



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

Thiago Maia Pereira Campos

MERCADO EUROPEU DE GÁS NATURAL, RÚSSIA E GUERRA DA UCRÂNIA: UMA
ANÁLISE POR TEORIA DOS JOGOS

Rio de Janeiro

Julho 2024

Thiago Maia Pereira Campos

MERCADO EUROPEU DE GÁS NATURAL, RÚSSIA E GUERRA DA UCRÂNIA: UMA
ANÁLISE POR TEORIA DOS JOGOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientador: Pedro James Frias Hemsley

Rio de Janeiro

Julho 2024

C422m

Campos, Thiago Maia Pereira
MERCADO EUROPEU DE GÁS NATURAL, RÚSSIA E GUERRA DA
UCRÂNIA: UMA ANÁLISE POR TEORIA DOS JOGOS /
Thiago Maia Pereira Campos. -- Rio de Janeiro, 2024. 40 f.

Orientador: Pedro James Frias Hemsley.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Economia, Programa de Pós-Graduação em Economia,
2024.

1. teoria dos jogos. 2. energia. 3. gás natural. 4. sanções. 5. conflito.
I. Hemsley, Pedro James Frias , orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Thiago Maia Pereira Campos

MERCADO EUROPEU DE GÁS NATURAL, RÚSSIA E GUERRA DA UCRÂNIA: UMA
ANÁLISE POR TEORIA DOS JOGOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Rio de Janeiro, 15 de julho de 2024.

Prof. Dr. Pedro James Frias Hemsley - Presidente
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^a. Dr^a. Edmar Luiz Fagundes de Almeida – Membro Externo
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ)

Prof. Dr. Flavio Luiz Alves Flores de Moraes – Membro Externo
Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPEAD (UFRJ)

Dedico esse trabalho à Deborah, João e Vinícius.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tantas oportunidades e tantas coisas boas concedidas a mim.

A Deborah, João Pedro e Vinícius, meus agradecimentos por vocês fazerem parte da minha vida, por me fazerem feliz e minhas desculpas pelos momentos que deixamos de estar juntos. $U_{Thiago} = Deborah + João + Vini = \infty$

A meus pais e irmão, pelo amor que sempre me deram.

Aos meus sogros, pela ajuda com as crianças quando eu precisava desesperadamente estudar.

Ao meu orientador, Pedro Hemsley, por toda amizade, paciência e aprendizado.

Aos colegas de mestrado, especialmente Adriano, Marcus e Pedro, pela boa companhia e pelas boas ideias que trocamos tantas vezes.

Aos colegas de atraso, mestrandos anônimos, pela ajuda nos momentos de desânimo e os “empurrões” para frente.

Politicians hide themselves away

They only started the war

Why should they go out to fight?

They leave that role to the poor, yeah

Time will tell on their power minds

Making war just for fun

Treating people just like pawns in chess

Wait till their judgement day comes, yeah!

Ozzy Osbourne, Terence Butler, William Ward e Frank Iommi

(War Pigs, 1970)

RESUMO

Durante décadas a Europa se tornou mais dependente do gás russo e a invasão da Ucrânia pela Rússia provocou uma crise energética de proporções mundiais. O objetivo desta dissertação é analisar o mercado de gás natural europeu e sua interação estratégica com a Rússia e a decisão europeia de aplicar sanções neste mercado em resposta à invasão russa da Ucrânia em 2022, através de uma metodologia de teoria dos jogos. A decisão europeia por aumentar seu consumo de gás russo envolve decisões de investimento de longo prazo que a tornam mais dependente deste gás no futuro. A Rússia pode julgar em um segundo período que a dependência europeia de seu gás torna menos provável uma retaliação através de sanções caso decida começar um conflito. O modelo desenvolvido neste trabalho aborda essa relação de dependência, decisões de demanda e oferta de gás e a ligação deste mercado com a decisão pela adoção ou não de sanções contra a Rússia. Concluímos que o aumento de dependência do gás russo pode levar a um aumento do preço cobrado pela Rússia no futuro, aumentando suas receitas, e ao mesmo tempo piorar a capacidade da Europa de reagir a qualquer política agressiva russa. Logo, o planejamento energético deve levar em conta os riscos à segurança no fornecimento e as vulnerabilidades políticas que a dependência de um fornecedor pode provocar.

Palavras-chave: teoria dos jogos; energia; gás natural; sanções; conflito.

ABSTRACT

Over the course of several decades, Europe has become increasingly dependent on Russian gas, and Russia's invasion of Ukraine triggered a global energy crisis. The objective of this dissertation is to analyze the European natural gas market, its strategic interaction with Russia, and the European decision to impose sanctions on this market in response to the Russian invasion of Ukraine in 2022, using a game theory methodology. The European decision to increase its consumption of Russian gas involves long-term investment decisions, which make the region more reliant on this resource in the future. Russia may assess, at a later stage, that Europe's dependence on its gas reduces the likelihood of retaliation through sanctions, should it choose to initiate a conflict. The model developed in this study addresses this relationship of dependence, decisions related to gas demand and supply, and the connection between this market and the decision to adopt or refrain from imposing sanctions on Russia. We conclude that the increasing dependence on Russian gas may lead to higher prices charged by Russia in the future, boosting its revenues while simultaneously weakening Europe's ability to respond to any aggressive Russian policies. Therefore, energy planning must consider the risks to supply security and the political vulnerabilities that dependence on a single supplier can cause.

Keywords: game theory; energy; natural gas; sanctions; conflict.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação de combustíveis fósseis na matriz energética - 1971 a 2019	12
Figura 2 - Comércio internacional de gás natural (bmc): 2021	18
Figura 3 – Linha do tempo das decisões dos jogadores.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTEXTO INSTITUCIONAL	17
3	MODELO TEÓRICO COM RESTRIÇÃO	20
4	MODELO TEÓRICO SEM RESTRIÇÃO	28
5	SANÇÕES À RÚSSIA	33
6	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS.....	39

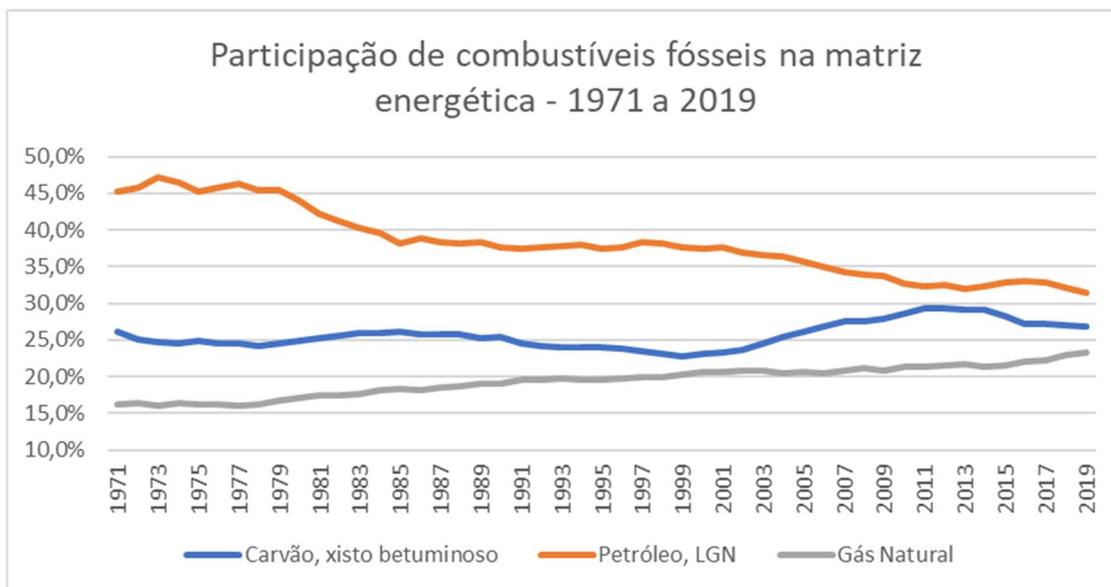
1 INTRODUÇÃO

Essa dissertação aborda o desenvolvimento do mercado de gás entre Europa e Rússia. Também analisa como este mercado influencia o conflito Rússia-Ucrânia, seja pela decisão russa por iniciar e persistir no conflito, seja pela decisão europeia de aplicar sanções à Rússia como resposta. Essa análise justifica-se pela importância do gás natural no panorama energético mundial e a importância do conflito Rússia-Ucrânia.

Nas últimas décadas os mercados de energia se tornaram mais globais e interconectados. No entanto a energia é um bem estratégico, de vital importância para a segurança nacional e o bem-estar de uma nação. Conflitos como o da Rússia e Ucrânia, com origem em 2014, levam a crer que a avaliação geopolítica deve se sobrepor aos arranjos de mercado. A geopolítica como fator dominante no planejamento energético, no entanto, pode impedir a viabilidade de alguns arranjos modernos multilaterais no mercado de energia (GOLDTHAU, 2014). Talvez o caso mais emblemático da relação entre conflito e segurança energética tenha sido a primeira crise do petróleo em 1973, quando após o início da Guerra do Yon Kippur, um embargo de petróleo aos países ocidentais levou o preço do barril a quadruplicar entre outubro de 1973 e janeiro de 1974 (CORBETT, 2013).

