se uma cadeia de oferta secundária, na qual se alivia a necessidade de extração do minério do solo.

Como os compradores não possuem interesse na redução do preço de urânio, as companhias recorrem ao mercado spot para suprir sua demanda (ENCYCLOPEDIA BRITANICA, 2020d). Riaz Rizvi, diretor executivo e co-chair da *Fuel Report* da WNA, respaldou na *Kazatomprom Capital Markets Day* – evento formal de apresentação da empresa – que a companhia mineradora não tem interesse em celebrar contratos de longo-prazo (KAZATOMPROM NATIONAL ATOMIC COMPANY, 2019). Além disso, a *Kazatomprom* anunciou a redução do volume total de urânio em 20% entre 2018 e 2021, conforme o *Competent Persons' Report on the Mineral Assets of JSC Kazatomprom* (2018 apud KAZATOMPROM NATIONAL ATOMIC COMPANY, 2019).

Outra companhia mineradora, a canadense Cameco, está na mesma direção. Em seu *Conference Call*²⁰, na apresentação de resultados do 3º trimestre de 2019, executivos da empresa anunciaram que irão comprar mais urânio no mercado spot para celebrar seus contratos de curto prazo. Como, também, o baixo preço da *commodity* influenciou a empresa a fechar a mina mais produtiva de urânio do mundo: a *McArthur River* (GLOBE NEWSWIRE, 2017).

3.3.3 Underfeeding

As *utilities* compram o urânio necessário das mineradoras para enriquecê-lo e, conseqüentemente, abastecer os reatores nucleares. Para isso, a quantidade necessária de urânio a ser entregue deve estar de acordo com o nível requerido de U-235. As companhias de enriquecimento possuem certa flexibilidade para gerir o processo de transformação. Assim, caso uma *utility* demande determinado nível de enriquecimento, a enriquecedora pode subutilizar a centrífuga – equipamento usado para atingir a energia necessária do processo – em que parte do urânio natural é anulado (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020).

O excedente de urânio anulado permanece livre para a enriquecedora vendê-lo ou como *unidade de urânio enriquecido* ou como *urânio bruto*. Isso é conhecido como

²⁰CAMECO CORPORATION. **Quarterly reports - 2019 - Q3**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3e2hB4s>. Acesso em: 05 jul. 2020.

o *underfeeding*. Conforme o relatório da *World Nuclear Association 2015: Nuclear Fuel Report*, estima-se que o *underfeeding* tem o potencial de contribuir para os mercados de 5.700 a 800 tU/ano até 2025 (em conformidade com os padrões ocidentais). Tal fator é causado por uma assimetria de informação, uma vez que as *utilities* tentam controlar a flexibilidade nos contratos (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2015).

4 UM ESTUDO SOBRE O MERCADO DE URÂNIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E O IMPACTO NOS ATIVOS FINANCEIROS DE URÂNIO

O presente trabalho tem como objetivo mensurar os choques de preço sofridos no mercado de urânio futuro (UXXc1). A partir de um modelo vetorial autorregressivo (VAR), foi verificada a relação de interdependência entre o urânio e outras quatro variáveis – *commodities* utilizadas para produção de energia – e um intervalo de estoque de capital, que permitiram avaliar o impacto de choques estocásticos na variável dependente.

4.1 O QUE É MODELO VAR?

O VAR permite expressar modelos econômicos completos ou multivariados, possibilitando que se estimem os parâmetros desse modelo. A matriz de VAR define restrições entre as equações que a compõem e o estudo dessas restrições constitui a sua metodologia (BUENO, 2011). De modo geral, pode-se representar um modelo autorregressivo da seguinte forma:

$$AX_t = B_0 + \sum_{i=1}^p B_i X_{t-i} + B \varepsilon_t \quad (2)$$

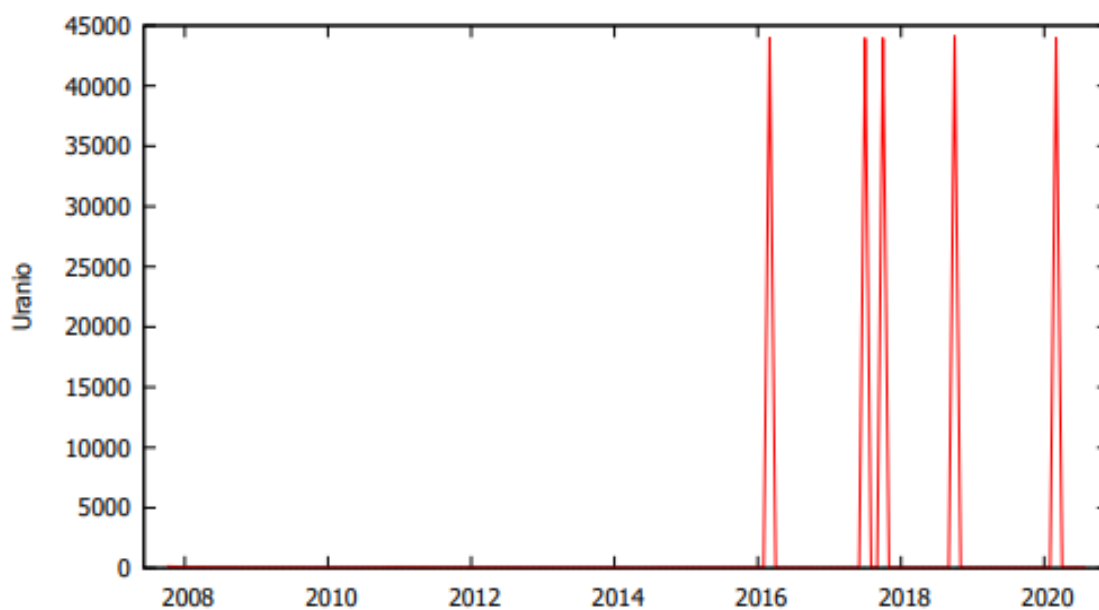
A Equação 2 expressa as relações por meio de variáveis endógenas. Os choques sofridos são denominados *estruturais*, pois afetam individualmente cada um dos intervalos endógenos. Esses choques são considerados independentes entre si, porque as inter-relações entre um choque e outro são absorvidas de forma indireta pela matriz A (BUENO, 2011).

