



ANÁLISE DA CONCORRÊNCIA NO MERCADO DE REFINO ATRAVÉS DE MODELO DE COMPETIÇÃO POR PREÇOS

Diego Henrique Gonçalves Bezerra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro

Mai de 2022

ANÁLISE DA CONCORRÊNCIA NO MERCADO DE REFINO ATRAVÉS DE MODELO
DE COMPETIÇÃO POR PREÇOS

Diego Henrique Gonçalves Bezerra

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2022

Bezerra, Diego Henrique Gonçalves

Análise da concorrência no mercado de refino através de modelo de competição por preços/ Diego Henrique Gonçalves Bezerra. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

VIII, 54 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 43-48.

1. Teoria dos jogos. 2. Modelos de Bertrand 3. Refino de petróleo. I. Szklo, Alexandre Salem. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título

À minha filha Gabriela

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Petrobras e especialmente aos meus gerentes Antonio Vicente e Leonardo Fialho pela oportunidade e pelo incentivo ao mestrado.

Ao meu orientador Alexandre Szklo pela brilhante orientação. Seu domínio e expertise em todos os assuntos abordados na dissertação facilitaram muito a evolução do trabalho. Sempre respondendo muito rapidamente, com comentários relevantes e com muita paciência, foi sem dúvida fundamental no direcionamento deste mestrado.

Aos integrantes da banca examinadora, André, Laura e Horta por aceitarem o convite e pelas contribuições.

Aos meus pais por todo o investimento em minha educação e pela base que me fez chegar até aqui.

À minha família, especialmente à minha filha, mas também à Priscila, Amanda, Sarah, Karina e toda à família Rocha e Bezerra pela convivência e suporte durante esse período que foi essencial.

Aos meus colegas de estudo e trabalhos do PPE, principalmente Caroline Pessoa, Clarissa, Kárys, Gabriela, Fernando e todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que esse processo fosse mais proveitoso e tranquilo.

À Sandra e ao Paulo do PPE por facilitarem os trâmites na Coppe, o que é algo essencial para todos os alunos da pós-graduação.

A todos os meus amigos do clã – Felipe, Aline, Bárbara, Arthur, Sara, Suzane, Guilherme e Michel pela convivência no período.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DA CONCORRÊNCIA NO MERCADO DE REFINO ATRAVÉS DE MODELO DE COMPETIÇÃO POR PREÇOS

Diego Henrique Gonçalves Bezerra

Maio/2022

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A intenção de venda de metade da capacidade de refino por parte da Petrobras faz com que o mercado de refino brasileiro possa passar por uma fase de competição entre empresas no setor que historicamente esteve concentrado nas mãos da Petrobras. Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo de competição baseado na teoria dos jogos e no modelo de Bertrand de determinação simultânea de preços para prever a direção de movimento dos atores envolvidos. Em uma comparação com um trabalho que utilizou o modelo de Cournot em sua abordagem, verificou-se que os resultados de preços desta dissertação ficaram mais próximos do observado em um passado recente. Foram avaliados quatro casos distintos em que o modelo escolheu utilizar diferentes petróleos, exerceu a competição de preços em ambos os derivados modelados e até mesmo interrompeu a operação da refinaria com menor rendimento no derivado de maior valor. Foram obtidos preços de equilíbrio na paridade importação, na paridade exportação e em valores intermediários, a depender do caso analisado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

REFINING MARKET COMPETITION ANALYSIS USING PRICE COMPETITION
MODEL

Diego Henrique Gonçalves Bezerra

May/2022

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

The intention to sell half of Petrobras' refining capacity means that the Brazilian refining market can go through a phase of competition between companies in the sector that has historically been concentrated in Petrobras. This work developed a model of competition based on game theory and Bertrand's model of simultaneous price determination to predict the direction of movement of the actors involved. In a comparison with a work that used the Cournot model in its approach, it was found that the price results of this dissertation were closer to those observed in the recent past. Four different cases were evaluated. In their results the model opted to use different oils, exerted price competition on both modeled refined products and even interrupted the operation of the refinery with the lower yield for the premium fuel. Equilibrium prices were obtained at the import parity, at the export parity and at intermediate values, depending on the case analyzed.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
2 EVOLUÇÃO DO MERCADO DE REFINO NO BRASIL	4
3 TEORIA DOS JOGOS	8
3.1 Modelo de Stackelberg	10
3.2 Modelo de Cournot	13
3.3 Modelo de Bertrand.....	15
3.4 A escolha pelo modelo de Bertrand	17
4 MÉTODO	19
4.1 Representação do modelo de Bertrand.....	19
4.1.1 Hipóteses simplificadoras	20
4.1.2 Formulação do problema de otimização das refinarias	22
4.1.3 Algoritmo de solução do modelo.....	24
4.1.4 Casos a serem avaliados	29
5 RESULTADOS	33
5.1 Caso base.....	33
5.2 Caso 1	35
5.3 Caso 2	37
5.4 Caso 3	39
5.5 Discussão	40
5.5.1 Comparação com resultados de um modelo de Cournot	43
6. CONCLUSÃO.....	47
7. BIBLIOGRAFIA	50
APÊNDICE – Código fonte do programa.....	55

1 INTRODUÇÃO

No final de 2021, a Petrobras concluiu a venda de uma de suas maiores refinarias, a Rlam. Esse pode ser o início de um processo que vai mudar significativamente o mercado de refino brasileiro, já que a empresa anunciou a intenção de vender metade da sua capacidade de processamento de petróleo.

Para entender essa nova dinâmica do mercado, com refinadores competindo em território nacional, é importante entender algumas características desse mercado. Com grande necessidade de investimento em capital, existem poucos ofertantes, que vão interagir de forma estratégica. O capítulo 2 mostra um histórico do mercado de refino brasileiro para compreender o processo que levou ao ponto em que estamos hoje.

É igualmente relevante fazer uma revisão da literatura que aborda esse tipo de problema. Pompermayer (2002) fez um estudo justamente neste primeiro momento de abertura do mercado brasileiro, construindo um modelo de equilíbrio espacial de preços de derivados de petróleo. Nesse modelo, foram consideradas competições usando o modelo de Cournot e Stackelberg entre refinarias e importadores, além de considerar políticas de governo. Por ser um modelo complexo, utilizou ferramentas como inequações variacionais e algoritmos iterativos para chegar no equilíbrio de Nash-Cournot. Ainda no mercado de refino de petróleo, Park (2020) fez uma identificação da estrutura de mercado sul-coreana por um modelo do tipo Bresnahan-Lau usando dados reais, buscando determinar o grau de competição do mercado, concluindo que o mercado de gasolina e diesel estavam próximos a um mercado perfeitamente competitivo, porém um corte de impostos fez com que as empresas ganhassem poder de mercado.

Modelos de competição de Cournot são comuns para a indústria de energia, e vale citar também o trabalho de Soto-Reyes e Gutierrez-Alcaraz (2007), que elaboraram um modelo integrado do mercado de eletricidade e combustíveis utilizando esse tipo de competição. Willems (2002) aplicou um modelo de competição de Cournot também no mercado de eletricidade, mas com restrição de capacidade na transmissão. Lundin (2020) elaborou um modelo de Cournot no mercado de varejo de eletricidade e aplicou ao mercado nórdico de energia. Finalmente, Chen et al. (2017) fizeram uma análise de um equilíbrio de Cournot em um mercado de eletricidade com uma alta proporção de geradores a gás.

Modelos do mercado de energia de Stackelberg são comuns principalmente na análise da atuação da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo). Huppmann e Holz (2010) analisaram se a Arábia Saudita atua como um líder de Stackelberg ou se a OPEP atua como um cartel. Huppmann (2013) analisou a atuação

da OPEP como um líder de Stackelberg em comparação com um modelo de escolha simultânea de quantidades de Cournot. Na mesma linha, Yang (2013) calibrou um modelo de Stackelberg e Cournot com dados reais e comparou o ganho dos jogadores em ambas as situações.

Porém, este trabalho se propõe a estudar a competição em preços, e não em quantidades. O capítulo 3 desta dissertação faz uma breve comparação entre esses diferentes tipos de jogos competitivos e os motivos pela escolha do modelo de Bertrand, ou seja, a competição em preços. Entre os motivos a serem discutidos, pode-se destacar o fato de que as refinarias decidem suas produções no curto prazo com modelos de programação linear com os preços já definidos, em um horizonte de normalmente um mês à frente. Ou seja, a escolha do preço antecede a escolha da quantidade, como prevê o modelo de Bertrand.

Alguns trabalhos examinaram outras características além do clássico modelo de Bertrand, como De Nijs (2012) e Blume (2003), que avaliaram a mudança da premissa do custo marginal idêntico entre competidores. Boone et al. (2012) fizeram a mesma avaliação que os anteriores, porém experimentalmente em um laboratório com simulação dos jogos. Outra alteração foi estudada por Osborne e Pitchik (1986), que inseriram uma restrição de capacidade à competição por preços de um duopólio.

Assim, a revisão da literatura sugere que modelos no mercado de refino de petróleo foram estudados mais como um equilíbrio de Cournot. Já no mercado de energia, existem estudos que utilizam o modelo de Stackelberg também. Os trabalhos que estudaram mais o modelo de competição por preços não desenvolveram as principais características do mercado de refino de petróleo no curto prazo, que é uma indústria intrinsecamente multiproduto, limitada em capacidade e com baixa elasticidade preço da demanda.

Dessa forma, o primeiro objetivo deste trabalho é desenvolver um método para modelar uma competição de preços no refino de petróleo. O segundo objetivo consiste em aplicar o modelo e verificar a adequação dos movimentos sugeridos ao que se conhece desse mercado. Os detalhes do modelo desenvolvido são elaborados no capítulo 4, enquanto no capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do modelo a quatro casos distintos. O caso base apresenta a concorrência a partir de alguns dados básicos, representando um caso típico de competição em refino. Com a finalidade de observar a robustez do modelo, serão feitas algumas variações deste caso base para verificar se a metodologia proposta é capaz de explicar movimentos conhecidos no mercado de derivados de petróleo. Neste sentido, o caso 1 faz uma modificação da base para forçar uma competição em ambos os produtos das refinarias. O caso 2 retrata uma situação em que apenas uma refinaria seria capaz de atender todo

o mercado doméstico, ou seja, ocorreria o fechamento de uma das refinarias, como se observa com frequência, principalmente fora do Brasil. O caso 3 faz uma modificação do caso 1 para fazer o modelo escolher o tipo de petróleo leve, provando que, a depender dos dados do problema, o modelo é capaz de preferir a escolha do petróleo leve ou pesado, o que também ocorre em diferentes momentos do mercado de refino.

Em se mostrando adequado para representar a competição no mercado de refino, o modelo proposto nesta dissertação poderá ser um instrumento para análises de mudanças de estrutura de mercado, não só para o Brasil, mas para qualquer região do mundo que guarde algumas similaridades. Além da análise de mudança na estrutura, pode ser possível avaliar os efeitos de políticas públicas em variáveis como a quantidade ofertada de derivados, preço interno dos derivados e o processamento de petróleo nas refinarias. Outra possibilidade é a análise do comportamento dos agentes frente a uma mudança na paridade de importação ou exportação dos produtos refinados.

2 EVOLUÇÃO DO MERCADO DE REFINO NO BRASIL

A construção de refinarias no Brasil passou por algumas fases distintas. Vale mencionar uma primeira fase anterior à criação da Petrobras que foi dominada por investimentos privados em refinarias de baixa complexidade¹, para atender um mercado brasileiro ainda muito incipiente. Quando a Petrobras foi criada em 1954, havia seis refinarias privadas já em operação ou com autorização para sua construção e uma refinaria estatal, a refinaria de Mataripe, na Bahia (PERISSÉ, 2007), conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Refinarias privadas em 1954

Refinaria	Localização	Ano de operação	Capacidade inicial (bbl/d)
União	Capuava-SP	1954	20000
Manguinhos	Rio de Janeiro – RJ	1954	10000
Ipiranga	Rio Grande – RS	1936	1000
Manaus	Manaus – AM	1956	5000
Matarazzo	São Caetano – SP	1936	500
Riograndense	Uruguaiana – RS	1932	150

Fonte: Elaboração própria a partir de (PERISSÉ, 2007)

Na fase seguinte, o processo se inverteu e a Petrobras passou a ser a grande investidora no refino brasileiro e, já em 1965, com a construção de mais duas refinarias² e a ampliação de Mataripe, passou a deter 82,5% da capacidade de refino nacional (ODDONE, 1965). Até o ano de 1980, adquiriu duas das refinarias privadas, a refinaria União³ e a de Manaus, construiu mais refinarias e estruturas de logística ao longo do país, atingindo 98% da capacidade de refino brasileira, tornando-se hegemônica no refino de petróleo, conforme mostra a Tabela 2, a seguir.