O foco deste trabalho está no mercado de gás natural. O gás natural tem grande importância para a matriz energética mundial, como podemos ver na Figura 1. O crescimento constante do gás natural ao longo dos últimos 50 anos fez com que em 2019 23% da energia consumida mundialmente fosse fornecida por este combustível (IEA, 2021). Por outro lado, o conflito Rússia-Ucrânia traz consequências sérias para o contexto político e econômico mundial. O conflito causou perturbações macroeconômicas globais como queda de curto prazo no PIB, aumento nas expectativas de inflação e elevação do preço de commodities, incluindo o preço de alimentos (TONG, 2024). Além disso, a incapacidade da Rússia de conseguir uma vitória rápida e o fato de ter tido vários reveses durante a invasão levou Moscou a uma retórica de ameaça de escalada nuclear (FAVARO, 2023).

Figura 1 – Participação de combustíveis fósseis na matriz energética - 1971 a 2019



Fonte: elaborado pelo autor a partir de IEA, 2021.

Embora na literatura haja diversos artigos que tratam em separado de questões como mercado de gás, conflitos e sanções, o nosso modelo reúne esses diversos aspectos e aplica-os ao contexto do mercado de gás Europa-Rússia. Para isso escolhemos uma metodologia de teoria dos jogos, por ser uma forma adequada de avaliar as interações estratégicas entre os dois jogadores do modelo, Europa e Rússia.

Construímos um modelo de jogo dinâmico entre Europa e Rússia onde na primeira fase a Rússia escolhe a que preço ofertará seu gás e na segunda fase a Europa escolhe sua demanda pelo gás russo e por GNL (gás natural liquefeito) para atender sua demanda total por gás natural. O modelo é expandido para dois períodos para analisar como a dependência da Europa muda no longo prazo com as escolhas do primeiro período. Por último o modelo faz a ligação do mercado de gás e da demanda pelo gás russo com as sanções após invasão da Ucrânia. Na literatura há uma série de modelos tratando essas questões separadamente. Na seção 1.1 abordamos brevemente alguns desses trabalhos.

A Europa e a Rússia possuem um longo histórico de interdependência no mercado de óleo e gás: a Europa é um grande consumidor de energia fóssil importada da Rússia, e a Rússia por sua vez tem grandes receitas vindas desse fornecimento aos europeus. Ainda assim isso não impediu o início do conflito Rússia-Ucrânia, assim como a aplicação de sanções pela Europa à energia russa. Por isso essa dissertação tem por objetivo responder às perguntas:

- Como a interação entre Europa e Rússia no mercado de gás levou à dependência da Europa do gás russo. Para isso o modelo considera que a Rússia vende gás natural para a

Europa com um desconto em relação a outros fornecedores, fazendo assim com que a Europa invista em infraestrutura de gasodutos entre as duas regiões e se torne mais dependente da Rússia.

- Como a interdependência entre Europa e Rússia no mercado de gás influencia a decisão europeia de aplicar sanções e a resposta russa ao sofrer sanções? Para isso modelamos a queda na utilidade europeia quando a Europa aplica sanções ao gás russo, do qual é dependente.

Concluimos através do modelo que o aumento de dependência do gás russo pode levar a um aumento do preço cobrado pela Rússia em um segundo período, aumentando as receitas russas, e ao mesmo tempo piorar a capacidade da Europa de reagir a qualquer política agressiva russa. Logo, um planejamento energético que leve à dependência pode não ser vantajoso no futuro e pode levar à vulnerabilidades políticas em relação ao país fornecedor.

Nosso modelo pretende, portanto, formalizar o modo como a Europa se tornou mais dependente da Rússia no mercado de gás natural e como essa dependência influencia a decisão pela aplicação de sanções, permitindo assim uma melhor compreensão de que variáveis influenciam nos resultados.

No capítulo 1 introduzimos os objetivos da pesquisa, assim como uma breve revisão de literatura. No capítulo 2 falaremos do contexto institucional, detalhando a formação do mercado de gás entre Europa e Rússia e os eventos que culminaram no conflito com a Ucrânia. No capítulo 3 faremos o desenvolvimento do modelo matemático do mercado de gás, neste caso com uma restrição sobre a quantidade de gás comprada pela Europa. No capítulo 4 desenvolvemos outro modelo, sem essa restrição. No capítulo 5 é desenvolvido o modelo de sanções. O capítulo 6 aborda as conclusões, limitações e linhas de pesquisa futuras.

1.1 Revisão de literatura

ATA et al. (2023) avaliam o impacto das sanções aplicadas por parte da Europa e Estados Unidos na Rússia e nos setores globais de energia. Os autores fazem uma revisão da literatura sobre o tema e revisam dados de impactos das sanções ao PIB russo, assim como às importações e exportações da Rússia, Europa e outros países, com foco no mercado de energia e de minérios essenciais à indústria. As sanções afetaram preços de diversas mercadorias e cadeias de suprimentos vitais, o que pode levar a um crescimento ainda maior da inflação e queda do PIB mundial. As sanções em vigor podem levar a Europa a acelerar sua transição para fontes mais limpas de energia, o que também levaria a Rússia a ter que achar novos

consumidores para seu gás natural. Por outro lado, a Rússia possui um poder de retaliação relevante pois é exportadora de mercadorias críticas além do gás e petróleo, como trigo e minérios essenciais.

FISCHHENDLER et al. (2017) analisam o histórico de sanções envolvendo energia entre 1938 e 2017. Os autores realizam uma análise quantitativa sobre o design e a imposição de sanções energéticas, introduzindo um modelo empírico para analisar e caracterizar o uso e a evolução dessas sanções ao longo do tempo. O estudo apresenta uma explicação preliminar para alguns dos dados analisados, contudo deixa algumas questões em aberto, como os motivos para aplicação e para remoção de sanções de energia.

CHANG et al. (2021) analisam cenários de competição e cooperação pelo mercado europeu e asiático entre Qatar e Rússia usando teoria dos jogos. A competição no mercado asiático é modelada em três cenários distintos. Na primeira fase é usado um jogo dinâmico de Stackelberg onde na primeira rodada o líder escolhe quanto irá produzir, com o seguidor então escolhendo sua produção após conhecer a decisão do líder. Nesse cenário o Qatar é o líder no mercado asiático, e a Rússia a seguidora. No estágio seguinte um jogo estático de Cournot é usado, tendo como característica a escolha simultânea no nível de produção pelos dois jogadores, Rússia competindo com o Qatar. Em seguida os autores consideram um cenário com os dois países cooperando em um monopólio bilateral.

Os resultados clássicos para os jogos de Stackelberg e Cournot indicam que o nível de produção do primeiro é maior, com um preço de equilíbrio menor (GIBBONS, 1992). Ao mesmo tempo o nível de produção do líder no jogo de Stackelberg será maior que no duopólio de Cournot, este último tendo níveis de produção iguais para os dois competidores. O resultado de Stackelberg leva a um lucro maior para a líder, que é equalizado entre os competidores no jogo de Cournot.

Os resultados de CHANG et al. (2021) são gerados com custos estimados através da literatura disponível sobre o tema. Os resultados no geral são condizentes com os resultados clássicos, embora o lucro do Qatar aumente no duopólio de Cournot em relação ao modelo de Stackelberg, devido ao aumento do preço compensar sua menor venda para o mercado asiático. Para o mercado Europeu os autores fazem uma série de cenários de exportação do Qatar via gasodutos, com possibilidades diferentes de entrega do gás e de discriminação de preços.

O foco do artigo de CHANG et al. (2021) é na competição entre os ofertantes de gás e como suas escolhas moldarão os preços e lucros. Os autores recorrem a modelos clássicos de teoria dos jogos para esse fim. Nosso modelo, no entanto, foca na relação demandante-ofertante entre Europa e Rússia e como a escolha de cada jogador pelas quantidades de gás e desconto

no preço molda o mercado entre os dois jogadores e a relação de dependência no futuro. Além disso construímos um modelo original para descrever essas relações.

KONRAD et al. (2023) analisam o efeito de embargos à combustíveis fósseis, motivados pelas sanções contra a Rússia após a invasão de 2022. Os autores, no entanto, focam a análise ao mercado de petróleo devido ao mercado de gás no curto e médio prazo ser em grande parte determinado pela infraestrutura de transporte construída. O petróleo, ao contrário, pode ser redirecionado mais facilmente, com ajustes rápidos dos mercados atendidos pelo ofertante. A modelo se baseia na lógica de Hotelling para mercados de recursos naturais finitos, onde o bem tem um estoque finito e o preço é formado em parte devido à uma renda proveniente da escassez.

No modelo há dois jogadores: um país governado por um autocrata e o restante dos produtores de petróleo do mundo escolhem o quanto irão ofertar em dois períodos. A demanda agregada é definida por funções de demanda inversa para cada período. Os autores chegam a um equilíbrio walrasiano para o problema e analisam o caso em que o país autocrata é sancionado fazendo sua oferta no primeiro período igual a zero. São analisados três casos.

Para um mercado sem fricção o país autocrata não é prejudicado, já que pode vender seu petróleo no período 2, enquanto os outros produtores suprem a demanda do período 1. O preço se ajusta de forma semelhante ao caso sem embargo e pela regra de Hotelling as quantidades ofertadas são ajustadas de forma que os ofertantes fiquem indiferentes entre vender o petróleo no primeiro e no segundo período. Logo o embargo não muda o resultado para aos participantes.