4.1.1 Aplicação do modelo VAR

O modelo vetorial autorregressivo foi elaborado a partir de cinco variáveis – das quais quatro são *commodities* e uma representa o intervalo de estoque de capital. Os

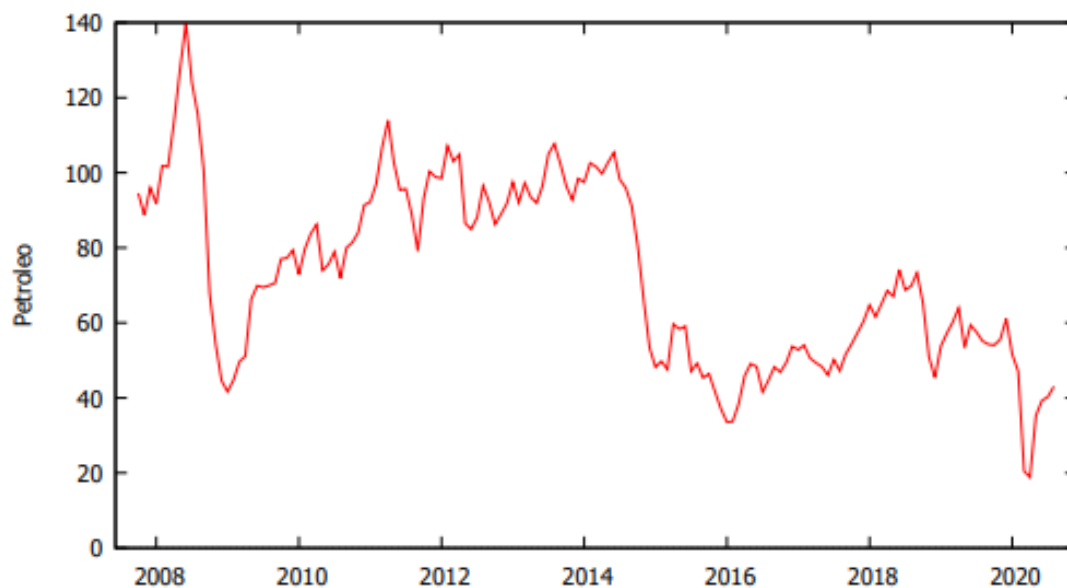
dados foram extraídos da Bolsa de Mercado Futuro de Nova Iorque (NYMEX: *New York Exchange Mercantile*). O período estudado apresenta dados de até duas décadas (2007:10) dada a disponibilidade estatística de cada variável.

Figura 9 – Gráfico de série temporal do preço de urânio em USD desde 10/2007



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software* *Gretl*.

Figura 10 – Gráfico de série temporal do preço de petróleo em USD desde 10/2007

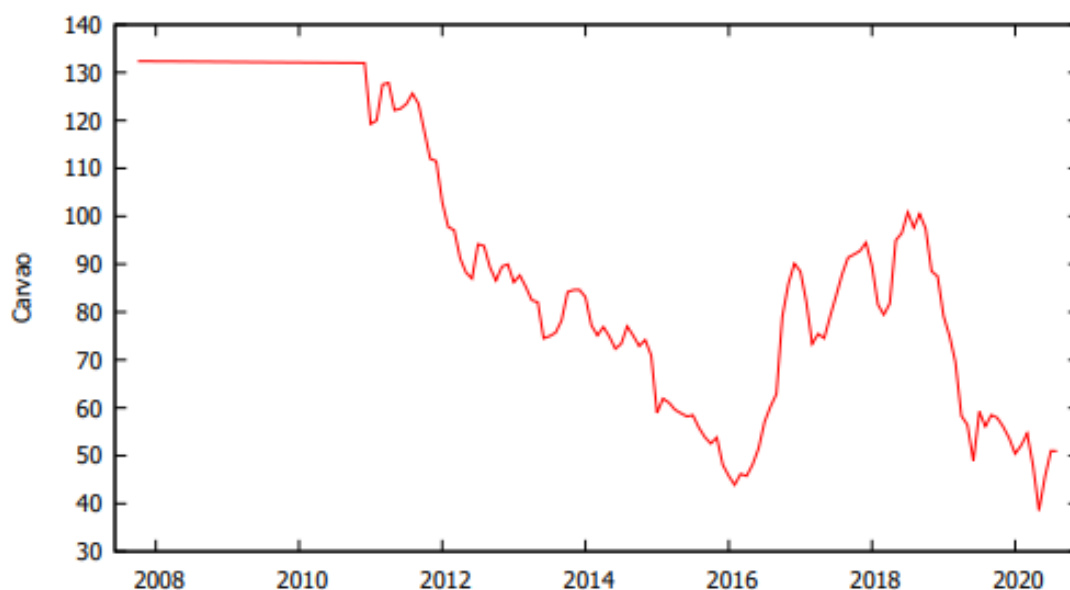


Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software* *Gretl*.

A Figura 10 representa o gráfico de série temporal do preço do petróleo. Nesta observam-se períodos abruptos de oscilação, devido à característica cíclica de uma *commodity*, todavia com uma tendência de regressão a média de longo prazo. Nota-se que, durante a série histórica, a oscilação máxima ocorreu no ano de 2008.

A Figura 11 apresenta o gráfico da série histórica de preço do carvão mineral.

Figura 11 – Gráfico de série temporal do preço do carvão em USD desde 10/2007

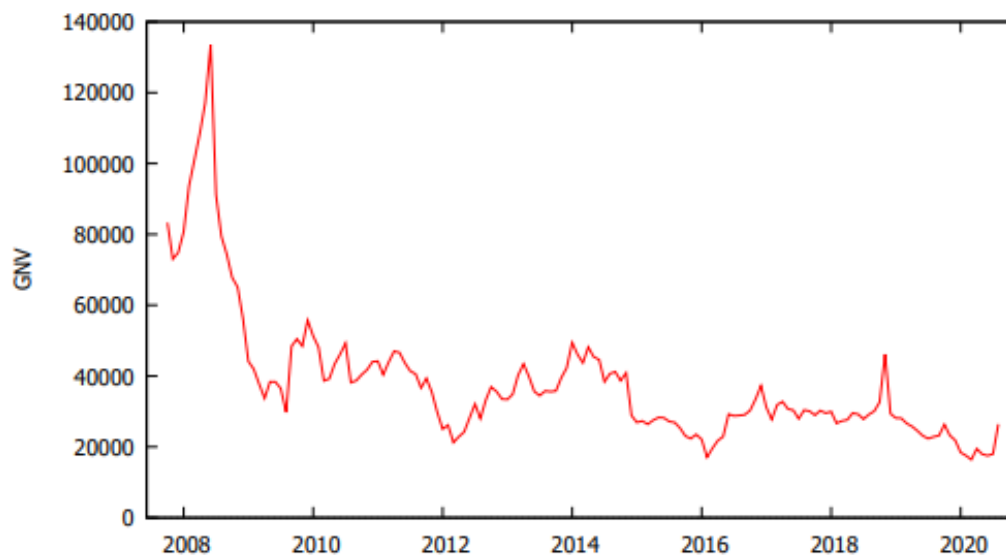


Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software Gretl*.