¹ Complexidade de uma refinaria se refere ao quanto ela possui de capacidade de unidades à jusante da destilação capazes de agregar valor aos produtos. Ou seja, quanto mais complexa, maior a capacidade de agregar valor ao óleo bruto.

² A Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão – RPBC e a refinaria de Duque de Caxias – Reduc

³ Atual Recap

Tabela 2 - Refinarias construídas pela Petrobras de 1965 a 1980

Refinaria	Ano de operação	Capacidade inicial (bbl/d)
Lubnor ¹	1966	2830
Refap	1968	45000
Regap	1968	45000
Replan	1972	126000
Repar	1977	126000
Revap	1980	189000

Fonte: Elaboração própria a partir de (PERISSÉ, 2007)

É possível notar nessa fase de expansão da Petrobras o espalhamento pelo território nacional. A refinaria Lubrificantes do Nordeste (Lubnor) foi instalada no Ceará, a refinaria Alberto Pasqualini (Refap) está localizada no Rio Grande do Sul, a refinaria Gabriel Passos (Regap) está em Minas Gerais, a refinaria de Paulínia (Replan²) e a Refinaria Henrique Lage (Revap³) estão em São Paulo, enquanto a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (Repar⁴) está no Paraná.

Durante essa fase de expansão de capacidade de refino da Petrobras, houve também mudanças significativas no esquema de refino. Com a descoberta da Bacia de Campos nos anos 70, iniciou-se uma fase de produção nacional de petróleos pesados. Como as refinarias brasileiras foram projetadas para processamento de óleo leve, houve aporte de capital para aumentar a conversão nas refinarias, principalmente com a construção de unidades de coqueamento retardado. Outros movimentos mais recentes ocorreram devido ao avanço da qualidade dos derivados, principalmente na gasolina e no diesel, que levaram a investimentos em hidrotreamento e em unidades de geração de *booster* de octanagem.

Outros investimentos de grande importância no período foram os investimentos em logística. Destacam-se alguns oleodutos como o Orbel, que liga o Rio de Janeiro a Minas Gerais, inaugurado em 1968, e alguns outros que foram inaugurados na década de 90, como o Osrio, que conecta São Paulo e Rio de Janeiro, Orsub, na Bahia, Opasc, que liga Paraná e Santa Catarina, e finalmente o Osbra, que liga a Replan a Brasília,

¹ Inicialmente designada como Asfor (Fábrica de Asfalto de Fortaleza) e em 1998, com a entrada em operação da primeira unidade de lubrificantes naftênicos da Petrobras, passou a se chamar Lubnor (Lubrificantes do Nordeste)

² Inicialmente a refinaria foi denominada Refinaria do Planalto e manteve a abreviação anterior mesmo após a mudança de nome para Refinaria de Paulínia.

³ Inicialmente denominada Refinaria do Vale do Paraíba

⁴ Inicialmente denominada Refinaria do Paraná

com 964 km de extensão. Além dos oleodutos, existem os terminais com suas tancagens de produtos, que permitem garantir uma estabilidade no fornecimento de derivados, absorvendo variações entre a oferta e demanda.

A primeira sinalização de mudança da estrutura do mercado de refino de petróleo no Brasil, após todos esses investimentos da Petrobras, aconteceu com a quebra do monopólio no refino de petróleo em 1997, que, apesar de não ter gerado investimento significativo em novas refinarias, abriu a possibilidade da concorrência de importadores. Outro movimento significativo foi a criação da Refap S.A., em que a Petrobras vendeu 30% das ações da refinaria para a Repsol em 2001. Porém, em 2010, a Petrobras comprou a participação da Repsol e, dois anos depois, reincorporou a Refap aos ativos da empresa. Hallack, Kaufmann e Szklo (2020) pontuam que, a partir de 2002, um controle de preços de derivados por parte do governo brasileiro através da Petrobras desincentivou competidores a suprir o mercado local, o que cessou a partir de outubro de 2016, com a política de paridade de preço de importação. Além disso, a malha logística brasileira de transporte de derivados foi basicamente construída pela Petrobras de forma a otimizar suas operações, incluindo a movimentação de produtos intermediários, mas não foi desenhada para atender diferentes empresas, como ocorre em outros países em que existem ativos logísticos de empresas de transporte prestadoras de serviço.

Outra mudança significativa no mercado foi anunciada em 2018. A petrolífera divulgou a colocação à venda de oito das suas 13 refinarias¹ em território brasileiro, atendendo ao acordo firmado com o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) e à Resolução nº9/2019 do Conselho Nacional de Política Energética (PETROBRAS, 2020). No final de 2021, já havia sido concluída a venda da refinaria Landulpho Alves na Bahia, a Rlam.

Outro aspecto importante do mercado de refino é o balanço entre produção e o mercado local, que pode ser traduzido pelas exportações ou importações líquidas. Será visto adiante que esse é um indicador que pode definir os preços de produtos segundo a metodologia aqui apresentada. Segundo dados da ANP (2021), de 2011 a 2020, o Brasil foi importador líquido de gasolina, diesel e querosene de aviação e exportador líquido de óleo combustível², como mostra a Figura 1.

¹ Refap, Repar, Six, Regap, Rlam, Rnest, Lubnor e Reman

² Parte da exportação de óleo combustível se refere a abastecimento de navios de bandeira estrangeira em portos nacionais

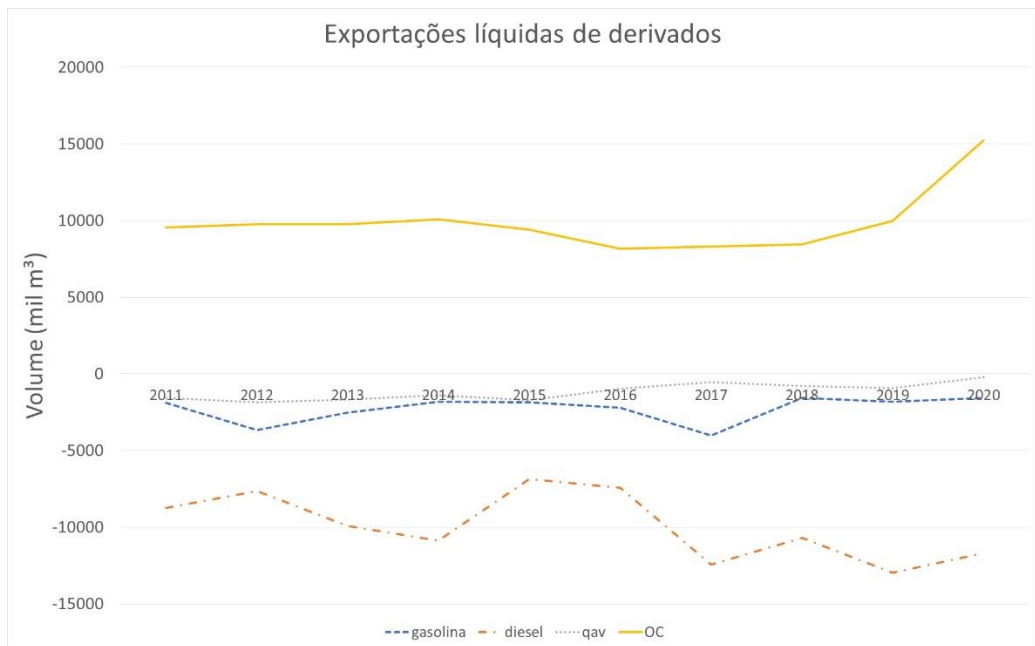


Figura 1 – Exportações líquidas dos principais derivados de petróleo

Fonte: Elaboração própria a partir de ANP (2021)

3 TEORIA DOS JOGOS

A natureza do problema que se deseja modelar precisa ser bem entendida para que se possa analisar a melhor ferramenta a ser aplicada. No caso de uma competição no mercado de refino, que é uma indústria intensiva em capital e possui uma logística própria que pode limitar a competição, existem poucas empresas ofertando derivados de petróleo nos mercados, com exceção de alguns *hubs* como o Golfo Americano¹. Porém, essa região nos Estados Unidos é singular no mercado regional. Monteiro (2008) faz a seguinte descrição sobre esse distrito (*Petroleum Administration for Defense District III*):

“Esta região se caracteriza por ser a maior produtora de derivados dos EUA. Grande parte das companhias com posição no upstream e no refino estão presentes nesta região devido a sua proximidade dos Golfos (Golfo do México e Golfo dos EUA). Este excesso de oferta faz com que a região apresente as menores margens do país.”

Portanto, fica evidente a característica única da região do Golfo Americano, enquanto o padrão do mercado de refino são poucas empresas com uma competição limitada. Nesse caso, a Teoria dos Jogos é um marco teórico relevante para modelar esse tipo de interação.

A Teoria dos Jogos é um campo amplo em que muita pesquisa já foi desenvolvida, sendo aplicada em economia, administração, ciências sociais, entre outras. Para se ter uma ideia da abrangência da utilização da teoria, recentemente Araújo et al. (2021) usaram um modelo de teoria dos jogos para prever o incentivo que os agentes interessados têm em preservar ou desmatar a região Amazônica. Por sua vez, Kaviari et al. (2019) desenvolveram um modelo de simulação baseado em agentes, que utiliza teoria dos jogos para resolver os conflitos dos agentes, com o objetivo de prever o crescimento de uma cidade. Barough, Shoubi e Skardi (2012) aplicaram teoria dos jogos para resolver conflitos em projetos de construção. Vass e Polner (2022) utilizaram jogos clássicos da teoria dos jogos para aprofundar o entendimento da paranoia. Ou seja, aplicações de teoria dos jogos são observadas nas mais diferentes áreas do conhecimento.

É uma área relevante na Economia que já rendeu o Prêmio de Ciências Econômicas em Memória de Alfred Nobel em dois anos. Em 1994, para John Harsanyi, John Forbes Nash e Reinhard Selten pelas análises do equilíbrio em jogos não-cooperativos, e em 2005, para Robert J. Aumann e Thomas C. Schelling pelos avanços na compreensão do conflito e da cooperação na teoria.

¹ O Golfo Americano também está conectado ao Meio-Oeste (*Petroleum Administration for Defense District II*), onde existem refinarias de diferentes portes, e ao mercado externo

Um exemplo clássico em teoria dos jogos é o dilema dos prisioneiros. Neste jogo, dois ladrões foram presos pela polícia devido a algumas evidências e recebem uma proposta da polícia. A proposta consiste em que, caso um ladrão confesse e seu parceiro não, aquele que confessou fica livre da prisão e o comparsa é condenado a quatro anos. Se ambos confessam, ficarão dois anos na prisão. Se nenhum confessa, ambos ficarão apenas um ano na prisão.

O jogo descrito anteriormente pode ser representado na Tabela 3 pelo que se chama de forma estratégica ou normal de um jogo. Neste modo, as estratégias de um jogador são listadas nas linhas e as do outro jogador, nas colunas. Os números da matriz representam as recompensas dos jogadores. O primeiro número é a recompensa do jogador cujas estratégias estão representadas nas linhas e o segundo número, a recompensa do jogador representado nas colunas.

Tabela 3 - jogo do dilema dos prisioneiros

Ladrão 1	Ladrão 2	
	Confessa	Não confessa
Confessa	-2, -2	0, -4
Não confessa	-4, 0	-1, -1

Fonte: Fiani (2009)

É um jogo didático, porque mostra que a melhor estratégia para os jogadores resulta em um equilíbrio que poderia ser melhor caso os jogadores cooperassem.

A estratégia de confessar é estritamente dominante em relação a não confessar para ambos os jogadores, o que leva o equilíbrio para o resultado de (-2, -2). Porém o resultado (-1,-1) é melhor para ambos, seria um ano a menos na prisão para cada um, mas como um jogador não consegue garantir a cooperação do outro jogador, eles acabam escolhendo a solução de equilíbrio da resposta não cooperativa.

Esse resultado é de suma importância para a ciência econômica por quebrar um paradigma de que a competição sempre levaria a um ótimo de Pareto¹, maximizando o bem-estar social. Aliado à Teoria dos Jogos, as falhas de mercado também apontaram no sentido de que havia imperfeições que afastavam o resultado do livre mercado do ótimo socialmente desejável.

¹ Ótimo de Pareto corresponde à situação em que ninguém pode ter sua situação melhorada sem piorar a situação de pelo menos outro indivíduo.