No segundo caso do modelo não há garantia de que o autocrata permaneça no poder ou mantenha seus ativos financeiros no segundo período. Há uma probabilidade exógena associada à perda do cargo e dos ativos financeiros e isso faz com que o autocrata fique pior no caso de embargo, pois prefere aumentar os ganhos no período 1. Os consumidores e o restante dos ofertantes, no entanto ficam indiferentes ao embargo já que a oferta é ajustada pelos produtores no período 1 para atender a demanda.

Por último os autores consideram como o poder de mercado muda o impacto do embargo. O efeito do embargo irá depender se o país sancionado se comporta como um tomador de preço ou como um agente com poder de mercado. Considerando o caso em que o país autocrata tem poder de mercado, as sanções têm o efeito de aumentar o preço do período 1 e diminuí-lo no período 2. Desta forma o país sancionado deixa de vender no período com maior preço e passa a vender todo seu petróleo no período de menor preço.

Embora o modelo de KONRAD et al. (2023) gere resultados interessantes acerca da aplicação de sanções, ele foca no mercado de petróleo pelo fato do mercado de gás ser mais dependente da infraestrutura de transporte construída. Nosso modelo usa justamente essa dependência da infraestrutura para analisar como decisões em um primeiro período levam a maior ou menor dependência em períodos posteriores, e como isso afeta a aplicação de sanções.

KAEMPFER et al. (2007) examinam várias abordagens sobre sanções, sem focar em um mercado específico, mas focando no objetivo e efeitos políticos das sanções. As sanções embora objetivem em geral causar algum dano econômico à nação alvo, podem ser usadas de forma demonstrativa algumas vezes. Em ambos os casos se busca uma mudança em uma política do país alvo que é considerada questionável. O efeito da sanção sobre essa política depende de uma série de variáveis: se a sanção é adotada de forma multilateral (por vários países) contra o alvo, do regime político do alvo, se o efeito negativo é sentido principalmente pelos apoiadores da política questionada, entre outros. Algumas sanções podem obter sucesso antes de serem implementadas, na fase de ameaça de sanção. Estudos empíricos baseados em sanções de fato aplicadas podem ter um viés de seleção ao ignorar esses casos. Esses casos demonstram a importância do compromisso e da reputação do país que aplica a sanção em alcançar seu objetivo.

Os autores também usam um modelo de grupos de interesses, para endogenizar a decisão da intensidade da sanção contra o país alvo. Nesse modelo, grupos com interesses opostos (adotar ou não as sanções) competem para definir o nível de sanção adotado. Nesse sentido, o regime político pode ter um papel nas tendências de aplicar sanções e no sucesso destas.

Nosso modelo não foca especificamente na teoria das sanções, mas estabelece a ligação das decisões sobre a aplicação de sanções com o mercado de gás. Da mesma forma modelamos a decisão do país alvo (a Rússia nesse caso) de mudar ou manter sua política de agressão em função dos impactos que a sua venda de gás nesse mercado pode sofrer.

A principal contribuição do nosso trabalho é modelar o desenvolvimento do mercado de gás europeu levando em conta decisões de importação de gás tomadas pela Europa no passado e fazer a ligação desse mercado com as consequências pós invasão na Ucrânia. Fazemos assim uma ligação entre os temas mercado de gás, comércio e conflito e sanções no mesmo modelo. Desta forma nosso modelo busca ajudar a compreender um evento importante da política e economia atual.

2 CONTEXTO INSTITUCIONAL

A Europa e Rússia tem um longo histórico de comércio de gás natural. Há algumas décadas a Europa é o principal importador do gás Russo e a Rússia o principal fornecedor da Europa. Esse cenário só mudou após a invasão da Ucrânia em 2022.

Em 1970 a URSS entrou no mercado de gás como um exportador relevante (YERGIN, 2014). Grande parte dos recursos foi herdada pela Rússia após a dissolução do bloco, levando o país a ocupar até 2008 o posto de maior produtor mundial de gás natural, sendo superada pelos EUA no ano seguinte. Parte do crescimento econômico do país tem sido sustentado pela exportação de energia: as receitas de óleo e gás corresponderam a 50% das receitas do governo federal e 68% das exportações do país em 2013 (EIA, 2015). Em 2021 a Rússia foi responsável por 17% da produção mundial de gás: 702 bilhões de metros cúbicos, ou bcm (BP, 2022).

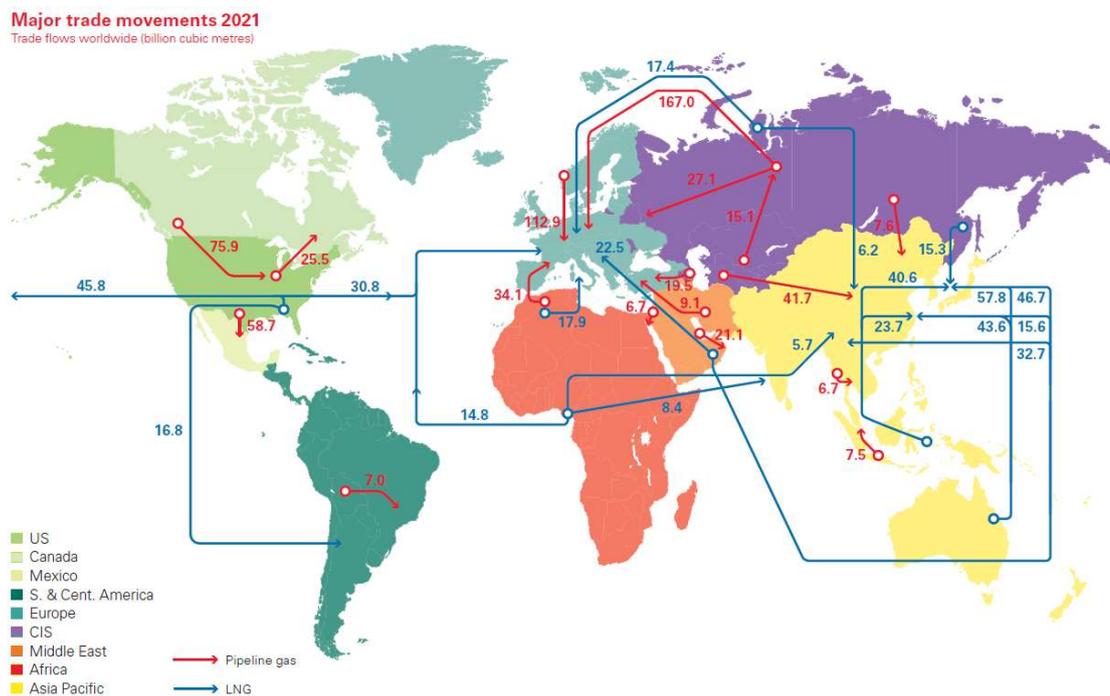
O principal mercado consumidor de gás russo é a Europa (isto é, depois da própria Rússia, que consome a maior parte do gás que produz). De fato, Rússia e Europa são interdependentes em energia: a Europa depende de importações de óleo e gás da Rússia e esta é dependente da Europa como mercado de destino de relevante parte da sua produção. Em 2021 a Europa consumiu 571 bcm de gás, dos quais 341 bcm foram importados, sendo 184 bcm da Rússia. O gás russo representou nesse período 54% das importações de gás europeias e 32% do seu consumo total de gás. O gás por sua vez foi responsável por 25% da matriz energética primária europeia em 2021 (BP, 2022).

Ao mesmo tempo, em 2021 a Rússia produziu 702 bcm: 184 bcm, 26% do total, foram exportados para Europa de um total de 241 bcm exportados e 475 bcm, 68% do total, foram consumidos internamente pela Rússia.

O gás natural é objeto de um intenso comércio internacional pois muitas vezes os grandes consumidores não têm uma produção significativa deste combustível. Dada a ampla infraestrutura necessária para transportar gás, decisões de produção e consumo têm impacto de longo prazo – trocar de fornecedor, por exemplo, é um processo complexo.

De forma geral, o gás natural pode ser transportado por gasodutos ou por navios. Essas duas formas de importação de gás natural exigem decisões de longo prazo (ALMEIDA, 2013). O segundo caso possui um transporte mais complexo que o petróleo, devido à necessidade de liquefação do gás, modalidade conhecida como GNL – gás natural liquefeito. Vê-se na Figura 1 que há um grande fluxo de importação de gás para a Europa, tanto por gasodutos quanto por GNL. A Europa importou 108 bcm de GNL em 2021.

Figura 2 - Comércio internacional de gás natural (bmc): 2021



Fonte: BP, 2022

Os gasodutos envolvem um alto investimento inicial, com elevado tempo de retorno. O transporte do GNL envolve construção de navios dedicados (ou a contratação a longo prazo), construção de plantas de regaseificação e, no caso da Europa, investimentos significativos na infraestrutura para distribuir esse gás pelo continente (ESER et al., 2019). A escolha entre as duas modalidades envolve, portanto, um compromisso de longo prazo. Esse ponto é central no desenvolvimento do nosso modelo: a escolha da Europa entre importar gás russo via gasodutos ou GNL determina seu nível de dependência nos períodos futuros.