Observa-se, na Figura 11, que ao longo do período, o minério obteve preços decrescentes com uma recuperação entre os anos de 2016 e 2018. Verifica-se que, desde seu pico histórico, em meados de 2010, o preço não voltou a tais patamares.

A Figura 12 demonstra o preço histórico do gás natural veicular (GNV) na série especificada.

Figura 12 – Gráfico de série temporal do preço do GNV em USD desde 10/2007

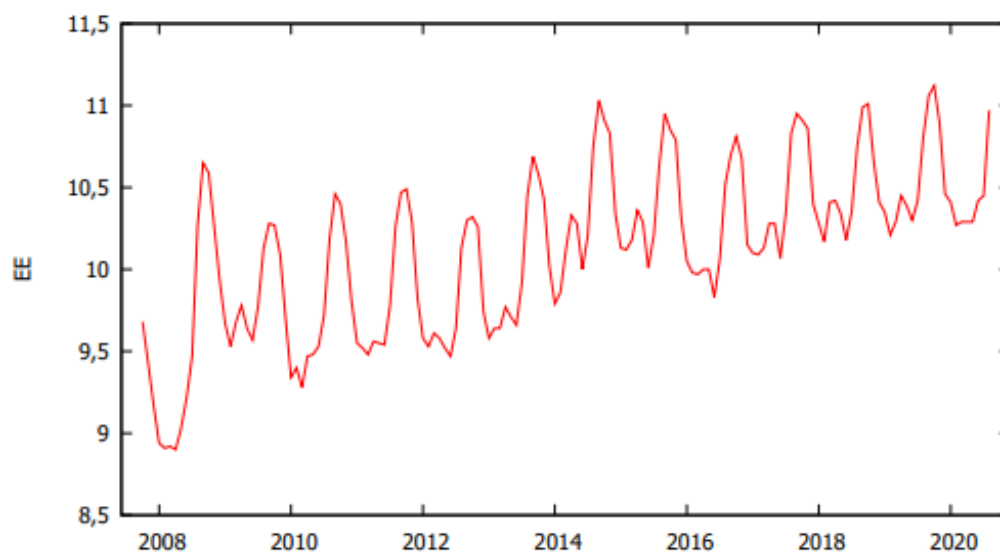


Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software Gretl*.

Pode-se perceber que o comportamento do gás natural atingiu sua máxima no ano de 2008 e, desde então, estabilizou-se em uma faixa de preço menor.

A Figura 13 demonstra o preço da energia elétrica para o consumo das famílias, nos Estados Unidos da América, desde o ano de 2007.

Figura 13 – Gráfico de série temporal do preço da energia elétrica em USD desde 10/2007



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software Gretl*.

Na Figura 13, é possível verificar que a energia elétrica varia entre os anos, porém apresenta uma alta contínua de preços durante o período de análise.

4.1.2 Teste de raiz unitária

O teste de Dickey e Fuller (1979) considera o erro um ruído branco – uma sequência de variáveis aleatórias não autocorrelacionadas. Porém, frequentemente, o erro é um processo estacionário aleatório. Assim, utiliza-se o teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) para modelos de raiz unitária. O objetivo é estimar o modelo com variáveis autorregressivas. Essa metodologia corrige o desvio do valor correto da regressão estatística, ou seja, busca encontrar os desvios em relação a sua média. Do ponto de vista prático, é necessário introduzir variáveis autorregressivas para que o teste de resíduos não rejeite a hipótese de tratar-se de um ruído branco (BUENO, 2011).

No presente trabalho, o teste de ADF tem como finalidade identificar a hipótese nula (H_0) de que existe raiz unitária na série temporal, cujo objetivo é rejeitá-la. A Tabela 1 apresenta o teste de raiz unitária ADF.

Tabela 1 – Teste de ADF

Nível	τ	τ_μ	τ_τ	Diferença	τ	τ_μ	τ_τ	I(.)*
I_Urânio	-3,45	-6,12466	-13,2169	Δ I_Urânio	-3,45			I(0)
I_Petróleo	-3,45	-2,38191	-3,21153	Δ I_Petróleo	-3,45	-9,44593	-9,41805	I(1)
I_Carvão	-3,45	-1,10033	-1,94323	Δ I_Carvão	-3,45	-9,6607	-9,62861	I(1)
I_GNV	-3,45	-2,63657	-2,88133	Δ I_GNV	-3,45	-11,7346	-11,7194	I(1)
I_EE	-3,45	-0,718683	-3,86936	Δ I_EE	-3,45	-4,04273	-3,86717	I(1)

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos pelo *software Gretl*.

*Estacionário em nível = (0)/ Estacionário em primeira diferença I(1).

Na Tabela 1, τ é o valor crítico; τ_μ refere-se ao teste com constante e sem tendência; τ_τ ao teste com constante e com tendência. Para 155 observações com coeficiente angular de 95%, a partir da tabela de valores limites da estatística *tau*, o valor crítico identificado é de -3,45. A partir das informações tabeladas, é extraída a ordem de integração das variáveis, na qual os preços de urânio apresentam estacionariedade em primeiro nível. O petróleo, o carvão, o GNV e a energia elétrica estacionam em primeira diferença.

A Tabela 2 demonstra o teste de raiz unitária de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt e Shin (KPSS).

Tabela 2 – Teste de KPSS

Valores críticos				
10% (0,349) 5% (0,462) 1%(0,738)				
Nível	Estatística de teste	Diferença	Estatística de teste	Integração*
I_Urânio	0,632972	Δ I_Urânio	0,0162144	I(1)
I_Petróleo	1,48954	Δ I_Petróleo	0,03145	I(1)
I_Carvão	2,36671	Δ I_Carvão	0,0732396	I(1)
I_GNV	1,61798	Δ I_GNV	0,0860616	I(1)
I_EE	1,92216	Δ I_EE	0,0154007	I(1)

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos pelo *software Gretl*.

*Estacionária em nível = (0)/Estacionária em primeira diferença = I(1).

O teste de KPSS, ao contrário do teste de ADF, exige que a estatística de teste aceite a H_0 . Pode-se notar que o primeiro teste foi realizado com a variável em nível; o segundo teste, por sua vez, foi executado com a variável em primeira diferença.