Falhas de mercado são situações em que a alocação de bens e serviços dada por um livre mercado não é eficiente, gerando perda de bem-estar social. Existem algumas situações que geram falha de mercado como a assimetria de informação, bens públicos, mercados não competitivos, externalidades, entre outras. Podemos citar uma falha de mercado clássica associada ao mercado de petróleo que é a externalidade. O mercado de petróleo, tanto na produção quanto no consumo, gera poluição, que contém aspectos negativos à saúde pública, além de ser um grande contribuinte para as emissões de CO₂, que é responsável pelo aquecimento global. Varian (2006) faz uma análise da Lei do Ar Limpo de 1963 dos Estados Unidos como uma forma de combater a externalidade da poluição.

O problema apresentado anteriormente envolve decisões com variáveis discretas, como escolher a opção “confessa” ou “não confessa” no dilema dos prisioneiros. Porém, o problema da competição no mercado de refino envolve majoritariamente decisões com variáveis contínuas, como a quantidade de petróleo a ser processada, o preço de um derivado e outras. Existem algumas variáveis discretas que podem ser usadas em modelos de refino, como a escolha de um modo de operação, entrada em operação ou não de uma unidade que possui uma carga mínima, mas normalmente são a minoria das variáveis da indústria de processos. Para este caso de uso de variáveis contínuas, existe uma parte da teoria que se dedica à interação estratégica com variáveis contínuas e que será discutida posteriormente: o modelo de Cournot, o de Stackelberg e o de Bertrand.

O problema analisado nesta dissertação trata de um mercado com grande aporte de capital, fazendo com que existam poucos ofertantes devido a essa barreira de entrada. Poucos ofertantes levam a um mercado oligopolizado, em que a decisão de uma firma leva em consideração as decisões da outra empresa, em uma interação estratégica. Nesse tipo de mercado, os preços anunciados por cada agente e as quantidades a serem produzidas afetam a rentabilidade percebida pelos outros, pois isso pode ter impacto significativo nos preços e no *market share* das outras empresas. Cria-se, então, um ambiente estratégico em que o nível de produção e os preços que maximizam o lucro de um agente são funções dos níveis de produção e de preços de seus concorrentes.

3.1 Modelo de Stackelberg

Diferentemente dos modelos de Cournot e Bertrand, que são jogos simultâneos, o modelo de Stackelberg é um jogo sequencial. Também chamado de modelo líder-seguidor, neste jogo o líder faz seu movimento primeiro e, em um segundo momento,

seus competidores reagem. Assim como os modelos anteriores, este também apresenta estratégias contínuas, o que é uma característica necessária para determinar variáveis contínuas, como nível de processamento e de atendimento aos mercados. Este modelo foi apresentado pelo economista alemão Heinrich von Stackelberg em 1934 (STACKELBERG, 2011).

Utilizando o exemplo de Fiani (2009), considere um duopólio formado pela Empresa 1 e Empresa 2, que produzem um produto homogêneo nas quantidades q_1 e q_2 e uma curva de demanda dada pela equação (1):

$$p(q) = a - b(q_1 + q_2) \quad (1)$$

Onde:

p – preço do produto

q – quantidade total ofertada do produto

a – coeficiente linear da curva linear de demanda

b – coeficiente angular da curva linear de demanda

O custo unitário das empresas será considerado como constante e igual a “ c ”. O lucro de cada empresa é a receita menos o custo e será chamada pela letra “ π ”. Sendo a receita o preço multiplicado pela quantidade, temos as equações dos lucros das empresas abaixo:

$$\pi_1 = (a - b(q_1 + q_2)) \times q_1 - cq_1 \quad (2)$$

$$\pi_2 = (a - b(q_1 + q_2)) \times q_2 - cq_2 \quad (3)$$

Resolvendo (2) e (3), obtemos as equações (4) e (5).

$$\pi_1 = aq_1 - bq_1^2 - bq_1q_2 - cq_1 \quad (4)$$

$$\pi_2 = aq_2 - bq_2^2 - bq_1q_2 - cq_2 \quad (5)$$

A Empresa 1 será assumida como a empresa líder, incorporando a reação da Empresa 2 ao tomar suas decisões. Fazendo a derivada de π_2 em relação a q_2 , obtemos a equação (6).

$$\frac{\partial \pi_2}{\partial q_2} = a - 2bq_2 - bq_1 - c \quad (6)$$

Igualando (6) a zero, condição de maximização, é possível obter q_2 :

$$q_2 = \left(\frac{a-bq_1-c}{2b} \right) \quad (7)$$

(7) é substituída em (4), que é o lucro da Empresa 1, resultando na equação (8).

$$\pi_1 = aq_1 - bq_1^2 - bq_1 \left(\frac{a-bq_1-c}{2b} \right) - cq_1 \quad (8)$$

Maximizando a função acima em relação a q_1 :

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1} = a - 2bq_1 - \frac{ab-2b^2q_1-cb}{2b} - c = 0 \quad (9)$$

Chegamos ao resultado do equilíbrio de q_1 .

$$q_1^e = \frac{a-c}{2b} \quad (10)$$

Substituindo (10) em (7):

$$q_2^e = \frac{a-c}{4b} \quad (11)$$

Percebe-se que o resultado dado pela equação (10) é o dobro da quantidade de equilíbrio do competidor seguidor, dada pela equação (11). Isso ocorre devido a vantagem que a empresa líder tem ao jogar primeiro.

Essa opção normalmente é utilizada quando um dos jogadores apresenta alguma vantagem significativa como por exemplo um tamanho muito maior do que seus concorrentes. No capítulo 1, foram elencados alguns trabalhos que utilizaram esse modelo como Huppmann e Holz (2010), Huppmann (2013) e Yang (2013). Esses trabalhos analisaram a OPEP como um líder de Stackelberg, o que faz sentido, dado seu tamanho significativamente maior e custo de produção mais baixo comparado aos outros produtores. Neste trabalho, está sendo analisada a competição entre refinarias relativamente parecidas em termos de tamanho, o que descarta a opção por esse modelo. Além disso, a presença dos importadores tem um potencial de dificultar que o líder exerça seu papel, por estar sempre ameaçado pela competição com essas empresas.

3.2 Modelo de Cournot

Este modelo tem o nome de Antoine Augustin Cournot (1801-1877), que publicou um trabalho em que empresas escolhem as quantidades ofertadas simultaneamente (COURNOT, 1838). Uma vez estabelecidas as quantidades das empresas, a quantidade total da oferta é colocada na curva de demanda do produto, determinando o seu preço.

É como se, nesse jogo, as empresas decidissem as quantidades e colocassem seus produtos, considerados homogêneos, à venda no mercado em conjunto. Os competidores não podem diferenciar seus preços como mecanismo de competição, eles decidem apenas as quantidades e o preço será dado pela curva de mercado. Por esse motivo, esse jogo é também chamado de competição de determinação simultânea de quantidades.

O princípio básico da resolução desse problema envolve a determinação de uma função de reação de cada empresa, as quais se cruzam em único ponto, o ponto de equilíbrio de Nash-Cournot. O equilíbrio de Nash é onde os jogadores conhecem as estratégias dos outros jogadores e não conseguem melhorar seus ganhos alterando suas próprias estratégias. Por se referir ao equilíbrio em jogo de determinação de quantidades, ele é chamado de Nash-Cournot (OECD, 1993).

Utilizando o mesmo exemplo aplicado para o modelo de Stackelberg, considere um duopólio formado pela Empresa 1 e Empresa 2, que produzem um produto homogêneo nas quantidades q_1 e q_2 e uma curva de demanda dada pela equação (1). Como a competição agora é simultânea, ambas as equações de lucro (3) e (4) serão derivadas em relação à quantidade. Para a Empresa 1, vale a equação (12):

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1} = a - 2bq_1 - bq_2 - c \quad (12)$$

Para a Empresa 2, vale a equação (6) apresentada na seção anterior.

Fazendo a derivada parcial do lucro de cada empresa em relação à sua quantidade total ofertada igual a zero para ambas as empresas, podemos encontrar o ponto estacionário de maximização do lucro das empresas, ao resolver um sistema de equações com 2 equações e 2 variáveis que são as curvas de reação de cada empresa, apresentadas abaixo.

$$q_1 = \frac{A - bq_2 - c}{2b} \quad (13)$$

$$q_2 = \frac{A - bq_1 - c}{2b} \quad (14)$$

A Figura 2 mostra as curvas de reação das duas empresas, obtidas a partir das equações anteriores.

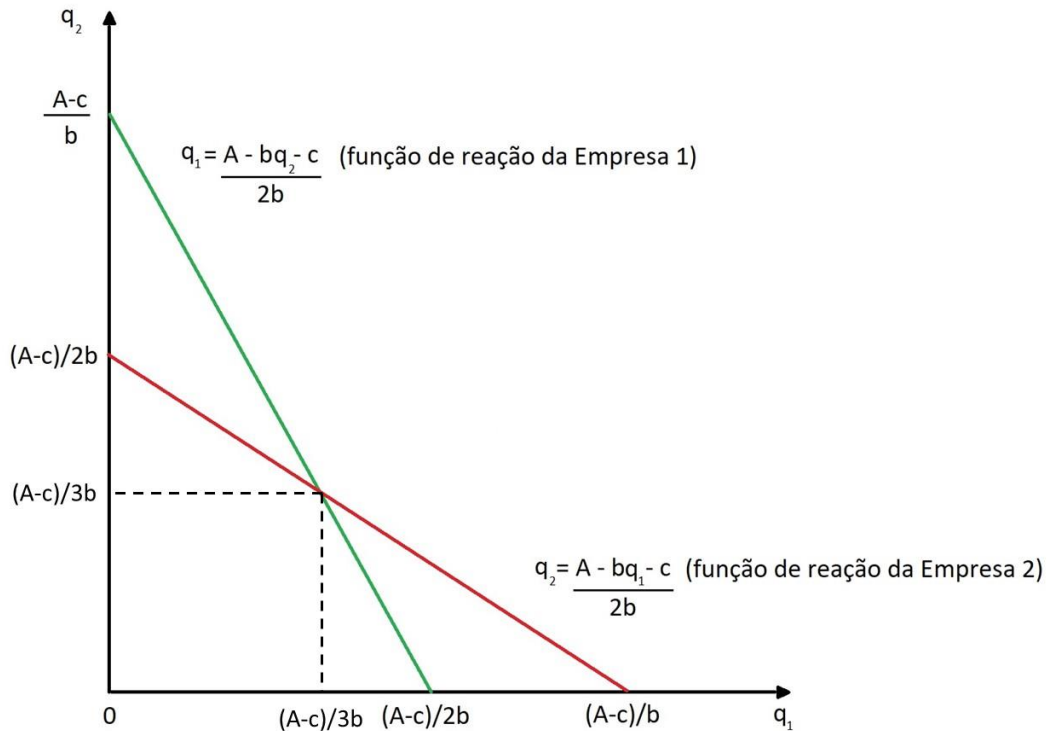


Figura 2 – Gráfico de reação das empresas em competição por quantidades

Fonte: Elaboração própria a partir de Fiani (2009)

O ponto de encontro entre as duas curvas de reação é a melhor estratégia de cada jogador frente ao seu oponente, o que faz com que este seja um equilíbrio de Nash. Resolvendo o sistema das equações (6) e (12) igualadas a zero, condição de maximização, obtemos os resultados a seguir.

$$q_1^e = \frac{a-c}{3b} \quad (15)$$

$$q_2^e = \frac{a-c}{3b} \quad (16)$$

Esse problema tem um resultado muito interessante em que, conforme o número de concorrentes aumenta, o lucro das firmas vai diminuindo e, quando o número de concorrentes tende ao infinito, o resultado é idêntico ao da concorrência perfeita, em

que os competidores atingem o lucro econômico zero e o preço é igual ao custo marginal.

Esse é um resultado que faz sentido intuitivamente: quanto menos competidores, maior o lucro que as empresas conseguiriam obter dos consumidores e quanto maior o número de competidores, essa capacidade vai se reduzindo. Essa pode ser uma das razões pela qual temos muitos trabalhos que utilizam o modelo de Cournot em comparação com o de Bertrand.

Comparando este resultado com o obtido na seção anterior no modelo de Stackelberg, observa-se que a quantidade da empresa líder é maior do que a do resultado de Cournot, enquanto a quantidade da empresa seguidora é menor. Isso se justifica pelo fato de que, no modelo de Cournot, nenhuma empresa possui a vantagem de jogar primeiro sobre a outra.