A Europa aumentou sua importação da Rússia ao longo do tempo, com a construção de gasodutos, confiando em um fornecimento constante e de custo atrativo. A construção do gasoduto Nord Stream 2 por exemplo expõe a Europa a um risco político maior ao deixá-la mais dependente da Rússia (ESER et al., 2019). A Europa ficou mais suscetível a choques por cortes nesse fornecimento e mais frágil diante de qualquer embate político com a Rússia e, antes do conflito com a Ucrânia, já havia um histórico de embates. Em 2008 por exemplo houve o conflito entre Rússia e Geórgia, quando a Rússia reconheceu a independência de regiões separatistas da Geórgia, o que foi criticado pelo ocidente. O conflito com a Ucrânia guarda certa semelhança com este evento.

Em 2014, o presidente ucraniano Viktor Yanukovych, de orientação pró-Rússia, foi deposto após suspender negociações para entrada da Ucrânia na União Europeia. No mesmo

ano a Rússia anexou a Criméia. EUA e Europa estabeleceram sanções à Rússia em resposta. As sanções, no entanto, não impediram o crescimento da produção de óleo e gás no país e a continuidade do mercado de gás entre Europa Rússia, inclusive com a construção de um novo gasoduto, o Nordstream 2.

Em fevereiro de 2022 a Rússia invadiu a Ucrânia, após um período de grande tensão provocada pela possibilidade de a Ucrânia ingressar na OTAN. Assim como em 2014, em 2022 os países ocidentais estabeleceram uma série de sanções como resposta à agressão russa. O apoio ocidental à Ucrânia e a aplicação das sanções (como o teto de preços ao óleo e gás russos, entre outras) gerou como resposta o corte no fornecimento de gás pela Rússia: no primeiro semestre a Gazprom cortou o fornecimento de Bulgária, Polônia, Finlândia, Dinamarca e Holanda devido à recusa desses países de mudar o meio de pagamento para rublos, conforme definido unilateralmente pela Rússia. Em setembro a Rússia cortou o fornecimento para a Alemanha pelo gasoduto Nordstream. Os cortes aprofundaram a crise energética decorrente dos aumentos de preços do gás após a invasão em fevereiro.

O aumento de demanda por gás natural em 2021, decorrido da recuperação econômica pós pandemia, já havia pressionado o preço do gás e esse movimento se intensificou devido à crise energética provocada pela guerra.

A Rússia reduziu ou cortou o fornecimento de gás para vários países da Europa ao longo de 2022, como resposta às sanções destes países. As exportações russas aos países europeus da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) tiveram uma queda de 40% nos primeiros oito meses de 2022, comparados com o mesmo período do ano anterior. Com a redução e posterior parada do envio de gás pelo gasoduto Nordstream, a queda no fluxo de gás foi de 70% no terceiro trimestre de 2022 em comparação com 2021, o menor nível em duas décadas (IEA, 2022b). Também no terceiro trimestre as importações europeias de GNL dos EUA, de 12 bcm, superaram pela primeira vez a importação de gás russo via gasodutos, um evento simbólico acerca das mudanças que ocorreram no mercado devido à crise ucraniana.

As sanções impostas à Rússia tinham por objetivo causar uma queda no PIB do país, e evitar que a receita dos combustíveis fosse financiasse o conflito. Além disso as sanções limitam o acesso do país ao mercado de capital para financiar novos projetos e a novas tecnologias na área de energia (IEA, 2022a).

Esse contexto gerou a motivação desta pesquisa, em que se avalia o processo de escolha da Europa do seu fornecimento de gás, como isso gera dependência, e as consequências da evolução deste mercado para os conflitos e sanções no futuro.

3 MODELO TEÓRICO COM RESTRIÇÃO

Neste capítulo construímos nosso primeiro modelo, com restrição da quantidade total de gás consumido, começando por uma versão mais simples de um período. Na seção 3.2 adicionamos mais um período à análise. Aqui, por simplicidade, usamos o termo Europa para identificar o conjunto de países europeus que tem um comércio intenso de gás natural com a Rússia (e, portanto, possuem alguma dependência do gás russo) e que constituem o jogador de interesse no modelo, junto à Rússia.

O modelo é um jogo dinâmico entre Europa e Rússia, com informação perfeita, solucionado por indução retroativa semelhante a um jogo de Stackelberg. O resultado, portanto, é um equilíbrio de Nash perfeito em subjogos. Na fase 1 a Rússia faz uma oferta de gás com um desconto em relação ao preço do GNL vendido no mercado internacional. Na fase 2 a Europa deve decidir o quanto de gás russo e GNL irá comprar. Essa escolha define seu nível de dependência da Rússia.

3.1 Modelo com 1 período e restrição da quantidade total de gás

Os primeiros modelos desenvolvidos focam a análise em como o mercado de gás entre Europa e Rússia se desenvolve, com foco na quantidade de gás consumida pela Europa e no desconto dado pela Rússia no preço do gás. Nos modelos desenvolvidos nos capítulos 3 e 4 usaremos o termo “fase” para passagens de tempo de curto prazo e o termo “período” para passagens de tempo de longo prazo. Neste primeiro modelo consideramos apenas um período, ou seja, teremos apenas uma passagem de tempo de curto prazo. Considere que na fase do jogo $t = 2$ a Europa escolha a quantidade de gás q_r que comprará da Rússia e a quantidade de gás q_l , que comprará no mercado internacional de gás liquefeito. No primeiro modelo desenvolvido a soma de q_r e q_l deve suprir uma quantidade exógena Q de gás, prevista pela Europa no seu planejamento energético. Nesse caso a premissa é de que a Europa planejou com base nas suas necessidades e nos preços de mercado, o quanto consumirá de cada fonte energética e por isso a quantidade total de gás é fixa. O incentivo para a Europa aumentar a participação do gás russo depende do preço do gás russo, definido como $P_{gl} \times \delta$, preço do gás liquefeito no mercado internacional P_{gl} multiplicado por um fator de desconto δ ($0 < \delta < 1$), que os russos escolhem em $t = 1$. A figura 3 mostra uma linha do tempo das decisões dos jogadores.

Figura 3 – Linha do tempo das decisões dos jogadores



Aplicando a indução retroativa, resolvemos em primeiro lugar o problema da Europa. A Europa deseja maximizar sua utilidade representada por:

$$U_E = \ln\left(\frac{q_l}{q_l + q_r}\right)\gamma + Q\beta - q_l P_{gl} - q_r P_{gl} \delta \quad (1)$$

Sujeita à restrição

$$q_l + q_r = Q \quad (2)$$

Onde $\gamma > 0$ é uma medida do valor da independência energética europeia em relação à Rússia, que será máxima quando todo o gás for importado via mercado de gás liquefeito, com $q_l = Q$. A variável γ portanto captura preferências políticas dos europeus em relação à Rússia. Um γ maior indica uma preferência por fontes de gases não russas, ou uma maior desconfiança da Rússia enquanto fornecedor, ou ainda uma maior preocupação com a dependência energética da Europa em relação à Rússia.

A constante $\beta > 0$ mede o benefício do consumo de uma unidade de gás para a Europa. As variáveis δ , q_r e q_l são endógenas. As variáveis P_{gl} , Q , γ e β são exógenas. Substituindo q_r por $(Q - q_l)$, temos:

$$U_E = \ln\left(\frac{q_l}{Q}\right)\gamma + Q\beta - q_l P_{gl} - (Q - q_l) P_{gl} \delta$$

Como condição de primeira ordem (CPO) para o problema da Europa de maximização de sua utilidade temos:

$$\frac{dU_E}{dq_l} = \frac{\gamma}{q_l} - P_{gl} + P_{gl} \delta = 0$$

A partir da CPO, as quantidades escolhidas pela Europa são:

$$q_l = \frac{\gamma}{P_{gl}(1 - \delta)} \quad (3)$$

Substituindo q_l na expressão para q_r :

$$q_r = Q - \frac{\gamma}{P_{gl}(1-\delta)} \quad (4)$$

Para garantir que q_l seja um ponto de máximo temos que satisfazer a condição de segunda ordem:

$$\frac{d^2 U_E}{d q_l^2} = -\frac{\gamma}{q_l^2} < 0$$

O que será sempre satisfeito, visto que estamos supondo que γ e q_l são sempre positivos.

A partir da equação (4) podemos concluir que o aumento de γ (uma valorização da independência energética pela Europa em relação à Rússia) leva a uma diminuição de q_r . Um maior desconto no preço do gás pela Rússia (menor δ) leva a um aumento de q_r . O crescimento de Q leva a um aumento em q_r . Logo o aumento da demanda total de gás, a partir por exemplo do crescimento econômico, leva ao crescimento da parcela do gás russo e a um aumento da dependência em relação à Rússia.

Agora vejamos como o jogo se desenvolve na fase anterior. Em $t = 1$ a Rússia deve escolher qual desconto δ deseja aplicar ao preço do gás, para maximizar sua utilidade:

$$U_R = q_r P_{gl} \delta - q_r c \quad (5)$$

Onde c é o custo marginal do gás russo, aqui considerado como constante e exógeno. Como grande parte do custo do gás é devido ao investimento para desenvolvimento do campo produtor e os custos de extração são em geral baixos, utilizamos a premissa de um custo marginal constante.