A Tabela 2 demonstra os resultados do teste de KPSS. Os valores críticos para os níveis de significância de 10%, 5% e 1% foram, respectivamente, 0,349; 0,462; 0,738. Para o resultado do teste acima, a hipótese nula (H_0) será aceita. Assim, conclui-se que todas as variáveis estacionam na primeira diferença de teste.

4.1.3 Teste de cointegração

Em termos econômicos, pode-se afirmar que quando duas variáveis possuem alguma correlação de longo prazo – mesmo que cada uma destas apresente alguma tendência – ambas irão se comportar de maneira semelhante, sendo a diferença entre elas estacionária (WILHER, 2014). O teste assume que cada uma das variáveis não será, por si só, estacionária; no entanto, os resíduos da regressão de cointegração deverão ser estacionários. A Tabela 3 apresenta a regressão de cointegração e utiliza a série histórica entre 2007:10 a 2020:08, com o total de 155 observações.

Tabela 3 – Regressão de cointegração

	Coefficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor	
const	128,255	42,2575	3,035	0,0028	***
i_Carvão	0,195865	0,0952343	2,057	0,0415	**
i_GNV	0,441104	0,0942809	4,679	6,40e-06	***
i_EE	-0,810997	0,372541	-2,177	0,0310	**
i_Urânio	-0,000514194	0,000286503	1,795	0,0747	*

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos pelo *software Gretl*.

Observa-se, na Tabela 3, que todas variáveis foram significativas para o modelo, sem a necessidade de exclusão destas, apresentando o *i_petróleo* como variável dependente.

4.1.4 Seleção de defasagens

A Tabela 4 constatou o número de defasagens necessário para incorporar a estimação do modelo VAR. No presente modelo, verificam-se três critérios: Akaike (AIC); Bayesiano de Schwarz (BIC) e Hannan-Quinn (HQC).

Tabela 4 – Seleção de defasagens VAR

defas.	log.L	p(LR)	AIC	BIC	HQC
1	-3009,12035		42,505180	43,126755*	42,757758
2	-2951,06151	0,00000	42,042818*	43,182374	42,505879*
3	-2936,95585	0,29822	42,195187	43,852722	42,868730
4	-2921,04627	0,16331	42,322325	44,497841	43,206351
5	-2908,13945	0,41760	42,491461	45,184956	43,585968
6	-2893,92670	0,28864	42,642331	45,853806	43,947321
7	-2877,35151	0,12735	42,760161	46,489616	44,275633
8	-2848,76316	0,00025	42,709974	46,957409	44,435928
9	-2812,59851	0,00000	42,553825	47,319240	44,490262
10	-2781,72341	0,00006	42,471656	47,755050	44,618575
11	-2743,93079	0,00000	42,292738	48,094112	44,650139
12	-2710,09385	0,00001	42,169145	48,488499	44,737028

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

*Melhores valores de defasagem

Segundo as informações contidas na Tabela 4, os (*) indicam os melhores valores de defasagem para os critérios AIC, BIC e HQC. Assim, o número ótimo de defasagens ocorrerá entre os intervalos 1 e 2 do modelo.

4.2 ESTIMAÇÃO DO MODELO VAR

O melhor modelo encontrado foi com quatro graus de defasagem. Neste, a estatística de qui-quadrado para 25 graus de liberdade é de 29,1407. Desse modo, o valor calculado localiza-se dentro do intervalo, conforme demonstra a Tabela 5. Essa tabela apresenta o teste para maior defasagem do modelo.

Tabela 5 – Teste para a maior defasagem VAR

Hipótese nula	Hipótese alternativa	Teste de razão verossimilhança
maior lag é 3	maior lag é 4	qui-quadrado(25) = 29,1407 [0,2581]
Comparação dos critérios de informação		
	Ordem de defasagem 3	Ordem de defasagem 4
AIC	43,2354	43,3745
BIC	44,8411	45,4819
HQC	43,8878	44,2307

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

4.2.1 Equações do sistema VAR

O modelo VAR é composto por cinco equações, conforme elucidado na Tabela 6.

Tabela 6 – Equação 01:d_i_Petróleo

	Coeficiente	Erro Padrão	razão-t	p-valor	
const	-0,164662	0,651107	-0,2529	0,8008	
d_i_Petroleo_1	0,203043	0,0922258	2,202	0,0295	**
d_i_Petroleo_3	-0,163819	0,0878508	-1,865	0,0645	*
d_i_GNV_2	0,184520	0,0939914	1,963	0,0518	*
d_i_GNV_3	0,261624	0,0949576	2,755	0,0067	***
d_i_EE_4	-0,748312	0,334038	-2,240	0,0268	**
i_Urânio_2	0,000252640	0,000109089	2,316	0,0221	**

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

Na equação apresentada na Tabela 6, pode-se observar que o número de defasagens que apresentam significância para o modelo é a mesma em todas variáveis (4). Dessa forma, é possível visualizar os choques sobre a variável dependente (d_i_petróleo).

Tabela 7 – Equação 02: d_i_Carvão

	Coeficiente	Erro Padrão	razão-t	p-valor	
const	-0,276351	0,290963	-0,9498	0,3440	
d_i_Carvao_1	0,211328	0,0896348	2,358	0,0199	**

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

Na equação representada na Tabela 7, observa-se que o número de defasagens necessário para haver significância foi de quatro intervalos na variável d_i_Carvão_1. Assim, apresentam-se os choques sobre a variável dependente (d_i_Carvão).

Tabela 8 – Equação 03: d_i_GNV

	Coeficiente	Erro Padrão	razão-t	p-valor	
const	-0,450398	0,639456	-0,7043	0,4825	
i_Urânio_1	0,000184169	0,000107738	1,709	0,0898	**

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

Na Tabela 8, a equação expõe que o número de defasagens para explorar uma variável significativa foi de 4 em i_Urânio_1. Para a expressão matemática anterior, mostra-se o choque sobre a variável dependente (d_i_GNV).

A Tabela 9 apresenta a equação relacionada à EE.

Tabela 9 – Equação 04: d_i_EE

	Coeficiente	Erro Padrão	razão-t	p-valor	
const	0,204180	0,177832	1,148	0,2530	
d_i_GNV_1	-0,0569724	0,0257610	-2,212	0,0288	**
d_i_GNV_2	0,0437699	0,0256712	1,705	0,0906	*
d_i_GNV_4	0,0574562	0,0259088	2,218	0,0283	**
d_i_EE_1	0,567817	0,0889534	6,383	<0,0001	***
d_i_EE_2	-0,304494	0,102782	-2,963	0,0036	***
d_i_EE_4	-0,206292	0,0912334	-2,261	0,0254	**

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

A expressão exibida na Tabela 9 estabilizou os intervalos em 4 defasagens para o modelo expressar significância. Na equação, nota-se o choque sobre a variável dependente (Equação 04: d_i_EE).