Como o desenho do jogo envolve a determinação de quantidades em detrimento dos preços, esse modelo seria bem aplicado para mercados em que a quantidade é de alguma forma determinada anteriormente aos preços, como a agricultura em que a decisão do plantio é anterior à colheita. Ou seja, a quantidade é decidida primeiro e os preços somente após a colheita. As indústrias de transformação, no longo prazo, também decidem quantidades primeiro. Os investimentos são decididos em um determinado tempo e anos depois a capacidade estará disponível. Karp e Perloff (1993) escreveram a respeito da escolha do modelo de Cournot aplicado a agricultura:

“[...] Em segundo lugar, a versão dinâmica do modelo Nash-Cournot pode ser razoavelmente motivada. Suponha que haja períodos de tempo discretos (como as temporadas de crescimento) durante os quais as empresas não podem variar seus níveis de produção. Assim, a empresa está correta quando faz a suposição de Nash-Cournot de que seus concorrentes não podem responder a alterações em seus níveis de produção dentro de um período de tempo.” (KARP e PERLOFF, 1993, p. 113, tradução nossa)¹

3.3 Modelo de Bertrand

Este modelo tem o seu nome derivado do matemático francês Joseph Louis François Bertrand (1822-1900), que publicou seu trabalho em 1883, após o trabalho de Cournot. A grande diferença está no instrumento usado na competição, que neste caso são os preços e não as quantidades.

¹ [...] Second, the dynamic version of the Nash-Cournot model may be reasonably motivated. Suppose that there are discrete time periods (such as growing seasons) during which firms cannot vary their output levels. Thus, the firm is correct when it makes the Nash-Cournot assumption that its competitors cannot respond to changes in its output levels within a time period.

O princípio deste modelo é o seguinte: utilizando o mesmo exemplo do item anterior, o lucro de cada empresa, caso assuma todo o mercado, será dado pelo preço subtraído do custo ($p_i - c$) multiplicado pela quantidade vendida. Assumindo equação (1) como representativa da demanda de mercado, temos que a quantidade vendida será dada pela fórmula (17).

$$q = \frac{a-p}{b} \quad (17)$$

As expressões a seguir resumem todas as possibilidades para dois produtores i e j (FIANI, 2009):

$$\pi_i = \begin{cases} (p_i - c) \left(\frac{a-p_i}{b} \right) & \text{se } p_i < p_j \\ \frac{(p_i - c) \left(\frac{a-p_i}{b} \right)}{2} & \text{se } p_i = p_j \\ 0 & \text{se } p_i > p_j \end{cases} \quad (18)$$

$$\pi_j = \begin{cases} (p_j - c) \left(\frac{a-p_j}{b} \right) & \text{se } p_j < p_i \\ \frac{(p_j - c) \left(\frac{a-p_j}{b} \right)}{2} & \text{se } p_j = p_i \\ 0 & \text{se } p_j > p_i \end{cases} \quad (19)$$

Dadas as equações (18) e (19), nenhum dos competidores é incentivado a fazer aumentos em seu preço porque, ao fazê-lo, deixariam todo o mercado para seu concorrente. Ofertando o mesmo preço, ambos compartilham o mercado e os lucros. Se um dos produtores decidir abaixar seu preço para angariar mais clientes e, conseqüentemente, mais lucro, seu concorrente automaticamente fará o mesmo. Desta forma, ambos abaixariam seus preços de venda até não terem mais lucro, atingindo o preço de equilíbrio, dado por: preço de venda (p) = custo de produção (c).

Esse modelo chega a um resultado contraintuitivo de que, com um duopólio, o equilíbrio está no preço igual ao custo marginal, como na competição perfeita, o que ficou conhecido como o paradoxo de Bertrand. Isso ocorre por causa das premissas do modelo. Ambas as firmas produzem um mesmo produto sem nenhuma diferenciação, não existe limite de capacidade, não existem custos de transporte e as firmas são idênticas, com o mesmo custo marginal de produção.

De fato, intuitivamente, o que se espera é que quanto mais concentrado em poucos produtores/fornecedores um mercado for, mais eles exerçam poder de mercado¹ e atinjam lucros excepcionais. Quanto menos concentrado, mais próximo de uma concorrência perfeita, que é resultado do modelo de Cournot.

Alterações nas premissas do modelo podem chegar a resultados distintos deste exemplo específico de Bertrand e serão analisados neste trabalho. Vale destacar que o modelo desta dissertação terá limite de capacidade, as firmas produzirão dois produtos simultaneamente, haverá diferenciação de desempenho entre elas e apenas os jogadores denominados como “importadores” terão discriminação no custo de transporte, sendo esse custo indiferente para os competidores locais.

Outra desvantagem do modelo de Bertrand está na sua formulação. Enquanto no modelo de Cournot é possível determinar uma função de reação para n firmas competidoras, já que o preço é determinado pela função de demanda, em Bertrand o preço é determinado pela interação estratégica em si, fazendo com que o jogo seja parecido com um leilão. Isso faz com que em Cournot seja possível obter uma solução analítica do problema, enquanto, em Bertrand, isso é mais complexo de ser determinado.

3.4 A escolha pelo modelo de Bertrand

Apesar das desvantagens apontadas no item anterior em relação ao modelo de Bertrand, vale analisar qual das formulações de jogos se assemelha mais à competição no mercado de refino. Seria uma questão de compreender se as empresas escolhem primeiramente quantidades ou preços.

Uma refinaria escolhe quais petróleoos vão ser processados e quais derivados serão produzidos nos meses seguintes apoiada por ferramentas de programação matemática que modelam os processos de refino de um modo simplificado (OHARA, 2014). Os preços já estão dados pelos modelos que escolhem as quantidades de matérias primas, as qualidades e a cesta de produtos. Podem ser feitas análises de sensibilidade sobre as rodadas de otimização em relação aos preços para apoiar a área comercial nas decisões. Portanto, o preço é a primeira decisão, baseada na expectativa

¹ Uma empresa ou grupo de empresas possui poder de mercado se for capaz de manter seus preços sistematicamente acima do nível competitivo de mercado sem com isso perder todos os seus clientes. Em um ambiente em que nenhuma firma tem poder de mercado não é possível que uma empresa fixe seu preço em um nível superior ao do mercado, pois se assim o fizesse os consumidores naturalmente procurariam outra empresa para lhes fornecer o produto que desejam ao preço competitivo de mercado (CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA, 2020).

de resposta da demanda frente ao preço, e posteriormente, as quantidades no modelo de programação matemática. Essa lógica de decisão aponta para um jogo que segue o modelo de Bertrand.

Kreps e Scheinkman (1983) demonstraram que, dentro de algumas premissas definidas, um jogo de Cournot seguido por um jogo de Bertrand apresentam o mesmo resultado do jogo de Cournot. Então seria como se uma indústria decidisse suas capacidades primeiro em uma competição por quantidades e em seguida, no jogo de Bertrand do curto prazo, o resultado anterior seria mantido. Frente a esse importante resultado, vale explicar o motivo de porque, neste trabalho, se entende que essa demonstração não seria aplicável.

A decisão das capacidades é feita em modelos de longo prazo, dado que o investimento demora alguns anos para estar operacional e leva mais dezenas de anos para pagar o investimento. A decisão deste modelo é baseada em médias de períodos no longo prazo, sem observar as variações do dia a dia. Após tomada a decisão e a capacidade estar implantada, o problema de determinar as quantidades a serem processadas de petróleo e os derivados produzidos são resolvidos em um problema diferente do original que foi utilizado na definição de capacidades. Isso se dá porque existe um grande número de fatores que alteram os preços, a oferta e a demanda de petróleo e derivados no curto prazo e que não podem ser previstos no modelo de longo prazo. Fatores como crises geopolíticas, nível de estoques de produtos, crises climáticas que afetam tanto a oferta, por paralisar refinarias (como os furacões no golfo do México), como a demanda por derivados, crises econômicas (como a crise do coronavírus), sazonalidade da demanda, entre outros, fazem com que o problema a ser resolvido no curto prazo seja totalmente diferente do longo prazo. E a condição para que a solução de Cournot coincida com a de Bertrand é que as capacidades colocadas pela competição em quantidade sejam a solução de Cournot do jogo de curto prazo, e certamente não são, justamente pelos motivos elencados anteriormente. Como a competição de curto prazo é distinta da de longo prazo, essa correspondência não se verifica.

4 MÉTODO

A fim de testar qual seria o comportamento de um mercado em concorrência oligopolística em preços, foi desenvolvido um modelo matemático com uma representação simplificada do mercado de derivados de petróleo. Neste trabalho, ele se propõe a evidenciar os efeitos de um mercado concorrencial para oferta de derivados de petróleo por refinarias de petróleo em algumas características como o preço dos produtos e a operação das refinarias. A partir de um conjunto de dados para representar o problema proposto, foram obtidos resultados sobre os quais se analisaram o potencial de explicação de fenômenos históricos conhecidos e as consequências de um mercado que migre para uma estrutura desse tipo, como poderia ser o caso brasileiro após a venda de refinarias pela Petrobras.

4.1 Representação do modelo de Bertrand

O modelo proposto procura estabelecer um equilíbrio de Nash em preços, ou um equilíbrio de Bertrand, de refinarias de petróleo competindo pelo mercado de derivados. Apresenta-se uma situação de duopólio, com duas refinarias disputando um mercado próximo e que também podem sofrer competição com importadores. Além do mercado local, estes competidores poderão vender seus produtos para o mercado externo. O modelo se propõe a representar as operações de curto prazo, não sendo possível incluir a expansão de capacidade das unidades como variável de decisão. O equilíbrio representado é parcial, não representando a totalidade do mercado de petróleo e derivados e, por esse motivo, variáveis como o preço do petróleo e as paridades de importação e exportação são exógenos ao modelo.

As hipóteses anteriores, apesar de bem redutoras, podem retratar bem o cenário brasileiro após a venda de ativos de refino por parte da Petrobras. Isso porque existem polos regionais relativamente isolados do ponto de vista logístico, como mostra a Figura 3, onde deve ocorrer uma competição por preços intrarregional. Como não existe uma previsão de construção de novas refinarias ou ativos logísticos, esse cenário deve permanecer ainda por alguns anos. As cinco regiões apresentadas na figura são: a região Norte, abastecida pela Reman, a região Nordeste, abastecida por Rlam e Rnest, a região RJ-MG-ES, abastecida pela Reduc e Regap, a região São Paulo-Centro Oeste, sendo abastecida principalmente pelas refinarias de São Paulo e facilitadas pela utilização de um oleoduto de claros que chega até Brasília, e finalmente a região Sul, abastecida pela Refap e Repar, abrangendo ainda parte significativa do Mato Grosso do Sul.

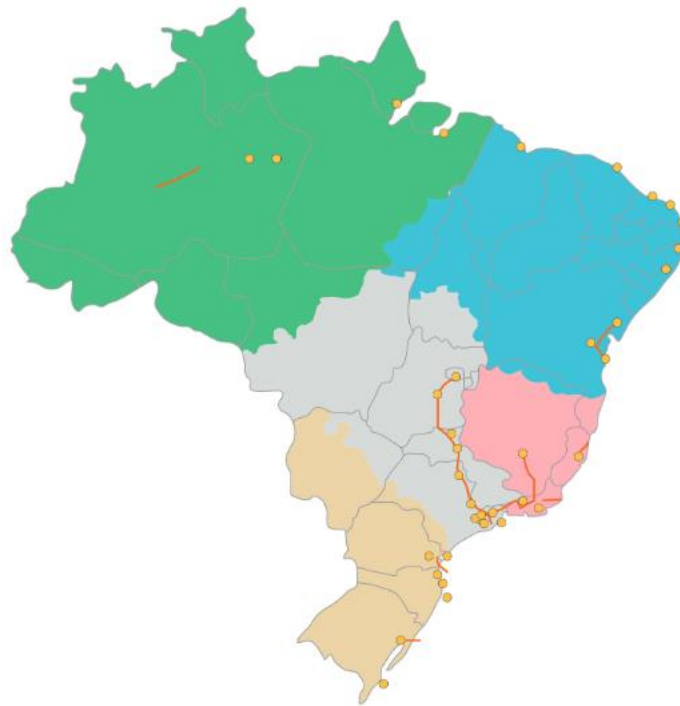


Figura 3 – Regiões do Brasil que possuem relativo isolamento em abastecimento de derivados por refinarias nacionais

Fonte: Petrobras, 2018 *apud* (MENDES *et al.*, 2018)

Nota: linhas correspondem à malha dutoviária e pontos aos terminais

A seção a seguir faz um detalhamento destas hipóteses simplificadoras.