Substituindo q_r pelo valor escolhido pela Europa em $t = 2$ na equação (4), temos a seguinte função objetivo para a Rússia:

$$U_R = P_{gl} \delta \left(Q - \frac{\gamma}{P_{gl}(1-\delta)} \right) - c \left(Q - \frac{\gamma}{P_{gl}(1-\delta)} \right)$$

Temos como CPO:

$$\frac{d U_R}{d \delta} = P_{gl} \left(Q - \frac{\gamma}{P_{gl}(1-\delta)} \right) - \frac{\gamma \delta}{(1-\delta)^2} + \frac{c \gamma}{P_{gl}(1-\delta)^2} = 0$$

Chega-se então à escolha da Rússia para δ :

$$\delta = 1 - \left(\frac{\gamma(P_{gl} - c)}{P_{gl}^2 Q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ou

$$\delta = 1 + \left(\frac{\gamma(P_{gl} - c)}{P_{gl}^2 Q} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sendo $\delta < 1$ por definição, somente a primeira expressão é aceitável.

Para a condição de segunda ordem temos:

$$\frac{2\gamma(P_{gl} - c)}{P_{gl}(\delta - 1)^3} < 0$$

O que sempre será satisfeito, dado que $(P_{gl} - c)$ é assumido como positivo e $(\delta - 1)^3$ é assumido como negativo (o custo do gás russo deve ser menor que o preço do GNL e o δ foi considerado menor que 1 por definição).

A partir do resultado da equação (6) pode-se perceber que um aumento de γ leva a um aumento do desconto (queda no valor de δ) pela Rússia. A Rússia precisa compensar uma maior valorização de independência energética pela Europa aplicando um desconto maior ao seu gás para manter a quantidade vendida de gás.

Já o crescimento de Q leva a um aumento de δ : o aumento do consumo de gás da Europa leva a Rússia a diminuir o desconto sobre seu preço. A Rússia precisa dar um desconto menor devido à necessidade de a Europa precisar aumentar da demanda de gás.

3.2 Modelo com 2 períodos e com restrição da quantidade total de gás

Considere que na fase $t = 2$ a Europa escolha a quantidade de gás q_r que comprará da Rússia e a quantidade de gás q_l , que comprará no mercado internacional de gás liquefeito. A soma de q_r e q_l deve suprir uma quantidade exógena Q de gás. Como antes o incentivo para a Europa aumentar a participação do gás russo depende do preço do gás russo, definido como $P_{gl} \times \delta$, com δ ($0 < \delta < 1$), escolhido pelos russos em $t = 1$.

Considere agora que as duas fases do jogo entre Europa e Rússia, $t = 1$ e $t = 2$, são repetidas em dois períodos diferentes: $p = 1$ e $p = 2$ (lembrando que usamos o termo “fase” para passagens de tempo de curto prazo e o termo “período” para passagens de tempo de longo prazo.). Os períodos são interpretados como a repetição do jogo dinâmico no longo prazo. Ao escolher o quanto de gás liquefeito e quanto de gás Russo comprar, a Europa faz escolhas de investimento em infraestrutura e transporte de gás que afetam sua utilidade no longo prazo. Ao escolher quantidades maiores de gás liquefeito, ela deve investir em plantas de regaseificação de gás, transporte e infraestrutura para escoar esse gás, enquanto ao escolher mais gás russo, a escolha deve ser por construir e manter gasodutos entre a Rússia e Europa.

Realizar uma mudança na escolha das quantidades de gás no segundo período portanto é custoso para a Europa. No modelo esse custo será refletido na alteração de γ entre os períodos,

onde o γ do período 2, γ_2 , depende da proporção de q_{r1} em relação a Q (q_{r1} é a quantidade de gás russo no período 1 e Q a quantidade total de gás).

Iremos considerar:

$$\gamma_2 = \alpha\gamma_1 \quad (7)$$

Se no período 1 q_l for maior que q_r consideraremos:

$$\alpha > 1$$

Desta forma γ_2 será maior que γ_1 , ou seja, no período 2 haverá uma maior valorização da independência europeia em relação ao gás russo, dado que no período 1 houve uma escolha por investir em uma infraestrutura para importação de GNL.

Se no período 1 q_r for maior que q_l consideraremos:

$$\alpha < 1$$

Agora γ_2 será menor que γ_1 e no período 2 haverá uma menor valorização da independência europeia em relação ao gás russo, dado que no período 1 houve uma escolha por investir em uma infraestrutura para importação de gás russo.

Considerando, portanto, o problema de otimização da utilidade intertemporal da Europa, a função objetivo incorporando os dois períodos passa a ser:

$$U_E = \ln\left(\frac{q_{l1}}{Q}\right)\gamma_1 + Q\beta - q_{l1}P_{gl} - q_{r1}P_{gl}\delta_1 + \ln\left(\frac{q_{l2}}{Q}\right)\gamma_2 + Q\beta - q_{l2}P_{gl} - q_{r2}P_{gl}\delta_2 \quad (8)$$

Ao fazer as escolhas do segundo período os jogadores não precisam fazer considerações sobre o futuro, o que faz com que a resolução do segundo período seja igual à do problema de um período. Acha-se q_{r2} e q_{l2} maximizando a utilidade do segundo período. Temos:

$$U_{E2} = -P_{gl}q_{l2} - P_{gl}\delta_2(Q - q_{l2}) + Q\beta + \gamma_2 \log\left(\frac{q_{l2}}{Q}\right)$$

Temos a CPO:

$$P_{gl}\delta_2 - P_{gl} + \frac{\gamma_2}{q_{l2}} = 0$$

Que leva ao ponto crítico:

$$q_{l2} = \frac{\gamma_2}{P_{gl}(1 - \delta_2)} \quad (9)$$

$$q_{r2} = Q - \frac{\gamma_2}{P_{gl}(1 - \delta_2)} \quad (10)$$

Os resultados são semelhantes ao modelo de 1 período em que um γ_2 maior (uma valorização da independência energética pela Europa em relação à Rússia) leva a uma diminuição de q_{r2} e um maior desconto no preço do gás pela Rússia (menor δ_2) leva a um

aumento de q_{r2} . Logo uma maior valorização da independência levará a Europa a diminuir a quantidade de gás russo, o que leva conseqüentemente à uma maior independência. A Rússia pode tentar compensar uma diminuição na demanda do seu gás oferecendo um maior desconto.

Para a utilidade da Rússia no segundo período temos:

$$U_{R2} = P_{gl}q_{r2}\delta_2 - c_2q_{r2} \quad (11)$$

Substituindo o valor encontrado para q_{r2} na equação (10) temos:

$$U_{R2} = P_{gl}\delta_2 \left(Q + \frac{\gamma_2}{P_{gl}(\delta_2 - 1)} \right) - c_2 \left(Q + \frac{\gamma_2}{P_{gl}(\delta_2 - 1)} \right)$$

Temos a CPO:

$$P_{gl} \left(Q + \frac{\gamma_2}{P_{gl}(\delta_2 - 1)} \right) - \frac{\gamma_2\delta_2}{(\delta_2 - 1)^2} + \frac{c_2\gamma_2}{P_{gl}(\delta_2 - 1)^2} = 0$$

Que leva ao ponto crítico:

$$\delta_2 = 1 - \frac{\sqrt{\gamma_2}\sqrt{P_{gl} - c_2}}{P_{gl}\sqrt{Q}} \quad (12)$$

Resultado semelhante ao encontrado para período em que um maior γ_2 leva a um aumento do desconto (queda no valor de δ_2) pela Rússia.

Substituindo δ_2 encontrado em (16) em q_{r2} e q_{l2} temos:

$$q_{r2} = Q - \frac{\sqrt{Q\gamma_2}}{\sqrt{P_{gl} - c_2}} \quad (13)$$

$$q_{l2} = \frac{\sqrt{Q\gamma_2}}{\sqrt{P_{gl} - c_2}} \quad (14)$$

Resolvemos então a utilidade total considerando

$$\gamma_2 = \alpha\gamma_1$$

Substituindo os valores encontrados para o segundo período (equações (13) e (14)) e γ_2 temos:

$$U_E = -P_{gl}Q - P_{gl}q_{l1} - P_{gl}\delta_1(Q - q_{l1}) + \sqrt{Q}\sqrt{\alpha}\sqrt{\gamma_1}\sqrt{P_{gl} - c_2} + 2Q\beta - \frac{\alpha\gamma_1 \log(P_{gl} - c_2)}{2} \\ - \alpha\gamma_1 + \log \left(Q^{-\frac{\alpha\gamma_1}{2}} \left(\frac{q_{l1}}{Q} \right)^{\gamma_1} (\sqrt{\alpha}\sqrt{\gamma_1})^{\alpha\gamma_1} \right)$$

Temos a CPO:

$$P_{gl}\delta_1 - P_{gl} + \frac{\gamma_1}{q_{l1}} = 0$$

E o seguinte ponto crítico:

$$q_{l1} = -\frac{\gamma_1}{P_{gl}(\delta_1 - 1)} \quad (15)$$

$$q_{r1} = Q + \frac{\gamma_1}{P_{gl}(\delta_1 - 1)} \quad (16)$$

Substituindo γ_2 em q_{l2} e q_{r2} temos:

$$q_{l2} = -\frac{\alpha\gamma_1}{P_{gl}(\delta_2 - 1)} \quad (17)$$

$$q_{r2} = Q + \frac{\alpha\gamma_1}{P_{gl}(\delta_2 - 1)} \quad (18)$$

Comparando as quantidades de gás nos dois períodos vemos que um q_l maior no primeiro período ($\alpha > 1$) leva ao aumento de q_{l2} devido a maior valorização do gás liquefeito e a uma diminuição do gás russo no segundo período. Se q_r for maior no primeiro período q_{l2} terá uma redução em relação a q_{l1} e q_{r2} crescerá em relação a q_{r1} . Ou seja, ao fazer uma escolha de qual gás privilegiar no primeiro período, a tendência é que essa preferência se perpetue no futuro devido ao custo de mudança para o outro tipo de gás.