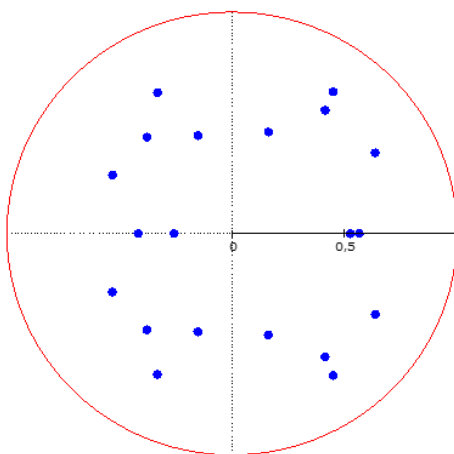
Tabela 10 – Equação 05: $d_i_Urânio$

	Coefficiente	Erro Padrão	razão-t	p-valor	
const	1113,72	527,409	2,112	0,0366	
$d_i_Carvao_1$	312,374	162,475	1,923	0,0567	*
$d_i_EE_1$	-438,666	263,815	-1,663	0,0988	*
$d_i_EE_2$	531,739	304,828	1,744	0,0835	*

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

A equação da Tabela 10 apresenta significância na quarta defasagem em três variáveis. Para 5, estimou-se o choque sobre a variável dependente ($d_i_Urânio$).

Figura 14 – Gráfico de raízes inversas do modelo VAR



Fonte: elaborado pelo autor com dados do *software Gretl*.

O teste representado na Figura 14 verificou se as matrizes de vetores são estacionárias. Conforme o gráfico, todas raízes inversas encontram-se dentro do perímetro do círculo. Este resultado significa que o modelo demonstrou estabilidade estatística. Comprovando-se, dessa maneira, a estacionariedade das variáveis.

4.2.2 Decomposição da variância

Tabela 11 – Decomposição da variância para o preço do urânio

Período	Erro padrão	d_i_urânio	d_i_Petróleo	d_i_Carvão	d_i_GNV	d_i_EE
1	5328,37	100	0	0	0	0
24	5644,13	92,0625	1,0699	2,2776	0,1865	4,4035

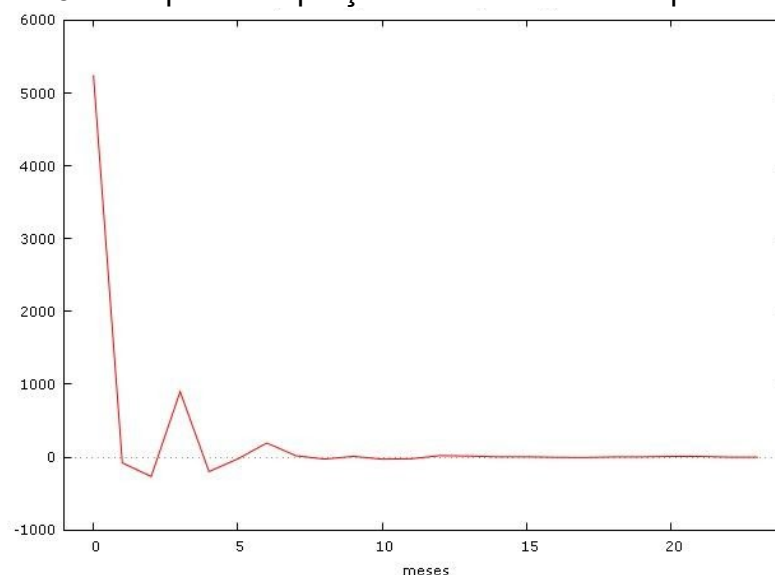
Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos do *software Gretl*.

A partir da Tabela 11, é possível mensurar a oscilação das variáveis, de acordo com o período estimado. O intervalo de urânio possui aproximadamente 8% de variabilidade para 24 meses. Enquanto, para as variáveis defasadas, a EE apresentou a maior oscilação, atingindo 7,52%; seguida por GNV, petróleo e carvão.

4.2.3 Função impulso-resposta

Uma função de impulso-resposta delimita o comportamento de séries temporais incluídas no modelo autorregressivo em conformidade com choques ou mudanças provocadas por variáveis residuais (MAYORGA *et al.*, 2007). Na Figura 15, é possível verificar a reação do preço do urânio a um choque sobre ele mesmo.

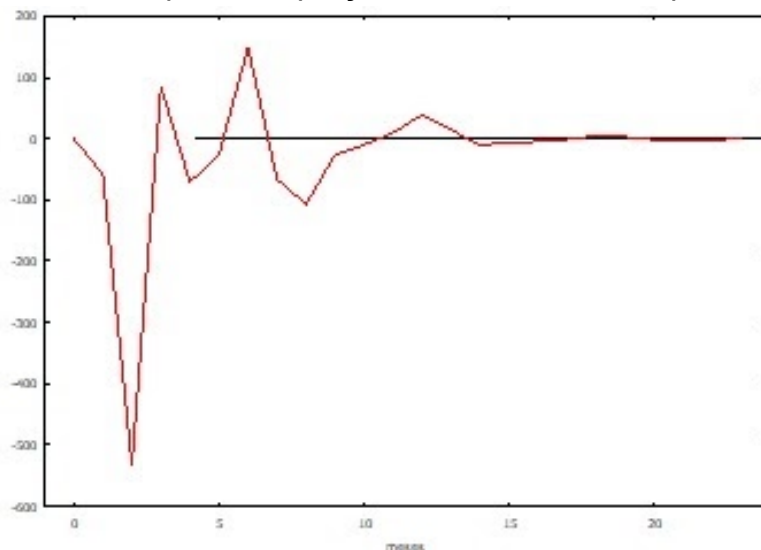
Figura 15 – Resposta do preço de urânio a um choque de urânio



Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos no *software Gretl*.

A Figura 15 representa o gráfico da função impulso-resposta do choque sobre o preço de urânio a um choque sobre ele mesmo. Observa-se que o impacto sofrido pela variável dependente oscila entre -200 e 5.200 até o 8º mês; a partir de então, verificou-se estabilidade ou absorção do impacto.