4.1.1 Hipóteses simplificadoras

Em primeiro lugar, a representação do refino de petróleo será baseada apenas em um vetor de rendimentos a partir de óleos selecionados, ou seja, cada petróleo gerará uma fração fixa de derivados finais, para cada refinaria. Na realidade, essa atividade envolve uma série de processos unitários para transformar o petróleo em seus produtos finais (SZKLO, ULLER e BONFÁ, 2012) e a representação mais precisa envolveria representar cada uma dessas operações. Cada unidade de processo tem também a sua flexibilidade operacional, que, em alguns trabalhos, é representada por modos de operação ou campanhas da coluna de destilação atmosférica (BARROS, 2014). Uma unidade de processo, como a destilação, tem uma série de parâmetros ajustáveis como a razão de refluxo, temperatura de corte de produtos, temperatura do forno, entre outros. De forma simplificada, selecionam-se alguns conjuntos de parâmetros com algum objetivo definido e assim se obtém o que definimos como modo

de operação, que pode ser “máximo diesel”, “máxima nafta”, “asfalto” ou qualquer outra definição aplicável. Porém, isso certamente aumentaria significativamente a complexidade matemática do problema e entende-se que esta simplificação está compatível com o objetivo da dissertação, que é avaliar o comportamento das empresas em uma competição de preços, considerando a produção simultânea de um *pool* de derivados nobres e outro residual.

Os produtos finais também serão reduzidos em seu número. Uma refinaria pode produzir dezenas de derivados, de forma a aproveitar o máximo da matéria prima. Para este trabalho, serão considerados apenas dois produtos: um produto de alto valor agregado, representando todos aqueles cujos valores estão acima da matéria prima, o que justifica a operação da refinaria e que, neste trabalho, será chamado de “diesel”, por ser o produto nobre de maior demanda no Brasil. O outro produto representará as correntes residuais, com valor abaixo do petróleo, mas que normalmente são produzidas no refino e que, neste trabalho, será denominado “óleo combustível”. No mundo real, existe uma série de produtos que valem mais do que a matéria prima e um outro conjunto de produtos que valem menos. Todos esses produtos foram agrupados em apenas dois que representam os produtos de alto valor e os residuais. A gasolina, apesar de ser um produto de alta importância no mercado, pode ser agregada junto com o diesel sem prejudicar a análise que será feita. A sua separação permitiria observar qual a influência que o mercado de um dos derivados de alto valor teria no outro, o que neste caso não será possível. Porém, a existência dos dois *pools* propostos será suficiente para validar a competição por preços, sem a necessidade de tornar mais complexa a representação do refino.

A dimensão espacial terá apenas a distinção do mercado próximo das refinarias e do mercado externo. Não haverá diferença entre as empresas competidoras. É como se o cliente não percebesse nenhuma diferença de frete em retirar produto de uma refinaria ou da outra. Não haverá diversos pontos de venda, custos e restrições logísticas. Para o caso brasileiro, em que existem regiões bem definidas e distantes uma da outra, dificultando a competição inter-regional, a falta da variável espacial pode ainda assim representar bem a competição dentro de uma região.

Em relação ao tempo, será considerado que as decisões de produção e vendas são tomadas em um único momento. Ou seja, não haverá passagem de estoque de um período para outro e, portanto, o preço e a produção influenciarão um ao outro imediatamente. Sabe-se que no mundo real o estoque pode suavizar a resposta aos preços de uma quebra de demanda ou de produção (UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2005), mas não haverá esta opção neste modelo.

Os produtos que são vendidos localmente, importados ou exportados serão considerados como tendo a mesma qualidade, como uma *commodity*. Na prática existem algumas diferenças de especificação nos produtos de um país para outro, fazendo com que essas operações de importação ou exportação demandem algum ajuste ou sobreespecificação dos derivados. No Brasil, por exemplo, o diesel S10 tem a especificação de temperatura de destilação de 95% recuperados máximo em 370°C (ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2013) enquanto o diesel europeu tem este valor máximo em 360°C (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2017). Portanto, o importador de diesel normalmente importa um produto com uma especificação a mais, enquanto o exportador nacional precisa ajustar suas operações para fazer um produto de custo maior.

Como o modelo está circunscrito apenas a uma fração muito pequena do mercado global de petróleo e derivados, as decisões do modelo não interferem no preço do petróleo e nem nas paridades de importação e exportação. A elasticidade preço da demanda dos derivados será considerada nula, ou seja, são perfeitamente inelásticos. Como um modelo de curto prazo, é razoável que a elasticidade seja muito baixa porque os consumidores levam um tempo para reagir à variação de preços (EITCHES e CRAIN, 2016; BRONS, NIJKAMP, *et al.*, 2008; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2014). Para os derivados de petróleo, o consumidor necessita mudar seus hábitos como andar de carro ou transporte público ou passar a consumir produtos de produtores mais próximos, o que não é imediato. Por este motivo, os derivados mais nobres são fortemente inelásticos no curto prazo e possuem alto preço de reserva. Esta é uma hipótese considerada razoável pelos motivos elencados anteriormente e é capaz de simplificar significativamente a solução da obtenção do equilíbrio pelo fato de a demanda não precisar ser atualizada conforme o preço varia.

Além disso, considera-se que a informação é perfeita e não existe nenhuma barreira para a operação tanto dos refinadores no mercado local, nem no mercado exportação, quanto para os importadores. Uma possibilidade de estudo futuro poderia ser a flexibilização da premissa de elasticidade nula para os derivados menos nobres, que podem apresentar uma menor rigidez se comparado aos derivados mais nobres, mesmo no curto prazo.

4.1.2 Formulação do problema de otimização das refinarias

Mesmo com uma modelagem simplificada, a otimização de processos de uma refinaria é algo complexo, que demanda a utilização de métodos numéricos de

localização do ponto ótimo, como a programação linear. Esta seção se propõe a exibir a formulação matemática deste problema, que será executado de forma independente para cada refinaria. Primeiramente definem-se os conjuntos do modelo no Quadro 1.

Quadro 1 – Conjuntos do modelo

Índice	Descrição
P	Conjunto de petróleos considerados no sistema
D	Conjunto de derivados considerados no sistema

Segue-se para a definição dos parâmetros no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Parâmetros do modelo

Parâmetro	Descrição
$Rend_{p,d}$	Rendimento do derivado d no petróleo p na refinaria em questão
$PrecoDer_d$	Preço do derivado d em US\$/bbl
$PrecoPet_p$	Preço do petróleo p em US\$/bbl
$CapRef$	Capacidade de processamento de petróleo na refinaria em mil bbl/d
$Demanda_d$	Demanda do derivado d no mercado em mil bbl/d

A variável de decisão do modelo está definida no Quadro 3.

Quadro 3 – Variável de decisão

Variável	Descrição
$petProc_p$	Quantidade do petróleo p processado em mil bbl/d

A primeira equação a ser definida no problema de programação linear é a função objetivo. Para cada refinaria, valem as equações abaixo:

$$Max(z) = \sum_p \sum_d (Rend_{p,d} \times PrecoDer_d \times petProc_p) - \sum_p PrecoPet_p \times petProc_p \quad (20)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_p petProc_p \leq CapRef \quad (21)$$

$$\sum_p Rend_{p,d} \times PetProc_p \leq Demanda_d, \forall d \in D \quad (22)$$

Onde:

(20) – equação de lucro da refinaria: receita com derivados subtraída dos custos com petróleos;

(21) – inequação da restrição de capacidade de processamento de petróleo;

(22) – inequação da restrição de atendimento à demanda.

Esse equacionamento é genérico o suficiente para representar quaisquer refinarias a serem utilizadas no algoritmo, e pode ser aplicado para qualquer número de petróleos e de derivados a serem considerados no modelo.

4.1.3 Algoritmo de solução do modelo

A competição por preços entre as refinarias foi modelada através de um algoritmo que representa as empresas disputando o mercado. Como a atividade de refino, mesmo com sua representação simplificada, é uma atividade complexa, uma das etapas da execução do algoritmo envolve resolver um problema de programação linear. A solução da otimização de cada refinaria indica quais petróleos serão processados, em quais quantidades, a produção de cada derivado e o valor marginal de restrições ativas. O esquema da solução apresentada está resumido na Figura 4, e cada passo será detalhado em seguida.

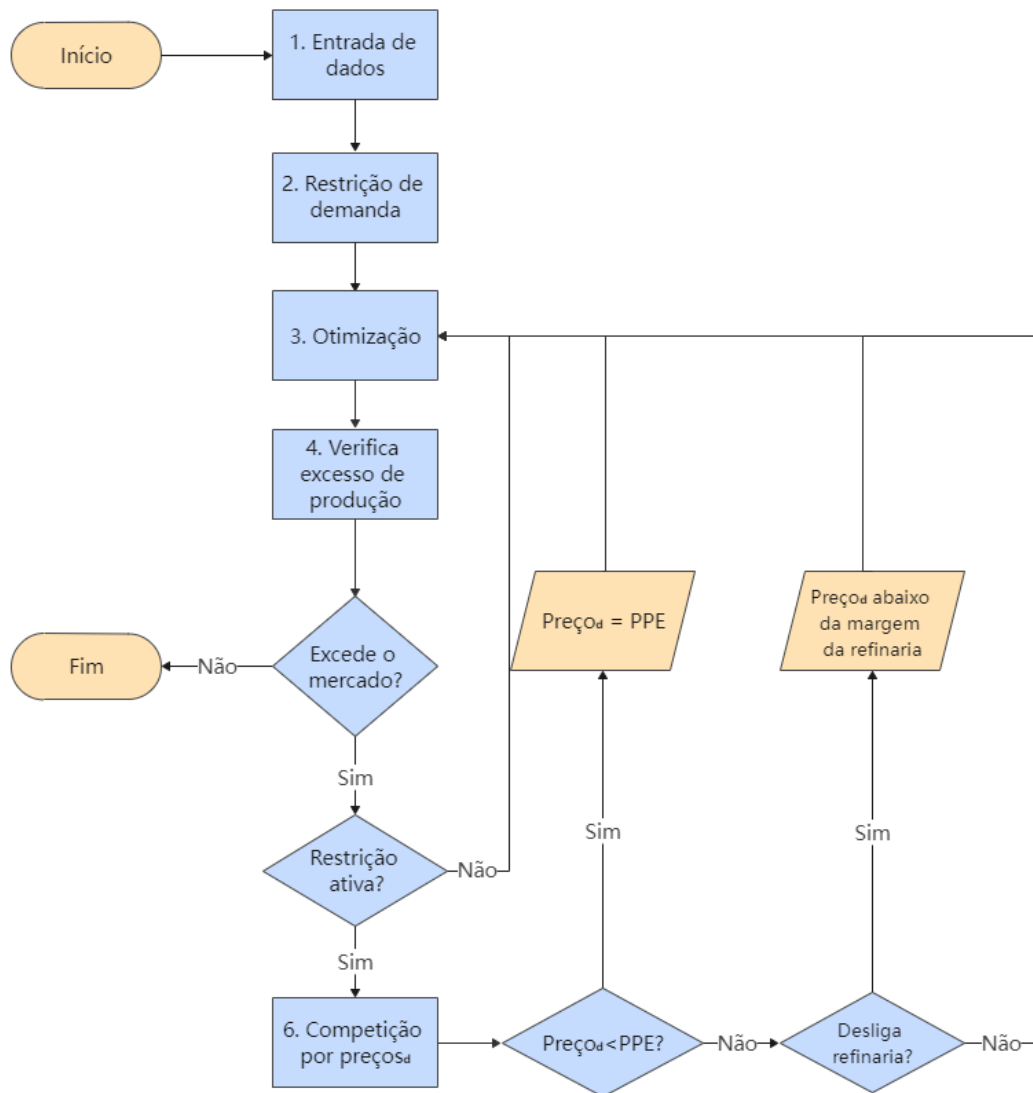


Figura 4 – Fluxograma de decisão do algoritmo de determinação do equilíbrio da competição por Bertrand

Os passos do algoritmo estão enumerados abaixo:

- 1 – **Entrada de dados** – É realizada a entrada dos seguintes dados exógenos: rendimentos, preço de petróleo, preço paridade de importação dos derivados, paridade de exportação dos derivados, capacidade das refinarias, demanda de derivados e preço inicial dos derivados;
- 2 – **Especificação da restrição de demanda** – Modelo sem restrição, e refinarias limitadas apenas na capacidade;
- 3 – **Execução da otimização** – Resolve otimização de cada refinaria;
- 4 – **Verificação de excesso de produção** – Verifica se a soma da produção das refinarias de cada derivado excede o mercado:
 - 4.1 – Se não excede – fim do problema, falta de produto é suprido por importador;

- 4.2 – Se excede – verifica se as restrições de demanda estão ativas e possuem valor marginal, do produto de maior excesso de produção;
- 5 – **Verificação de restrição ativa** – se as restrições não estão ativas – limita a produção das refinarias pela solução ótima menos um valor infinitesimal, para gerar valor marginal de restrição – retorna ao passo 3;
- 5.1 – Se as restrições estão ativas – identifica qual refinaria possui menor valor marginal na restrição daquele produto;
- 6 – **Competição por preços** – preço deste produto cai até zerar o valor marginal desta refinaria e o excesso de produção é removido todo nesta empresa (as firmas entram em guerra de preços neste produto e só param quando a margem de uma delas fica zero – ela se torna a refinaria marginal);
- 7 – **Verificação de preço abaixo de paridade de exportação** – Verifica se a queda de preço ficou abaixo da paridade de exportação:
- 7.1 – Se sim – preço atinge paridade de exportação e a demanda passa a ser infinita, finalizando a competição neste produto específico e retornando ao passo 3;
- 7.2 – Se não – avança para o passo 8
- 8 – **Verificação de desligamento de refinaria** – verifica se o excesso de produção a ser retirado é maior do que a produção da refinaria:
- 8.1 – Se sim – preço cai imediatamente abaixo da margem desta refinaria, o que vai causar o seu desligamento. Retorna ao passo 3;
- 8.2 – Se não – derivado atingiu o seu limite de preço. Competição neste derivado está finalizada. Retorna para o passo 3 para verificar outros derivados, caso todos já tenham sido verificados, a execução se encerra.