A escolha da Rússia para o desconto do primeiro período será dada pela otimização da utilidade dos dois períodos (com os valores de q_{r1} e δ_2 substituídos):

$$U_R = P_{gl}\delta_1 \left(Q + \frac{\gamma_1}{P_{gl}(\delta_1 - 1)} \right) + P_{gl} \left(1 - \frac{\sqrt{\gamma_2}\sqrt{P_{gl} - c_2}}{P_{gl}\sqrt{Q}} \right) \left(-\frac{\sqrt{Q}\sqrt{\gamma_2}}{\sqrt{P_{gl} - c_2}} + Q \right) - c_1 \left(Q + \frac{\gamma_1}{P_{gl}(\delta_1 - 1)} \right) - c_2 \left(-\frac{\sqrt{Q}\sqrt{\gamma_2}}{\sqrt{P_{gl} - c_2}} + Q \right)$$

Chegamos ao seguinte desconto no primeiro período:

$$\delta_1 = 1 - \frac{\sqrt{\gamma_1}\sqrt{P_{gl} - c_1}}{P_{gl}\sqrt{Q}} \quad (19)$$

Comparando com o desconto do segundo período (substituindo γ_2):

$$\delta_2 = 1 - \frac{\sqrt{\alpha\gamma_1}\sqrt{P_{gl} - c_2}}{P_{gl}\sqrt{Q}}$$

Vemos que uma maior quantidade de GNL, q_l , no primeiro período (que implica em $\alpha > 1$, ou seja, $\gamma_2 > \gamma_1$) leva a um δ_2 menor e um desconto maior da Rússia, motivado pela necessidade de fazer frente à maior valorização do gás liquefeito no segundo período. Por outro lado, uma valorização da independência (γ_2) menor no segundo período leva a um δ_2 maior, ou seja, um desconto menor da Rússia no segundo período, já que o GNL será menos valorizado nesse caso. Desta forma um aumento da dependência da Europa em relação ao gás russo permite à Rússia cobrar um preço maior no segundo período.

4 MODELO TEÓRICO SEM RESTRIÇÃO

Neste capítulo desenvolvemos um segundo modelo, sem restrição da quantidade total de gás. Na notação do capítulo anterior, $Q = q_r + q_l$ passa a ser uma variável endógena.

Os parâmetros e variáveis são os mesmos do capítulo 3. No entanto neste modelo há uma mudança na forma das utilidades. Neste modelo o parâmetro γ , que é a medida do valor da independência energética europeia em relação à Rússia, multiplica a raiz da quantidade de gás liquefeito consumido e não mais o logaritmo da fração do gás liquefeito, q_l .

4.1 Modelo com 1 período e sem restrição da quantidade total de gás

Agora considere que na fase $t = 2$ a Europa escolha a quantidade de gás q_r que comprará da Rússia e a quantidade de gás q_l , que comprará no mercado internacional de gás liquefeito, sem que haja restrição à quantidade total.

A Europa deseja maximizar sua utilidade representada por:

$$U_E = \beta\sqrt{\gamma q_l} + \beta\sqrt{q_r} - P_{gl}q_l - P_{gl}q_r\delta \quad (20)$$

Onde os parâmetros e variáveis são os mesmos do capítulo 3. As variáveis δ , q_r e q_l são endógenas. As variáveis P_{gl} , γ e β são exógenas.

Temos as condições de primeira ordem:

$$\begin{aligned} -P_{gl} + \frac{\beta\sqrt{\gamma}}{2\sqrt{q_l}} &= 0 \\ -P_{gl}\delta + \frac{\beta}{2\sqrt{q_r}} &= 0 \end{aligned}$$

O que leva ao ponto crítico:

$$\left\{ q_l: \frac{\beta^2\gamma}{4P_{gl}^2}, q_r: \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} \right\} \quad (21)$$

Vemos que a quantidade de gás aumenta com o benefício do consumo de gás e diminui com o preço cobrado por cada tipo de gás. A quantidade de GNL, q_l , também é positivamente influenciada pela medida do valor da independência energética europeia. Esse modelo, no entanto, apresenta uma limitação: o parâmetro que representa essa medida do valor da independência, γ , não afeta q_r e δ não afeta q_l . As escolhas pelas quantidades de cada tipo de

gás acabam sendo independentes pois Q não está limitado. Neste caso o GNL e o gás russo substituem outras formas de energia da matriz europeia, mas não afetam um ao outro.

Para a CSO, como o ponto crítico deve ser um ponto de máximo, temos para o primeiro menor principal líder:

$$-\frac{2P_{gl}^3}{\beta^2\gamma} < 0$$

O que é sempre atendido devido ao sinal de menos no termo e às variáveis serem positivas.

Para o segundo menor principal líder temos:

$$\frac{4P_{gl}^6\delta^3}{\beta^4\gamma} > 0$$

O que é sempre atendido. Concluimos então que o ponto crítico descrito em (21) descreve um ponto de máximo para a utilidade europeia.

Para a fase $t = 1$ do jogo em que a Rússia escolhe o desconto, temos a função utilidade russa:

$$U_R = q_r P_{gl} \delta - q_r c \quad (22.1)$$

Substituindo o q_r escolhido pela Europa na equação (21) em U_R , temos:

$$U_R = \frac{\beta^2}{4P_{gl}\delta} - \frac{c\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} \quad (22.2)$$

temos a CPO:

$$-\frac{\beta^2}{4P_{gl}\delta^2} + \frac{c\beta^2}{2P_{gl}^2\delta^3} = 0$$

E ponto crítico:

$$\delta = \left[\frac{2c}{P_{gl}} \right] \quad (23)$$

Vemos que o aumento do custo torna o δ maior e, portanto, diminui o desconto que a Rússia oferece. O aumento de P_{gl} no entanto permite que a Rússia dê um desconto maior no seu gás.

Como CSO temos (para que o ponto crítico seja um ponto de máximo):

$$\frac{\beta^2(P_{gl}\delta - 3c)}{2P_{gl}^2\delta^4} < 0$$

Logo:

$$P_{gl}\delta < 3c$$

Substituindo o δ pelo valor encontrado no ponto crítico temos $2c < 3c$, o que sempre é atendido.

4.2 Modelo com 2 períodos e sem restrição da quantidade total de gás

Considere novamente que as duas fases do jogo entre UE e Rússia, $t = 1$ e $t = 2$, são repetidas em dois períodos diferentes: $p = 1$ e $p = 2$. Mas agora a Europa escolhe as quantidades de GNL e gás russo sem a restrição do modelo 3.2, onde a soma de q_l e q_r está limitada a Q . A mudança para proporções maiores de uma ou outra fonte de gás, no entanto tem um custo, que será refletido na alteração de γ entre os períodos.

Novamente iremos considerar:

$$\gamma_2 = \alpha\gamma_1$$

Se no período 1 q_l for maior que q_r consideraremos:

$$\alpha > 1$$

Se no período 1 q_r for maior que q_l consideraremos:

$$\alpha < 1$$

Considerando, portanto, o problema de otimização da utilidade intertemporal da Europa, a função objetivo passa a ser:

$$U_E = (\beta\sqrt{\gamma_1 q_{l1}} + \beta\sqrt{q_{r1}} - P_{gl}q_{l1} - P_{gr}q_{r1}\delta_1) + (\beta\sqrt{\gamma_2 q_{l2}} + \beta\sqrt{q_{r2}} - P_{gl}q_{l2} - P_{gr}q_{r2}\delta_2) \quad (24)$$

Ao fazer as escolhas do segundo período os jogadores não precisam fazer considerações sobre o futuro, o que faz com que a resolução do segundo período seja igual à do problema de um período. Acha-se q_{r2} e q_{l2} maximizando a utilidade do segundo período. Temos:

$$U_{E2} = \sqrt{q_{l2}}\beta\gamma_2 + \sqrt{q_{r2}}\beta - P_{gl}q_{l2} - P_{gr}q_{r2}\delta_2$$

Para a primeira especificação temos as CPO:

$$\begin{aligned} -P_{gl} + \frac{\beta\gamma_2}{2\sqrt{q_{l2}}} &= 0 \\ -P_{gr}\delta_2 + \frac{\beta}{2\sqrt{q_{r2}}} &= 0 \end{aligned}$$

Que levam ao ponto crítico:

$$\left\{ q_{l2}: \frac{\beta^2\gamma_2^2}{4P_{gl}^2}, q_{r2}: \frac{\beta^2}{4P_{gr}^2\delta_2^2} \right\} \quad (25)$$

Assim como no modelo de 1 período a quantidade de gás aumenta com o benefício do consumo de gás e diminui com o preço cobrado por cada tipo de gás e o q_l é positivamente influenciado pela medida do valor da independência energética europeia.