Figura 16 – Resposta do preço de urânio a um choque de petróleo

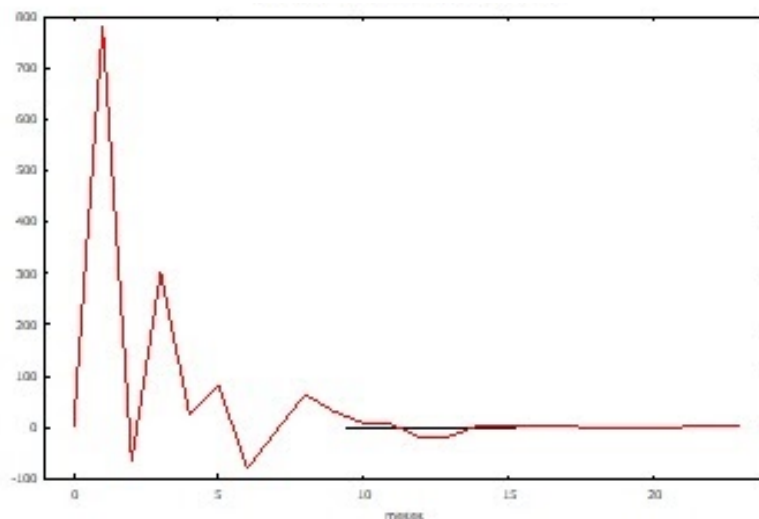


Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos no *software Gretl*.

A Figura 16 exibe o gráfico da função impulso-resposta do choque sobre o preço de urânio a um choque da variável $d_i_Petróleo$. Constata-se que o impacto sofrido pela variável dependente oscila entre -500 e 150 até o 19º mês, em que – a partir de então – verificou-se estabilidade ou absorção do impacto.

A Figura 17 apresenta o gráfico da função impulso-resposta do choque sobre o preço de urânio a um choque da variável $d_i_Carvão$

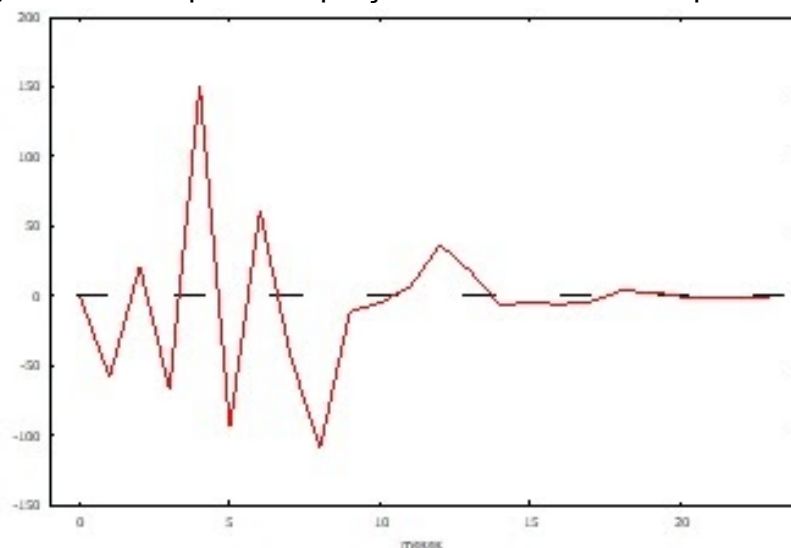
Figura 17 – Resposta do preço de urânio a um choque de carvão



Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos no *software Gretl*.

Nota-se, na Figura 17, que o impacto sofrido pela variável dependente oscila entre -100 e 800 até o 10º mês. Após esse período, observa-se estabilidade ou absorção do impacto.

Figura 18 – Resposta do preço de urânio a um choque de GNV

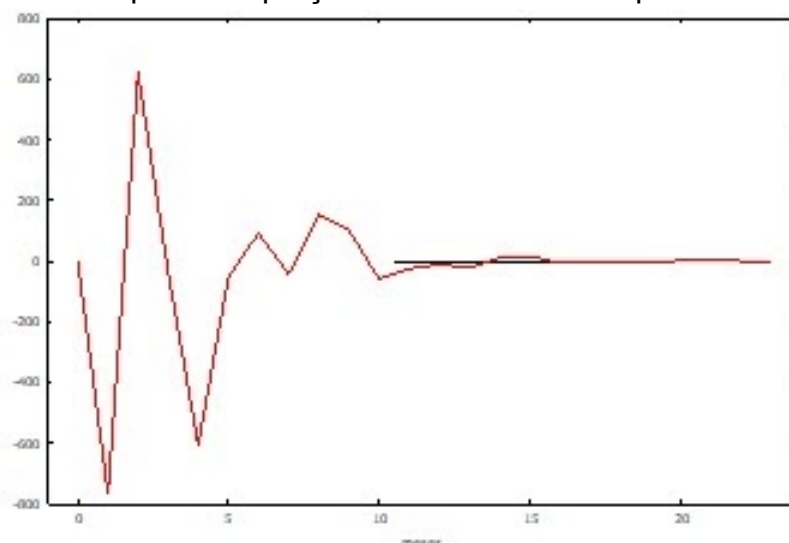


Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos no *software Gretl*.

Está exposto, na Figura 18, o gráfico da função impulso-resposta do choque sobre o preço de urânio a um choque da variável d_i_GNV . Neste exemplo, o impacto

sofrido pela variável dependente oscila entre -120 e 150 até o 19º mês; a partir de então, percebe-se estabilidade ou absorção do impacto.

Figura 19 – Resposta do preço de urânio a um choque de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor com os dados obtidos no *software Gretl*.

A Figura 19 apresenta o gráfico da função impulso-resposta do choque sobre o preço de urânio a um choque da variável d_i_EE . É possível visualizar que o impacto sofrido pela variável dependente oscila entre -800 e 650 até o 15º mês. Após esse período, o impacto torna-se estável ou é absorvido.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em conformidade com a função impulso-resposta, em um choque de energia elétrica, a variável independente ($i_urânio$) possui a maior amplitude de variação. O resultado do choque de EE cria uma oscilação de -800 a 650 graus, estabilizando-se no 15º mês. Assim, pode-se concluir que tal variável detém maior influência sobre o comportamento do preço de urânio a um choque exógeno.

Enquanto o estoque de capital apresenta o choque de maior amplitude, o intervalo de petróleo ($d_i_petróleo$) possui maior período de oscilação. Para este, a magnitude de impacto oscila entre -500 e 150 graus até o 19º mês. Isso significa que o

resultado obtido a partir dessa função é capaz de afetar o preço de urânio por um período maior de tempo.