Segue-se a justificativa de cada um dos passos, à luz de uma competição por preços. O primeiro e segundo passos são apenas inicializações, sendo que o objetivo é obter a solução ótima¹ de cada refinaria sem qualquer restrição adicional além das impostas pelo seu próprio processo, como a capacidade.

O preço inicial dos derivados é igualado à paridade de importação e esse é um conceito importante, que é o fato de que, em uma competição com importadores, o preço de mercado interno não pode subir além do preço de paridade de importação, pois caso contrário, este seria totalmente dominado pelos importadores e os refinadores locais encerrariam suas atividades. Lembra-se de que, por hipótese, a informação é perfeita e não existem barreiras para as atividades de refinadores e importadores.

¹ Solução ótima aqui definida pelo valor que maximiza a função objetivo sujeita a restrições que serão formuladas na seção 3.1.3

A etapa 3 resolve o problema de otimização da refinaria que foi detalhado na seção anterior. O passo 4 faz uma verificação que seria a condição para que haja uma competição – um mercado menor que a produção dos agentes. Se a produção dos refinadores é menor do que o mercado, eles operam na capacidade máxima, e o residual é atendido pelos importadores e, portanto, o preço é a paridade de importação, assim como descrito na etapa 4.1.

O passo 4.2 apresenta uma escolha importante feita neste trabalho, que é onde se inicia a competição, dado que existe mais de um produto sendo produzido pelas firmas. Decidiu-se iniciar pelo derivado que apresenta a maior sobra de produção que, mesmo sendo um produto residual, seria objeto de uma competição mais agressiva do que aquele que tem uma sobra menor. Impende notar que uma refinaria sempre produz ambos os produtos, nobres e residuais, e uma redução forçada na produção das correntes residuais acarreta a redução das correntes nobres, impactando na rentabilidade da empresa.

No passo 5 também se apresenta um conceito importante. Em uma competição por preços, as firmas têm incentivo para baixar os preços enquanto ainda tem uma margem positiva naquele produto, pois neste modelo específico, um preço mais baixo do que o do concorrente significa obter todo o mercado para si. Para verificar esta margem do produto sendo analisado, é preciso saber o valor marginal de uma restrição ativa na produção daquele derivado. Por este motivo, caso ainda não exista uma restrição ativa naquele produto, o algoritmo gera essa restrição limitando a produção na solução ótima menos um valor infinitesimal. Este procedimento permite verificar a margem das empresas e sabe-se que o processo de diminuição de preços irá cessar assim que uma das refinarias não tiver mais margem positiva naquele produto. Por este motivo, a etapa 5.1 busca identificar o refinador com menor valor marginal nesta restrição, pois será o primeiro a sair da competição.

A etapa 6 realiza a competição descrita anteriormente e baixa o preço para zerar a margem da refinaria menos rentável naquele produto e retira deste refinador toda a sobra de produção daquele derivado. Para o otimizador não ficar indiferente entre desligar a refinaria ou não, adotou-se um valor infinitesimalmente acima do preço que zera a margem, garantindo a operação da refinaria, porém com margem próxima a zero.

Uma consideração importante que está sendo feita é que a refinaria opera quando possui receita maior que seus custos variáveis. Isso faz sentido no curto prazo, o objeto de estudo deste trabalho, mas no longo prazo isso não ocorre, a margem operacional deve ser também suficiente para pagar os custos fixos. Uma exceção a essa situação seriam refinarias pertencentes a empresas estatais que podem operar sustentadas pelo tesouro do país, mesmo com prejuízos. Essa situação ficará de fora

da nossa análise porque a lógica dessas empresas pode não ser necessariamente a maximização do lucro e, portanto, violaria uma premissa básica do modelo. Outro caso que vale ressaltar é que, no caso de prejuízo no processamento de petróleo, a refinaria pode optar por funcionar apenas como misturador ou como estoque de produtos acabados. Como o nosso foco é o refino de petróleo, mesmo nesta situação as unidades de processo vão parar de operar e, conseqüentemente, a produção de derivados a partir de petróleo cru. Apenas uma parte da infraestrutura continuará funcionando, mas essa parte não está no escopo do modelo (WOOD MACKENZIE, 2020)¹.

Em seguida são feitas duas verificações com a queda de preço que zera a margem no derivado da firma menos rentável: primeiro, se o preço ficou abaixo da paridade de exportação e segundo, se o excesso de produção a ser retirado é maior que a produção da própria empresa.

A verificação do preço abaixo da paridade de exportação, como descrito no passo 7, também contém um conceito importante deste modelo de competição. Não faz sentido que o preço de um derivado fique abaixo da paridade de exportação porque, neste nível, os refinadores locais passam a ter acesso a todo o mercado global, muito maior do que suas capacidades de produção. Ou seja, o refinador local vai preferir exportar seu derivado a baixar o preço para roubar mercado do seu competidor. Por este motivo, quando se verifica uma queda além do preço de paridade de exportação, o preço deste derivado é fixado nesta paridade e o mercado deste produto passa a ser infinito para todos os refinadores locais.

Passada a primeira verificação, a etapa 8 checa se a quantidade de derivado que está sobrando no total é maior do que a produção da refinaria de menor margem naquele produto. Se for maior, essa refinaria será desligada, como descrito no passo 8.1, pois as firmas restantes serão suficientes para atender à demanda de forma mais econômica. Em seguida, reinicia-se o algoritmo a partir do passo 3, com o preço daquele derivado em questão apenas um infinitesimal abaixo da margem da refinaria que foi desligada. Ao executar as otimizações, aquela empresa vai operar com carga zero, pois ao contrário, terá prejuízo e a competição continua com as firmas restantes.

Caso o excesso a ser removido não supere a produção da refinaria de menor margem naquele derivado, executa-se o passo 8.2 e o preço se estabiliza na margem nula daquela empresa que atende somente a demanda residual do produto em questão. Isso encerra a competição naquele derivado e o algoritmo retorna ao passo 3 para verificar os outros produtos.

¹ Segundo a Wood Mackenzie (2020), 16 refinarias estão com o fechamento considerado como “*Likely*” ou “*Considered*” em 2023

O algoritmo foi desenvolvido em linguagem Python e, para a parte de otimização, foi utilizada a biblioteca PuLP (MITCHELL *et al.*, 2009). O código encontra-se no Apêndice.

4.1.4 Casos a serem avaliados

Neste trabalho foram avaliados quatro casos distintos: um caso base e mais três variações desta base. A Tabela 4 apresenta os dados do caso base.

Tabela 4 - Dados do caso base

Variável	Dado
Refinarias	R1 e R2
Petróleos	Leve (l) e pesado (p)
Derivados	Diesel (d) e óleo combustível (oc)
Rend (R1, l, d)	60%
Rend (R1, l, oc)	40%
Rend (R1, p, d)	40%
Rend (R1, p, oc)	60%
Rend (R2, l, d)	70%
Rend (R2, l, oc)	30%
Rend (R2, p, d)	50%
Rend (R2, p, oc)	50%
CapRef (R1) (kbb/d)	120
CapRef (R2) (kbb/d)	120
PrecoPet (l) (US\$/bbl)	50
PrecoPet (p) (US\$/bbl)	30
PrecoDer (d) PPI (US\$/bbl)	60
PrecoDer (oc) PPI (US\$/bbl)	20
PrecoDer (d) PPE (US\$/bbl)	30
PrecoDer (oc) PPE (US\$/bbl)	5
Demanda (d) (kbb/d)	100
Demanda (oc) (kbb/d)	100

Um outro dado que vale a pena ser apresentado é o “valor infinitesimal” considerado na execução dos casos. Para não obter valores muito pequenos, foi

adotado o valor de 0,01, considerado satisfatoriamente pequeno frente aos outros dados do modelo, da ordem de dezenas ou centenas.

O Quadro 4 apresenta os casos que foram desenvolvidos nesta dissertação.

Quadro 4 – Casos a serem resolvidos

Caso	Descrição
Base	Caso típico de competição
1	Caso com competição por preços em ambos os produtos
2	Caso em que a competição leva ao desligamento de uma refinaria
3	Caso em que o modelo escolhe um petróleo a ser processado diferente dos anteriores

O caso 1 contém os mesmos dados da base, com a única diferença de que $PrecoDer(oc) PPE = 15 \text{ US\$/bbl}$. O motivo da escolha da alteração do PPE do óleo combustível é porque o equilíbrio da base foi atingido com o preço do óleo combustível em $10 \text{ US\$/bbl}$, como será visto adiante na seção de resultados. Elevando o PPE para $15 \text{ US\$/bbl}$, a demanda passa a ser infinita porque passa a ser possível exportar o produto a esse preço. Como ainda existe margem na refinaria menos rentável, a sobra na produção do diesel vai possibilitar uma disputa de mercado com diminuição do preço neste produto também.

O objetivo do caso 1 é forçar a competição a acontecer em ambos os derivados, já que, no caso base, como será visto adiante, ela se limitou a apenas um dos derivados. No caso, foi alterada a paridade importação do óleo combustível, o que é algo que de fato acontece com frequência no mundo real. Apenas para exemplificar com um caso extremo, com a entrada da especificação de 2020 de baixo teor de enxofre do óleo bunker, o prêmio entre o óleo combustível de baixo enxofre para o alto enxofre ficou acima de $\text{US\$ } 300/\text{t}$ em janeiro de 2020 e caiu para $\text{US\$ } 70/\text{t}$ no meio de junho do mesmo ano (INTERNATIONAL ENERGY STATISTICS AND ANALYSIS, 2020).

O caso 2 também tem os mesmos dados do caso base, porém com $CapRef(R2) = 300 \text{ kbb/d}$. O motivo da alteração da capacidade da refinaria mais rentável, no caso a R2, é para que esta capacidade de refino seja capaz de atender todo o mercado de óleo combustível e diesel, dispensando o processamento em R1. Desta forma, espera-se que o método seja capaz de indicar uma solução em que somente R2 opera, com o fechamento de R1, algo muito comum no refino mundial.

O objetivo do caso 2 é o de verificar a resposta do algoritmo a uma situação em que uma das refinarias é capaz de atender o mercado todo sozinha, por este motivo a

capacidade da refinaria mais eficiente foi mais do que dobrada. Este caso pode retratar uma situação em que a refinaria mais rentável estuda a expansão de sua capacidade, dado que isto está limitando a rentabilidade, como será visto adiante. Serão discutidos para este caso algumas implicações do resultado para o longo prazo, como o aumento do poder de mercado de uma das empresas.

O caso 3 contém os dados do caso 1 mais uma redução no preço do petróleo leve para 34 US\$/bbl. Este valor foi o suficiente para que o modelo percebesse atratividade em seu processamento e ainda está abaixo do produto mais nobre e acima do petróleo pesado e do derivado residual, como normalmente ocorre neste mercado.

O caso 3 foi adicionado para verificar qual seria uma solução em que o modelo escolhesse o petróleo leve, pois veremos adiante que nos casos anteriores o petróleo escolhido foi o pesado. Foi utilizado o caso 1 como base, aproveitando a contração do *spread* do diesel e óleo combustível e repassando para o diferencial óleo leve e pesado, o que é coerente com uma transmissão *netback*¹. Esta também é uma situação comum no mercado. Em 2019, por exemplo, a exportação de óleo leve americano associada aos cortes da OPEP em óleo pesado e às sanções ao Irã e Venezuela, fez o diferencial do óleo leve e pesado cair substancialmente. Nesse ano, o diferencial Brent-Dubai, referência como marcador da diferença de preços entre óleos leves e pesados atingiu US\$ 2,05/bbl frente a US\$ 2,93/bbl em 2018 (S&P GLOBAL, 2019).