Para a utilidade da Rússia no segundo período temos:

$$U_{R2} = P_{gl}q_{r2}\delta_2 - c_2q_{r2}$$

Substituindo o valor encontrado de q_{r2} temos:

$$U_{R2} = \frac{\beta^2}{4P_{gl}\delta_2} - \frac{c_2\beta^2}{4P_{gl}^2\delta_2^2}$$

Temos a CPO:

$$-\frac{\beta^2}{4P_{gl}\delta_2^2} + \frac{c_2\beta^2}{2P_{gl}^2\delta_2^3} = 0$$

Que leva ao ponto crítico:

$$\delta_2 = \left[\frac{2c_2}{P_{gl}} \right] \quad (26)$$

Substituindo δ_2 encontrado em q_{r2} temos:

$$q_{r2} = \frac{\beta^2}{16c_2}$$

Resolvemos então a utilidade total considerando:

$$U_E = (\beta\sqrt{\gamma_1q_{l1}} + \beta\sqrt{q_{r1}} - P_{gl}q_{l1} - P_{gl}q_{r1}\delta_1) + (\beta\sqrt{\gamma_2q_{l2}} + \beta\sqrt{q_{r2}} - P_{gl}q_{l2} - P_{gl}q_{r2}\delta_2)$$

e

$$\gamma_2 = \alpha\gamma_1$$

Substituindo os valores encontrados para o segundo período e o γ_2 temos:

$$U_E = \sqrt{q_{l1}}\beta\gamma_1 + \sqrt{q_{r1}}\beta - P_{gl}q_{l1} - P_{gl}q_{r1}\delta_1 + \frac{\beta^2}{8c_2} + \frac{\alpha^2\beta^2\gamma_1^2}{4P_{gl}}$$

Temos as CPOs:

$$P_{gl} - \frac{\beta\gamma_1}{2\sqrt{q_{l1}}} = 0$$

$$P_{gl}\delta_1 - \frac{\beta}{2\sqrt{q_{r1}}} = 0$$

Que geram o seguinte ponto crítico:

$$\left\{ q_{l1}: \frac{\beta^2\gamma_1^2}{4P_{gl}^2}, q_{r1}: \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta_1^2} \right\} \quad (27)$$

Substituindo γ_2 em q_{l2} temos:

$$q_{l2} = \frac{\alpha^2\beta^2\gamma_1^2}{4P_{gl}^2}$$

Vemos que no período 2 q_l corresponde à quantidade do período 1 multiplicada por α^2 . Se no período 1 q_l for maior que q_r consideraremos $\alpha > 1$ e q_l aumenta. Se no período 1 q_r for maior que q_l , $\alpha < 1$ e q_l diminui.

Novamente, assim como no modelo com restrição de Q , ao fazer uma escolha de qual gás privilegiar no primeiro período, a tendência é que essa preferência se perpetue no futuro devido ao custo de mudança para o outro gás.

A escolha da Rússia para δ_1 é então calculada substituindo-se as quantidades de gás russo e o δ_1 encontrados anteriormente na equação da utilidade considerando os dois períodos:

$$U_R = P_{gl}q_{r1}\delta_1 - c_1q_{r1} + P_{gl}q_{r2}\delta_2 - c_2q_{r2} \quad (28)$$

Temos:

$$\delta_1 = \left[\frac{2c_1}{P_{gl}} \right] \quad (29)$$

Comparando os δ de ambos os períodos vemos se há um aumento do consumo do gás russo e os custos são pressionados para cima, há um aumento em δ no segundo período, causando uma redução do desconto.

$$\delta_2 = \left[\frac{2c_2}{P_{gl}} \right] \quad (29.2)$$

5 SANÇÕES À RÚSSIA

Avançando na construção do modelo, analisamos agora a decisão sobre a aplicação de sanções contra a Rússia no mercado de gás. No modelo a decisão de iniciar o conflito é exógena.

Considere o resultado encontrado para o jogo entre Europa e Rússia em um período, sem restrição da quantidade total de gás. Em determinado momento a Rússia toma a decisão de invadir ou não a Ucrânia, de forma exógena. A Europa deve decidir se aplica uma sanção de forma a desencorajar o comportamento da Rússia ou a fazê-la recuar. No modelo a sanção será aplicada limitando a quantidade de gás a ser comprada pela Europa da Rússia. A Europa escolhe \bar{q}_r , quantidade limite comprada de gás russo. Temos para as utilidades da Europa e Rússia:

$$U_E = \beta\sqrt{\gamma q_l} + \beta\sqrt{\bar{q}_r} - P_{gl}q_l - P_{gl}\bar{q}_r\delta \quad (30)$$

$$U_R = \bar{q}_r P_{gl}\delta - \bar{q}_r c + B_R \quad (31)$$

Onde B_R é o benefício russo ao escolher invadir a Ucrânia. A Europa deve escolher \bar{q}_r de forma a anular os ganhos russos na invasão, o que tornaria a Rússia indiferente ao ato de invadir ou não no período anterior. Então devemos ter:

$$\begin{aligned} (q_r P_{gl}\delta - q_r c) - (\bar{q}_r P_{gl}\delta - \bar{q}_r c) &\geq B_R \\ (P_{gl}\delta - c)(q_r - \bar{q}_r) &\geq B_R \\ (q_r - \bar{q}_r) &\geq \frac{B_R}{(P_{gl}\delta - c)} \end{aligned} \quad (32)$$

Pode-se ver que a variação na receita da Rússia deve ser maior que benefício da invasão.

Igualando os dois lados na inequação acima (32) chegamos à menor diminuição possível ($q_r - \bar{q}_r$) que alcance o objetivo da Europa, minimizando o impacto em sua própria utilidade. Temos então para \bar{q}_r :

$$\bar{q}_r = q_r - \frac{B_R}{P_{gl}\delta - c}$$

Substituindo o q_r de equilíbrio do modelo anterior temos:

$$\bar{q}_r = \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} - \frac{B_R}{P_{gl}\delta - c} \quad (33)$$

O que leva a Rússia a ter a mesma utilidade do modelo anterior, equivalente ao que ela teria sem invasão e sem sanção:

$$\bar{U}_R = \frac{\beta^2(P_{gl}\delta - c)}{4P_{gl}^2\delta^2} \quad (34)$$

A utilidade acima (34) equivale à encontrada na equação (22.2).

A utilidade da Europa neste caso é:

$$\bar{U}_E = \beta \sqrt{-\frac{B_R}{P_{gl}\delta - c} + \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} + \frac{\beta^2\gamma}{4P_{gl}} - P_{gl}\delta \left(-\frac{B_R}{P_{gl}\delta - c} + \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} \right)} \quad (35)$$

Uma condição complementar para a sanção é que a Europa deve ficar em melhor situação ao aplicar a sanção para desencorajar o conflito e garantir o benefício da estabilidade B_E do que se não aplicasse a sanção e houvesse conflito.

Vamos agora considerar dois períodos, entre os quais a Rússia toma sua decisão de invadir ou não. Usando os sobrescritos 1 e 2 para indicar qual o período dos termos, podemos escrever as seguintes situações:

A Rússia decide não invadir:

$$U_{Etotal} = U_E^1 + B_E^1 + U_E^2 + B_E^2 \quad (36)$$

A utilidade total da Europa será a soma da utilidade já encontrada anteriormente com o benefício da estabilidade (não-conflito) B_E , para os dois períodos.

Se a Rússia decide invadir, temos dois casos:

a) A Europa decide não aplicar sanção, convivendo com o conflito, perdendo o termo B_E do segundo período, mas sem diminuir a parte de sua utilidade que vem do seu consumo de gás. Temos a utilidade total:

$$U_{Etotal} = U_E^1 + B_E^1 + U_E^2 \quad (37)$$

b) A Europa aplica sanção para obrigar a Rússia a recuar. A Europa ganha então o termo B_E no segundo período, mas sua utilidade do consumo de gás no período 2 será o \bar{U}_E encontrado anteriormente:

$$U_{Etotal} = U_E^1 + B_E^1 + \bar{U}_E + B_E^2 \quad (38)$$

A condição para a Europa aplicar a sanção é estar melhor no caso *b* do que no caso *a*. Temos então como condição necessária para aplicação de sanção:

$$U_E^1 + B_E^1 + \bar{U}_E + B_E^2 \geq U_E^1 + B_E^1 + U_E^2$$

Como os termos de U_E e B_E dos dois períodos são considerados iguais nesse caso, a inequação pode ser simplificada para:

$$\bar{U}_E + B_E \geq U_E \quad (39)$$

Que pode ser escrita como:

$$B_E \geq U_E - \bar{U}_E \quad (40)$$

Ou seja, o montante diminuído da utilidade europeia pelo menor consumo de gás não pode superar o benefício que a Europa tem ao impedir a invasão através da sanção.

Substituindo a utilidade sem sanção encontrada no modelo anterior (modelo do capítulo 4) e a utilidade do modelo com sanção acima temos:

$$B_E \geq P_{gl}\delta \left(-\frac{B_R}{P_{gl}\delta - c} + \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} \right) - \beta \sqrt{-\frac{B_R}{P_{gl}\delta - c} + \frac{\beta^2}{4P_{gl}^2\delta^2} + \frac{\beta^2}{4P_{gl}\delta}}$$

que pode ser reescrita como:

$$B_E \geq 2c \left(-\frac{B_R}{c} + \frac{\beta^2}{16c^2} \right) - \beta \sqrt{-\frac{B_R}{c} + \frac{\beta^2}{16c^2} + \frac{\beta^2}{8c}}$$

e finalmente:

$$B_E \geq \frac{\beta^2 - \beta\sqrt{\beta^2 - 16B_Rc} - 8B_Rc}{4c} \quad (41)$$

Que é a condição necessária para que a Europa decida aplicar a sanção à Rússia.