Para um impacto de GNV (d_{i_GNV}), a amplitude de oscilação varia entre -120 e 150 graus até o 19º mês. Entre as demais variáveis, esta é a de menor significância para explicar o comportamento do preço de urânio. Porém, nota-se um comportamento diferente das demais. Sua maior influência na variável independente ocorre entre o 4º período até o 8º mês. Desta maneira, a capacidade do GNV afetar o preço de urânio se dá em um período mais longo de tempo – após o choque da variável dependente.

O choque de carvão sobre o urânio oscila a variável entre -100 e 800 graus até o 10º mês. Após o choque ocorrido, pode-se notar uma abrupta variabilidade, já aparente no 1º período. O que o gráfico informa é que, no intervalo subsequente ao choque, o preço de urânio possui uma rápida resposta; no entanto, esta influência não permanece significativa ao longo do período. Assim, a partir do 5º grau, a variável independente oscila em volta do intercepto inicial, estabilizando-se no 10º mês.

Para um choque de urânio sobre ele mesmo, o comportamento – também – é de menor significância. A amplitude do gráfico oscila em volta do intercepto já no 1º mês; a absorção total do impacto, por sua vez, ocorre no 8º mês. Portanto, pode-se concluir que a variável de estoque de capital de energia elétrica possui maior impacto amplitudinal no comportamento do preço de urânio. Assim, satisfazendo a hipótese de choque-resposta no preço de urânio.

5 CONCLUSÃO

A saída de uma série de países da pobreza, principalmente, aqueles no Sul da Ásia, trouxe uma elevação no padrão de vida médio mundial e no arquétipo de consumo dessas sociedades. Tal economia tem sido baseada na produção de escala, a qual é intrinsecamente dependente da capacidade de geração de energia elétrica. Conforme as fontes de energia não-renováveis saturaram-se, ao longo do tempo, a demanda por uma geração de energia elétrica descarbonizada tornou-se urgente.

Dessa forma, introduz-se o mercado de urânio para geração de energia nuclear no atual cenário mundial. A partir da fissão nuclear do isótopo de urânio enriquecido (U308), é possível extrair uma energia custo-benefício maior que de suas fontes pares, dotada de maior previsibilidade e livre de emissão de CO₂. Como, também, apresentando o maior EROI – métrica de valor absoluto para mensurar a quantidade de energia elétrica gerada dado os *inputs* necessários – entre seus pares.

Atualmente, o mercado de mineração de urânio está inserido em um modelo de oligopólio econômico. Existem poucos produtores que abastecem grande parte do mercado mundial. Isso se deve à persistente pressão sobre o preço do urânio no mercado spot, que eliminou competidores com menores vantagens comparativas. No entanto, nos próximos anos, serão introduzidos uma série de novos reatores nucleares para produção de energia elétrica – estes, concentram-se na China, Índia e religamentos no Japão e França.

Ao considerar o recente panorama para o mercado de urânio, em que há um intervalo da curva de oferta frente à demanda necessária, cortes no nível de mineração de urânio e inelasticidade preço-demanda para as *utilities*, identifica-se uma assimetria de valor dado a um suposto choque exógeno de preço na variável dependente (urânio).

Deste modo, para chegar na hipótese postulada foram gerados modelos econométricos VAR, com o intuito de reproduzir a função impulso-resposta de uma variável escolhida sobre o intervalo de dependência. Assim sendo, conclui-se que um choque do estoque de capital de energia elétrica detém o maior impacto na amplitude do comportamento do preço de urânio. Ao passo que a variável petróleo possui maior

influência no espaço-tempo, estabilizando-se no maior de todos os intervalos analisados; seguidos pelos choques de carvão e GNV sobre a mesma variável.

Assim sendo, o comportamento do preço do urânio possui uma rápida resposta em um possível cenário de choques externos. A variável dependente reage rapidamente no modelo e, em todos os casos, absorve o choque em um período máximo de 19 meses. Esses resultados ajudaram no entendimento da previsibilidade de um suposto choque de alguma das variáveis exógenas sobre o mercado de mineração de urânio destinado à geração de energia elétrica.

Para trabalhos futuros, é recomendado visitar a teoria dos contratos para englobar os aspectos de regulações de mercado. Já que toda cadeia de urânio é regulada. Assim, uma melhor conclusão poderá ser obtida sob aspecto da fronteira de eficiência dos mercados. Também, é importante notar o papel de seus substitutos mais próximos – como o material Tório (Th) – para vislumbrar quais serão os métodos mais eficazes de produção de energia nuclear, juntamente com suas respectivas curvas de demanda e oferta.

REFERÊNCIAS

- AMAZONAS, Maurício de Carvalho. Economia ambiental neoclássica e desenvolvimento sustentável. *In*: NOBRE, Marcos; AMAZONAS, Maurício de Carvalho. **Desenvolvimento sustentável**: a institucionalização de um conceito. Brasília: Ibama, 2002a. p. 5-30.
- AMAZONAS, Maurício de Carvalho. Desenvolvimento sustentável e a economia ecológica. *In*: NOBRE, Marcos; AMAZONAS, Maurício de Carvalho. **Desenvolvimento sustentável**: a institucionalização de um conceito. Brasília: Ibama, 2002b. p. 35-70.
- ANDRADE, Daniel Caixeta. Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica. **Leituras de Economia Política**, Campinas, v. 1, p. 1-31, ago./dez. 2008.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Australia's in situ recovery uranium mining best practice guide**: groundwaters, residues and radiation protection. Canberra, AUS: Geoscience Australia, 2010.
- BP ENERGY OUTLOOK. **Human development index and energy consumption per head, 2017**. 2017. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/human-development-index-and-energy-consumption-per-head-2017-eo19-p22-l.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- BRASIL ESCOLA. **Fissão nuclear**. 2020. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fissao-nuclear.htm>. Acesso em: 29 out. 2019.
- BUENO, Rodrigo de Losso da Silveira. **Econometria de séries temporais**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- CHEN, James. **Energy return on investment (EROI)**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3eb0CNn>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Relatório Brundtland**: nosso futuro comum. Oxônia: Oxford University Press, 1987.
- DEMO, Pedro. **Introdução à metodologia da ciência**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985.
- DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Clean energy**. 2017. Disponível em: <https://www.energy.gov/science-innovation/clean-energy>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- DICKEY, David; FULLER, Wayne. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. **Journal of the American Statistical Association**, Boston, v. 74, n. 366, 427-431, jun. 1979.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Uranium**: chemical element. 2020a. <https://www.britannica.com/science/zinc-group-element/Toxicity-of-the-elements>. Acesso em: 29 out. 2019.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Pareto-optimality**. 2020b. Disponível em <https://www.britannica.com/topic/Pareto-optimality>. Acesso em: 03 jul. 2020.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, **Public utilities**. 2020c. Disponível em: <https://bit.ly/2VXwyi2>. Acesso em: 05 jul. 2020.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, **Spot-exchange market**. 2020d. Disponível em: <https://bit.ly/2Dkm1ae>. Acesso em: 05 jul. 2020.