Vale lembrar que o preço dos derivados vai se modificando durante a execução do algoritmo de competição, mas existem dois valores exógenos ao modelo que são o valor de PPI (preço de paridade de importação) e PPE (preço de paridade de exportação), que estão definidos na tabela de dados do caso base.

Os números, apesar de serem arbitrários, foram considerados suficientes e emblemáticos para representar uma competição entre refinadores de petróleo. Mais importante do que os números absolutos, que variam com o preço do petróleo, são os valores relativos entre crus e derivados que definirão a escolha da carga, dos produtos e a obtenção das margens. Aspectos da simplificação adotada no modelo foram detalhados na seção 3.1.1. Para definição dos números da tabela, foram tomados alguns cuidados. Os rendimentos ficaram entre 30% e 70%, de forma a evitar que houvesse um desbalanço muito grande entre os derivados, o que ocorreria se o rendimento de um produto fosse muito maior que outro.

¹ Entende-se precificação *netback* pela metodologia de avaliar o valor de um óleo pelo valor dos produtos que ele é capaz de gerar. Então a alteração nos preços dos produtos finais implicaria em mudança no valor das matérias-primas.

O limite superior do preço (PPI) do derivado mais nobre é maior que o dos petróleos e o do derivado residual fica abaixo da matéria prima, assim como observado no mercado real (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2022).

Foi colocada uma diferença de desempenho das duas refinarias competidoras, como acontece no mundo real, o que gera uma vantagem de um competidor sobre outro. O caso base colocou as duas refinarias com o mesmo limite de capacidade, em valores compatíveis com a demanda dos derivados.

Como os rendimentos estavam balanceados, evitando valores extremos, a demanda de mercado foi assumida como sendo igual em quantidade de matéria.

5 RESULTADOS

O algoritmo apresentado em 4.1.3 foi aplicado aos casos, cujos dados foram apresentados em 4.1.4, obtendo os resultados que serão apresentados a seguir.

5.1 Caso base

Os resultados do caso base estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado do caso base

Variável	Resultado
PrecoDer (d) (US\$/bbl)	60,00
PrecoDer (oc) (US\$/bbl)	10,01
PetProc (R1, l) (kbbbl/d)	0
PetProc (R1, p) (kbbbl/d)	66,68
PetProc (R2, l) (kbbbl/d)	0
PetProc (R2, p) (kbbbl/d)	120
Lucro (R1) (kUS\$/d)	~0
Lucro (R2) (kUS\$/d)	600

Neste caso, o derivado que possuía a maior sobra de produção, após a primeira otimização livre das refinarias, foi a corrente residual de óleo combustível, produto onde a competição se iniciou. O preço de 10 foi o que zerou a margem da refinaria 1 e, retirando o excedente de mercado de óleo combustível desta refinaria, o mercado de óleo combustível se equilibrou. Nesse caso, o mercado de diesel ficou deficitário, sendo complementado por importadores e, portanto, mantendo o preço na paridade importação.

Como a refinaria 1 foi necessária para atendimento ao mercado, utilizou-se um valor infinitesimal acima de 10, para a margem da refinaria 1 ficar levemente positiva e não indiferente a operar ou não. A Tabela 6 apresenta como ficou o atendimento dos mercados no caso base.

Tabela 6 - Atendimento dos mercados no caso base

Agente	Produto	Quantidade (kbb/d)
R1	Diesel	26,68
R2	Diesel	60,00
importador	Diesel	13,32
R1	Óleo combustível	40,00
R2	Óleo combustível	60,00
importador	Óleo combustível	0

Para que esta solução seja um ponto de equilíbrio de Nash no jogo de competição por preços, R1 e R2 não podem ter nenhum incentivo a mudar seus preços.

R1 está no limite de sua rentabilidade e, portanto, não pode reduzir seus preços porque senão passará a ter prejuízo e, conseqüentemente, estará numa posição pior do que a apontada na solução ótima. Se aumentar o preço do diesel, toda sua produção será substituída pelo importador, ou seja, precisará parar a refinaria. Se aumentar o preço do óleo combustível, ele passará a ter incentivo a aumentar sua produção além do restante do mercado atendido por R2, o que novamente irá gerar uma sobra, que passará a competir em preços novamente com R2 que irá baixar seus preços até o nível da solução encontrada.

R2 não tem incentivo para aumentar seu preço de óleo combustível porque R1 poderia colocar um preço abaixo do seu e “roubar” o mercado para si, aumentando a carga refinada de R1, o que o levaria a aferir um lucro maior. A perda de mercado de R2 não compensaria o ganho de receita com o aumento de preço, o que resultaria em um lucro menor. Aumentar o preço do diesel faria R2 perder todo o mercado para o importador. Diminuir os preços não interessa para R2, porque ele já está em sua capacidade máxima e não tem interesse em ganhar mercado, que é o único incentivo a abaixar preços.

Como o modelo está bem simplificado na representação do refino, é possível compreender o motivo de a refinaria R2 ser mais eficiente observando os dados de rendimentos de cada uma. A refinaria R1 tem 10% a menos de rendimento do derivado mais nobre em ambos os petróleos, indicando que sua capacidade de obter margens é menor do que a de seu concorrente. Isso indica que a refinaria R2 possui mais processos que convertem as correntes residuais em outras mais nobres, obtendo, assim, esta diferença nos rendimentos em relação à R1.

A refinaria R2 precisou investir mais capital para ter esse nível de rendimento em produtos mais nobres em relação à R1. O modelo deste trabalho é de curto prazo e,

portanto, não pode avaliar a viabilidade dos investimentos realizados em unidades de processo nas refinarias, sobretudo aqueles que reduzem o rendimento em produtos pesados em prol de produtos leves. Porém, o modelo gera uma previsão de resultado frente a um concorrente no curto prazo. Repetindo este estudo para condições futuras de mercado, seria possível estimar o resultado de R2 ao longo dos anos e avaliar na sequência, se o capital investido em mais rendimento do produto mais nobre remuneraria o capital investido.

5.2 Caso 1

Os resultados do caso 1 estão apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Resultado do caso 1

Variável	Resultado
PrecoDer (d) (US\$/bbl)	52,51
PrecoDer (oc) (US\$/bbl)	15,00
PetProc (R1, l) (kbbbl/d)	0
PetProc (R1, p) (kbbbl/d)	100
PetProc (R2, l) (kbbbl/d)	0
PetProc (R2, p) (kbbbl/d)	120
Lucro (R1) (kUS\$/d)	~0
Lucro (R2) (kUS\$/d)	450

O interessante da variação deste caso em relação à base é que a competição aconteceu em ambos os produtos, atingindo um preço abaixo do valor inicial que é a PPI. Assim como na base, a disputa iniciou-se pelo óleo combustível, mas antes de zerar a margem da refinaria R1, foi atingido o preço de paridade de exportação, permitindo às refinarias exportarem sua produção, não estando mais limitadas ao mercado interno. Porém, a produção de diesel ainda estava acima do mercado, iniciando uma competição neste derivado que se encerrou no preço de 52,51, que tornou a margem de R1 praticamente nula e obrigou-a a ficar com o mercado restante de R2.

A distribuição das produções aos mercados está descrita na Tabela 8.

Tabela 8 - Atendimento dos mercados no caso 1

Agente	Produto	Quantidade (kbb/d)
R1	Diesel	40
R2	Diesel	60
importador	Diesel	0
Mercado local	Diesel	100
Exportação	Diesel	0
R1	Óleo combustível	60
R2	Óleo combustível	60
importador	Óleo combustível	0
Mercado local	Óleo combustível	100
Exportação	Óleo combustível	20

Assim como no caso base, pode-se observar que os agentes não têm incentivos a mudar suas precificações, o que caracteriza a situação de equilíbrio. R1 não tem interesse em baixar o preço de óleo combustível porque não precisa obter mais mercado, já que o mercado exportação já é suficiente para acomodar sua produção e nem diminuir o preço do diesel porque teria prejuízo em sua operação. Não existe incentivo para aumentar o preço do óleo combustível porque isso faria com que perdesse o mercado de exportação e geraria novamente uma sobra entre as refinarias competidoras. Não vale a pena aumentar o preço do diesel porque isso incentivaria o aumento da produção, gerando uma sobra que vai competir com R2 e retornar à situação atual.

A refinaria R2 não tem incentivo para diminuir seu preço para ganhar mercado devido ao fato de que, no óleo combustível, o valor já está no mínimo, provendo acesso a um grande mercado que é o de exportação e, no caso do diesel, a refinaria até poderia deslocar R1, mas já está no seu limite de capacidade. O aumento de preço não interessa R2 porque no óleo combustível perderia o mercado exportação e no diesel poderia perder o mercado para R1 com um preço mais baixo.

A menor diferença entre os preços dos derivados nobre e residual não mudou a condição de R1 ser a refinaria marginal, o que é compatível com os trabalhos de Duque (2017) e Ohara (2014). Essa diferença menor, entretanto, possibilitou um aumento de processamento na refinaria R1 – isto é, a refinaria com menor capacidade de conversão.

Então, uma redução no prêmio de derivados nobres faz com que refinarias complexas remunerem menos o seu capital investido.

5.3 Caso 2

Substituindo a capacidade de R2 por 300 kbb/d no caso base, obtêm-se os resultados da Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado do caso 2

Variável	Resultado
PrecoDer (d) (US\$/bbl)	60,00
PrecoDer (oc) (US\$/bbl)	9,99
PetProc (R1, l) (kbb/d)	0
PetProc (R1, p) (kbb/d)	0
PetProc (R2, l) (kbb/d)	0
PetProc (R2, p) (kbb/d)	200
Lucro (R1) (kUS\$/d)	0
Lucro (R2) (kUS\$/d)	1000

Logo, o que impedia a refinaria R2 de ser mais agressiva na competição e eliminar R1 era sua limitação de capacidade. Com o acréscimo que foi colocado na capacidade de R2 no caso 2, ela passou a conseguir atender o mercado dos dois derivados sozinha, levando ao desligamento de R1.

Este caso levanta uma reflexão acerca de investimentos da mesma forma que no caso base. A diferença é que aqui a discussão é sobre o investimento em escala, enquanto no caso base foi a respeito da conversão. A refinaria R2 poderia aumentar sua escala, o que aumentaria seus lucros, como foi possível observar no caso 2. Resta calcular se o investimento no aumento de capacidade remunera o capital ao longo dos anos.

Uma outra possibilidade que pode ser analisada é o fato do fechamento posterior da refinaria R1 permitir que a refinaria R2 adquira poder de monopolista e possa impor preços maiores e, portanto, melhorar sua remuneração. Porém, isso precisaria ser estudado em uma configuração de jogos sequenciais, onde o fechamento de R1 é uma possibilidade e a instalação de uma nova refinaria ou um *upgrade* de R1 podem ser respostas possíveis para uma R2 monopolista.

É importante que o algoritmo de competição seja capaz de perceber o desligamento de refinarias, porque isso é algo que ocorre com frequência no mundo real. Com a construção de novas refinarias mais modernas, a sobra de capacidade de processamento de petróleo leva ao fechamento das refinarias menos eficientes. A exceção deste caso na história deste mercado são algumas refinarias da Califórnia. Isso acontece porque seus combustíveis possuem especificações mais restritas, o que inviabiliza a importação de outras regiões, associadas a dificuldades logísticas de chegada de produtos e restrições governamentais ao uso livre de navios de cabotagem nos EUA. (TEIXEIRA, 2021; ULLER, 2007). Neste trabalho, seria equivalente a não ter o competidor importador, o que seria uma mudança drástica no jogo e uma grande vantagem para os refinadores locais que poderiam auferir maiores margens.

Como a competição considerada neste trabalho é de curto prazo, os custos de saída (descomissionamento) não foram considerados. Além disso, entende-se que a refinaria R2 não é capaz de elevar o preço do óleo combustível novamente porque isso poderia causar a reativação imediata da refinaria R1. No longo prazo, com a desmobilização de R1, R2 poderia passar a exercer um poder de monopólio no seu mercado passando a elevar novamente o preço do óleo combustível.

A distribuição do atendimento do mercado está resumida na Tabela 10.

Tabela 10 - Atendimento dos mercados no caso 2

Agente	Produto	Quantidade (kbb/d)
R1	Diesel	0
R2	Diesel	100
importador	Diesel	0
R1	Óleo combustível	0
R2	Óleo combustível	100
importador	Óleo combustível	0

Da mesma forma que nos casos anteriores, as refinarias não têm incentivo para alterar seus preços, condição para o equilíbrio em competição.

R1 não pode diminuir nenhum dos seus preços pois já está com margem negativa e um aumento dos preços resultará em ter zero demanda, que está sendo integralmente atendida por seu concorrente.