Se a Rússia escolhe iniciar e manter o conflito, ela pode ter antecipado que a Europa não aplicaria uma sanção prejudicial o suficiente, pelo fato de o lado esquerdo da inequação não ser grande o suficiente. Isso pode acontecer se não houver uma valorização suficiente pela Europa da estabilidade representada pelo termo B_E (B_E é definido por preferencias políticas), ou se a perda de utilidade pela diminuição de consumo de gás (que é o termo do lado direito da inequação) for tão alta que suplante esse benefício.

Podemos definir o lado direito da equação (41) como um *threshold*:

$$B_E^* = \frac{\beta^2 - \beta\sqrt{\beta^2 - 16B_Rc} - 8B_Rc}{4c} \quad (42)$$

Esse será o valor de B_E em que a Europa ficará indiferente entre aplicar ou não sanções à Rússia. Quanto maior B_E^* , mais difícil é para a Europa aplicar sanções de forma crível à Rússia em caso de invasão, e, portanto, mais difícil é evitar uma invasão. Interpretamos então B_E^* como uma medida de dificuldade para a aplicação de sanções críveis.

Podemos observar que B_E^* :

1. É crescente em B_R : quanto maior o benefício geopolítico russo de invadir a Ucrânia, mais difícil se torna para a Europa aplicar sanções à Rússia. É um resultado intuitivo: quanto maior o valor da invasão para a Rússia, maior deve ser o valor da não-invasão para a Europa, para que seja possível impor sanções.
2. É crescente em c : quanto maior o custo marginal do gás na Rússia, mais difícil se torna para a Europa aplicar sanções à Rússia. Temos um resultado contra-intuitivo:

o maior custo para a Rússia, paradoxalmente, ajuda a proteger a Rússia de sanções europeias, dado o aumento do custo do gás para a Europa.

Sobre o ponto 2, podemos interpretar o resultado pela equação (33): um maior c leva a um menor \bar{q}_r , que tem um maior impacto na diminuição da utilidade da Europa. Por isso, com o aumento de c , B_E deve ser maior para compensar a queda na utilidade do consumo de gás.

6 CONCLUSÃO

A Invasão da Ucrânia pela Rússia foi disruptiva para o mercado internacional de gás natural. A crise afetou um comércio de décadas entre Rússia e Europa, duas regiões interdependentes energeticamente, e que construíram suas infraestruturas logísticas de gás natural baseadas nesse relacionamento. A crise neste mercado foi prejudicial tanto para a Europa, dependente do gás russo, quando para a Rússia, que tem na venda de gás natural uma parte substancial de suas receitas de exportação.

Esta dissertação parte do contexto histórico de interdependência entre Europa e Rússia para formalizar um modelo da relação de demanda e oferta de gás natural entre esses dois jogadores. O modelo mostra que a quantidade de gás consumida aumenta com o benefício do consumo de gás e diminui com o preço. A quantidade de gás liquefeito consumido aumenta com a valorização da independência energética em relação à Rússia.

As escolhas de cada jogador podem levar à maior ou menor dependência da Europa em relação à Rússia no futuro: a Europa pode ficar mais dependente quando não valoriza sua independência em relação à Rússia e a Rússia pode tentar tornar a Europa mais dependente através de desconto no preço do gás. A Europa, ao fazer uma escolha de qual gás privilegiar no primeiro período, fará essa preferência se perpetuar no futuro devido ao custo de mudança para o outro gás. Essa dependência pode levar à um aumento das receitas russas no futuro, considerando que a dependência aumenta o poder de mercado da Rússia, e ela pode vender a um preço maior nos períodos subsequentes.

Por outro lado, a dependência pode deixar a Europa mais vulnerável à política russa. O aumento do consumo e, por consequência, do benefício do gás russo para a Europa com o passar do tempo, torna mais difícil a adoção de sanções no mercado de gás contra a Rússia. Isso porque para limitar a compra de gás russo a Europa renuncia a uma certa quantidade de utilidade. O conflito causado pela Rússia também diminui a utilidade da Europa, mas a diminuição feita pelos cortes no consumo de gás em caso de sanção podem não compensar o ganho de estabilidade ao fazer a Rússia recuar do conflito. Como a troca do gás russo pelo GNL tem barreiras de curto prazo, a Europa pode ficar refém da política russa. Pelos resultados do capítulo 5, também podemos concluir que a dificuldade europeia para impor sanções à Rússia tem uma relação não trivial com alguns parâmetros do modelo. Concluímos por exemplo que quanto maior o custo marginal do gás na Rússia, mais difícil se torna para a Europa aplicar sanções à Rússia. Por outro lado temos um resultado intuitivo no modelo: quanto maior o

benefício geopolítico russo de invadir a Ucrânia, mais difícil se torna para a Europa aplicar sanções à Rússia.

Essas conclusões são importantes pois geram reflexões acerca do planejamento energético de um Estado (ou conjunto de estados). Se um dos objetivos do planejamento energético é a segurança no fornecimento de energia deve-se prever as vulnerabilidades políticas que a dependência de um fornecedor pode provocar. Algum nível de independência e segurança energética baseada em outras fontes é necessário para que, em caso de conflito ou de política agressiva por outra nação, o Estado possa adotar sanções que desencorajem a nação agressora. Desta forma pode-se diminuir o impacto que as sanções causam na utilidade da população do Estado sancionador.

Nosso modelo, no entanto, possui algumas limitações importantes. O preço do GNL foi adotado como fixo, decorrente do mercado internacional. A realidade pós invasão da Ucrânia, no entanto demonstrou que o preço pode sofrer uma grande variação em caso de choque de demanda. Uma expansão útil do modelo seria modelar o poder de mercado dos fornecedores e a variação de preços decorrente da demanda por cada fonte de gás. Outro ponto é que no modelo a decisão pelo conflito é considerada exógena. A decisão da Rússia pelo conflito certamente é influenciada por fatores sem ligação com o mercado de gás, mas o peso de uma eventual sanção poderia ser levado em conta em um modelo que internalizasse essa decisão. Finalmente um trabalho futuro poderia abordar a economia política das sanções adotadas, pois embora a sanção tente reestabelecer uma estabilidade política que tem valor para a Europa, a diminuição do consumo de gás também traz uma redução da utilidade da população, o que pode influenciar decisões eleitorais futuras e mudar consequentemente decisões políticas. Esses pontos, no entanto, são deixados para pesquisa futura.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Edmar Fagundes de; FERRARO, Marcelo Colomer. Indústria do gás natural: fundamentos técnicos e econômicos. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

ATA, Nurcan Kilinc; ISMAILOV, Nail; VOLKOVA, Irina. Sanctions and the Russian Federation's Economy: A Systematic Literature Review and Analysis of Global Energy Sector. **Ege Academic Review**, v. 23, n. 3, p. 377-392, 2023.

BP, B. P. Statistical review of world energy 2022. BP, 2022. Disponível em <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> Acesso em 17/01/2023

CHANG, Youngho et al. Competition and cooperation in the natural gas market: a game-theoretic demand-base analysis. *Asia Europe Journal*, v. 19, p. 21-49, 2021.

CORBETT, Michael. Oil shock of 1973–74. *Federal Reserve History*, v. 22, 2013. EIA, Russia: International energy data and analysis, US Energy Information Administration, 2015.

ESER, Patrick; CHOKANI, Ndaona; ABHARI, Reza. Impact of Nord Stream 2 and LNG on gas trade and security of supply in the European gas network of 2030. *Applied energy*, v. 238, p. 816-830, 2019.

FAVARO, Marina; WILLIAMS, Heather. False sense of supremacy: emerging technologies, the war in Ukraine, and the risk of nuclear escalation. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, v. 6, n. 1, p. 28-46, 2023.

FISCHHENDLER, Itay; HERMAN, Lior; MAOZ, Nir. The political economy of energy sanctions: insights from a global outlook 1938–2017. *Energy Research & Social Science*, v. 34, p. 62-71, 2017.

GIBBONS, Robert S. *Game theory for applied economists*. Princeton University Press, 1992.

GOLDTHAU, Andreas; BOERSMA, Tim. The 2014 Ukraine-Russia crisis: Implications for energy markets and scholarship. *Energy Research & Social Science*, v. 3, p. 13-15, 2014.

IEA, Gas Market Report, Q3-2022. IEA, 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q3-2022> Acesso em 17/01/2023

IEA, Gas Market Report, Q4-2022. IEA, 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q4-2022> Acesso em 17/01/2023

KAEMPFER, William H.; LOWENBERG, Anton D. The political economy of economic sanctions. *Handbook of defense economics*, v. 2, p. 867-911, 2007.

KONRAD, Kai A.; THUM, Marcel. Elusive effects of export embargoes for fossil energy resources. *Energy Economics*, v. 117, p. 106441, 2023.

TONG, Eric. Repercussions of the Russia–Ukraine war. *International Review of Economics & Finance*, v. 89, p. 366-390, 2024.

YERGIN, Daniel. A busca. Editora Intrinseca, 2014.