GLOBALNEWswire. **Cameco to suspend production from McArthur River and Key Lake operations and reduce its dividend**. 2017. Disponível em: [https://www.globenewswire.com/news-release/2017/11/08/1315878/0/en/Cameco-to-spend-production-from-McArthur-River-and-Key-Lake-operations-and-reduce-its-dividend.html](https://www.globenewswire.com/news-release/2017/11/08/1315878/0/en/Cameco-to-suspend-production-from-McArthur-River-and-Key-Lake-operations-and-reduce-its-dividend.html). Acesso em: 20 ago. 2020.

GONZALEZ, Amelia. Poluição do ar mata 7 milhões por ano, a maioria em países pobres, diz OMS. **G1**. Rio de Janeiro, 02 mai. 2018. Acesso em 19 nov. 2019.

HACKETT, Steven C. **Environmental and natural resources economics**: theory, policy and the sustainable society. 3. ed. New York: M.E. Sharpe, 2006.

HAMILTON, James D. **Historical oil shocks**. 2011. 52f. Working Paper nº. 16.790 (Department of Economics) – National Bureau of Economic Research. Cambridge: USA, 2011.

HOTELLING, Harold. The economics of exhaustible resources. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 39, n. 2, p. 137-175, apr. 1931.

INSTITUTE OF CORPORATE FINANCE. **What is the levelized cost of energy (LCOE)?**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2ZK9vIF>. Acesso em: 05 jul. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy demand grew by 2.1% in 2017, and carbon emissions rose for the first time since 2014**. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/news/global-energy-demand-grew-by-21-in-2017-and-carbon-emissions-rose-for-the-first-time-since-2014>. Acesso em: 05 jul. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Acesso em: 25 nov. 2019.

KAZATOMPROM NATIONAL ATOMIC COMPANY. **Capital markets day**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/2ZKd0Pj>. Acesso em: 05 jul. 2020.

LINDSEY, Rebecca. **Climate and Earth's energy budget**. 2009. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>. Acesso em: 20 mai. 2020.

MANKIW, Nicholas Gregory. **Princípios de microeconomia**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

MAY, Peter Herman. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MAYORGA, Rodrigo de Oliveira et al. Análise de transmissão de preços do mercado atacadista de melão do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v.45, n. 3, p. 675-704, set. 2007.

MILLER, David; BAMBROUGH, Kevin (Eds.). **Investing in the great uranium bull market: a practical investors guide to uranium stocks**. Sarasota, FL: Stockinterview Com, 2007.

OSTROM, Elinor. **Governing the commons: the evolution of institutions for collective action**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

PEARCE, David W; TURNER, R. Kerry. **Economics of natural resources and the environment**. Londres: Harvester Wheatsheaf, 1990.

PINDYCK, Robert; RUBINFELD, Daniel. **Microeconomia**. 8. ed. atual. São Paulo: Pearson Universidades, 2013.

RÜHL, Christof; GILJUM, Joseph. **BP energy outlook 2030**. 2011. Disponível em: <https://www.imf.org/external/np/res/commod/pdf/ppt/BP0113.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2020.

SANDRONI, Paulo. **Dicionário de economia do século XXI**. Rio de Janeiro: Record, 2016.

STEINBERGER, Julia. **Energising human development**. 2016. Disponível em: <http://hdr.undp.org/en/content/energising-human-development>. Acesso em: 15 mai. 2020.

SUWWAN, Leila. IPCC defende redução de 80% das emissões mundiais até 2015. **O Globo**. Rio de Janeiro, 29 mar. 2008. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/ipcc-defende-reducao-de-80-das-emissoes-mundiais-ate-2015-3605058>. Acesso em: 29 ago. 2020.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: agenda 2030 for sustainable development**. 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2VVJKUy>. Acesso em: 04 jul. 2020.

UNITED NATIONS. **Revision of world urbanization prospects**. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3iDRzlj>. Acesso em: 05 jul. 2020.

VAN DEN BERGH, Jeroen. Ecological economics: themes, approaches, and differences with environmental economics. **Regional Environmental Change**, [S.l.], v. 1, p. 13-23, ago. 2001. Disponível em: <https://bit.ly/2KzKrjB>. Acesso em: 30 set. 2019.

VANDENBOSCH, Robert; HUIZENGA, John. **Nuclear fission**. Cambridge: Academic Press, 1973.

VARIAN, Hal R. **Microeconomia**: uma abordagem moderna. 9. ed. Tradução: Regina Célia Simille de Macedo. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. *E-book*.

VATTENFALL. **Toward a more sustainable energy portfolio**: annual and sustainability report 2014. Stockholm: Vattenfall, 2014. *E-book*.

WILHER, Vitor. **Cointegração e inflação de serviços**. 2014. Disponível em: <https://analisemacro.com.br/economia/ensino-de-economia-economia/cointegracao-e-inflacao-de-servicos/>. Acesso em: 18 ago. 2020.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **2015 – Nuclear fuel report**. 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3gChC0F>. Acesso: 05 jul. de 2020.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Uranium markets**. 2019. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-markets.aspx>. Acesso em: 10 nov. 2019.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Energy return on investment**. 2020a. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energy-return-on-investment.aspx>. Acesso em: 14 jun. 2020.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Economics of nuclear power**. 2020b. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>. Acesso em 20 jun. 2020.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **World uranium mining production**. 2020c. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>. Acesso em: 20 mai. 2020.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Demand and production of uranium**. 2020d. Disponível em <https://www.world-nuclear.org/>. Acesso em: 14 jun. 2020.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. Novo relatório do IPCC sobre aquecimento de 1,5°C pede mais esforços para ação climática. **WWF**. 08 out. 2018. Disponível em:

<https://www.wwf.org.br/?67822/Relatrio-do-IPCC-2018-sobre-aquecimento-global-de-15-C-incita-mais-esforos-para-aoclimtica-global>. Acesso em: 10 nov. 2019.