Já a refinaria R2 não tem incentivo para diminuir seus preços, pois já está com todo o mercado para si e um aumento em qualquer um dos preços vai causar a reativação da refinaria R1, resultando em perda de mercado e de resultado.

5.4 Caso 3

Partindo do caso 1 e colocando o preço do petróleo leve em 34 US\$/bbl, obtemos os resultados da Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado do caso 3

Variável	Resultado
PrecoDer (d) (US\$/bbl)	43,34
PrecoDer (oc) (US\$/bbl)	20
PetProc (R1, l) (kbb/d)	26,68
PetProc (R1, p) (kbb/d)	0
PetProc (R2, l) (kbb/d)	120
PetProc (R2, p) (kbb/d)	0
Lucro (R1) (kUS\$/d)	~0
Lucro (R2) (kUS\$/d)	280

Quando o petróleo leve passa a ser o mais econômico, ocorre uma sobra significativa de diesel, devido aos rendimentos deste óleo. Com isso, ocorre uma competição acirrada pelo mercado de diesel, colocando a R1 como refinaria marginal. Como o diesel é o derivado nobre, a queda de preço significativa devido à competição derrubou o lucro das refinarias, inclusive da R2, que ficou neste caso com o menor valor dentre os casos.

O comportamento do modelo de diminuir a margem das refinarias com a queda do preço do óleo leve, que foi a modificação feita neste caso 3 em relação ao caso 1, está alinhado com o que Uller (2007) observou nas margens de refino norte-americanas.

A distribuição do atendimento dos mercados segue na Tabela 12.

Tabela 12 - Atendimento dos mercados no caso 3

Agente	Produto	Quantidade (kbb/d)
R1	Diesel	16
R2	Diesel	84
importador	Diesel	0
R1	Óleo combustível	10,68
R2	Óleo combustível	36
importador	Óleo combustível	53,32

O rendimento de 70% do óleo leve na refinaria R2 fez com que este jogador fosse capaz de captar boa parte do mercado de diesel, fazendo a R1 ficar com uma pequena parte e, conseqüentemente, um baixo processamento de petróleo.

A falta de incentivo que os competidores têm em alterar seus preços é análogo ao caso base, em que apenas um dos derivados sofreu redução de preços devido à competição, com a diferença de que desta vez o derivado foi o diesel e o petróleo escolhido foi o leve.

5.5 Discussão

A partir dos resultados obtidos é possível chegar a algumas conclusões simples, mas emblemáticas, em relação a uma estrutura oligopolística do refino do petróleo, considerando o modelo de Bertrand.

Uma primeira conclusão é de que um país ou uma região que seja deficitária em produtos que precise ser complementada com importação, sempre terá seu preço na paridade de importação, não obstante a presença de refinadores competidores no local. Essa concorrência só se traduz em redução de preços quando a produção das refinarias começa a sobrar e os refinadores locais são obrigados a abaixar seus preços para disputar a preferência de seus clientes. A precificação abaixo do PPI poderia levar a um déficit de oferta, pois não haveria como os importadores suprirem o mercado sem prejuízo. Mesmo que uma empresa estatal faça a importação, ela teria prejuízo na operação e precisaria ser compensada de alguma forma.

Uma possibilidade que está fora do escopo deste modelo, mas que acontece com frequência em muitos países, é a de interferência governamental nos preços. Algumas nações adotam até mesmo preços fixos ou diferentes formas de interferir nos preços finais ao consumidor. Se esta interferência envolve fixação dos preços de realização das refinarias, a competição aqui abordada não acontece. Se por outro lado, ela ocorre apenas no lado da tributação, sem interferência dos preços de realização das refinarias, o modelo segue aplicável. A IEA (2021) faz uma interessante análise da situação dos países ao redor do mundo de como são feitas as definições de preços de combustíveis aos consumidores finais e inclusive com sugestões de como remover estas barreiras com vistas a promover a transição energética, mas de forma justa e sem sobrecarregar as populações mais pobres¹.

¹ A IEA (2022) também lançou um documento com medidas para diminuir o consumo de derivados de petróleo, de forma a diminuir a pressão sobre os preços.

Analogamente, podemos concluir algo semelhante quando existe uma sobra de produto sendo exportada, em que o preço do produto no local será o preço de paridade exportação, mas essa conclusão não é tão simples. Observou-se, no caso base, que a refinaria R1 preferiu diminuir seu processamento a exportar seus derivados. Isso ocorreu porque sua estrutura de custos e rendimentos não permitiu que ela operasse de forma rentável na paridade exportação do óleo combustível. Porém, no caso 1 isso foi possível, com o aumento do PPE. Ou seja, nem sempre uma capacidade disponível de produção de derivados acima do mercado local vai garantir que haverá exportação. Isso vai depender dos preços de PPE e da estrutura de custos e rendimentos das refinarias.

Finalmente, a partir dos resultados do caso 2, é possível concluir que o desligamento de uma refinaria é uma situação possível desde que os concorrentes restantes sejam capazes de atender toda a demanda local e possuam margem suficiente para colocar o preço abaixo da refinaria de menor rendimento nos derivados de maior preço. No curto prazo, o objeto de estudo deste trabalho, os competidores precisam manter o preço no nível que cause o desligamento da refinaria menos rentável para garantir que esta não volte a operação. Porém, no longo prazo, com o encerramento definitivo desta refinaria os concorrentes não precisam mais manter o nível de preço que inviabilize a operação desta refinaria e, no caso 2 estudado aqui de um duopólio, pode ocorrer de a refinaria mais complexa adquirir força de monopólio podendo subir novamente seus preços até a paridade de importação que é o nível onde começa a ocorrer a concorrência dos importadores.

Mesmo o modelo sendo de curto prazo, é possível utilizar seus resultados para avaliar investimentos. Melhorias na conversão podem aumentar a margem da refinaria e colocá-la em uma posição melhor na competição, garantido lucros sustentáveis. Uma refinaria já bem-posicionada no mercado, limitada na capacidade, pode investir em aumento de escala para auferir ganhos maiores. Logicamente isso deve ser acompanhada de uma análise de longo prazo para garantir o retorno do capital, que deve considerar o prazo de maturação dos investimentos e o custo de capital da empresa em questão.

Uma análise que pode ser feita é a do efeito da tributação na importação ou exportação dos derivados na dinâmica do mercado. Um tributo de exportação teria o efeito de diminuir o preço de paridade de exportação, seria como sair do caso 1 para o caso base. Pelos resultados, haveria uma diminuição do preço interno do óleo combustível, derivado efetivamente afetado pela mudança na paridade, mas também haveria um aumento do preço do diesel, por outro lado. Como um objetivo de abaixar os preços no mercado consumidor local de óleo combustível, a política foi eficiente, mas

teve um efeito colateral de aumento de preço do derivado mais nobre no mercado local. A indústria de refino sempre terá essa característica de que os preços dos derivados estão interligados pelo fato de as refinarias obrigatoriamente produzirem um mix de produtos. Um tributo de importação teria um efeito de aumentar a paridade importação, mas não foi feito um caso com esta mudança.

A questão logística e de distância entre as refinarias são importantes nas conclusões. Isso ocorre, porque a premissa do modelo é de que as refinarias estão muito próximas, de forma que o cliente é indiferente com relação a retirar produto em uma ou outra refinaria. Refinarias que estejam isoladas, por estarem a uma grande distância entre si ou que tenha uma estrutura logística independente, demandam uma avaliação em um modelo que inclua a dimensão espacial em suas variáveis, para verificar o grau de competição que existe em cada caso específico. A tendência é que, quanto mais isoladas, mais tenderão a monopólios regionais, exercendo poder de mercado, portanto, e quanto mais próximas, mais tenderão aos resultados aqui apresentados.

A venda de refinarias com vistas a proporcionar modicidade de preços ao consumidor através da competição, pode ser verificada nestes modelos em caso de refinarias próximas. Nota-se que existem batentes para esta redução de preços, que é a paridade exportação. Assim, para refinadores operando segundo a lógica estrita microeconômica (o que é o caso de refinarias de propriedade privada), não existe incentivo para reduzir os preços além deste valor, a não ser que adotem uma estratégia de *dumping*¹. Logo, em um mercado operando de forma eficiente, o sinal de preço da paridade será relevante.

Outro fator importante é o balanço de derivados no mercado local. Um mercado que precisa importar produtos para atender seus mercados, ou seja, as refinarias não possuem capacidade de atender o mercado local de forma econômica, sempre vai convergir seus preços à paridade importação, independente de as refinarias pertencerem a um mesmo dono ou não². Porém, no caso de um mercado em que as refinarias produzem mais do que a demanda, o fato de que estas pertençam a donos diferentes pode levar a uma competição reduzindo preços de realização até o limite da paridade exportação, segundo a racionalidade econômica. Se as refinarias forem de um mesmo dono, a única competição existente é com os importadores e o preço de equilíbrio sempre será a paridade importação, mesmo em uma situação de superávit de

¹ Reduzir os preços além do economicamente ótimo para excluir os concorrentes e praticar preços de monopólio após consolidar sua posição.

² Os preços aqui mencionados se referem aos preços do refinador e não o do consumidor final, que inclui margens de distribuição e revenda, blends de biocombustíveis e tributos.

produtos na região. A não ser que a logística ou a regulação não permita a entrada de importadores, neste caso o refinador será capaz de exercer o poder de monopólio.

5.5.1 Comparação com resultados de um modelo de Cournot

Com o propósito de verificar se as considerações feitas na seção 2.4 são válidas, será feita uma comparação das premissas e resultados do modelo aqui apresentado, que seguiu o modelo de Bertrand, com um modelo de Cournot. Para esta finalidade, será utilizado o modelo de Pompermayer (2002), por ter os dados e resultados de forma clara em sua tese de doutorado e por tratar do mesmo mercado – ou estudo de caso – que o definido aqui nesta dissertação. Nesta tese, foram desenvolvidos alguns modelos, como Stackelberg e intervenções políticas nos preços, mas para esta comparação será utilizada apenas o modelo de Cournot sem intervenções. Como o modelo citado utiliza a variável espaço, será escolhido um determinado mercado para ser analisado de forma isolada para simplificar as análises, sem prejuízo de generalização. Para isto, será escolhida a sub-região “RJ/ES” por ter duas refinarias concorrentes¹, a “Ref1”, no caso, a Petrobras e a “Ref3” que representa a refinaria de Manguinhos. Desta forma, teríamos uma região com características similares aos do modelo deste trabalho, com concorrentes próximos atuando em um mesmo mercado. A sub-região “RS” também teria essa característica², porém possui um mercado menor, por este motivo foi preterido em relação ao anterior.

Como os modelos não foram configurados com os mesmos dados, a comparação não pode ser feita em um nível de detalhe muito grande, apenas em um nível mais macro. Para isto, serão calculados os preços de paridade de importação e exportação para o modelo de Cournot, que são informações relevantes para o modelo de Bertrand. A Tabela 13 resume estes valores para a sub-região selecionada.

¹ A REGAP está em outra região, nomeada como “MG”, o estado de Minas Gerais, e apesar de poder competir com a região “RJ/ES” por estar conectada por dutos, não foi considerada no estudo citado, como uma empresa competidora.

² Na tese, a região “RS” possui também duas refinarias de empresas diferentes, a REFAP do “Ref1” e a Ipiranga do “Ref2”

Tabela 13 – Preços de paridade no modelo de Cournot¹

Derivado	Preço paridade exportação (R\$/m ³)	Preço paridade importação (R\$/m ³)
Gasolina	340,33	487,67
Diesel	306,34	460,55
Óleo combustível	201,75	355,96

Fonte: Elaboração própria a partir de Pompermayer (2002)

Em seguida, pode ser feita uma comparação com os preços de equilíbrio obtidos no modelo de Bertrand. Enquanto no modelo aqui apresentado, este estará restrito às duas paridades da tabela acima, as do modelo de Cournot estão apresentadas na Tabela 14. Dentre todos os cenários estudados, foi selecionado o “R3T1” e o “R3T6”, que representam um oligopólio de três refinadores, Petrobras, Manguinhos e Ipiranga e mais uma empresa de *trading* no primeiro, e com 6 empresas de *trading* no segundo. Foi selecionado este cenário por estar mais próximo do caso estudado no modelo de Bertrand dentro dessa dissertação e por ser os extremos do modelo de Cournot, do menos para o mais competitivo.

Tabela 14 – Preços de equilíbrio no modelo de Cournot na região “RJ/ES”

Derivado	Cenário	Preço equilíbrio (R\$/m ³)	Razão preço de equilíbrio/paridade importação
Gasolina	R3T1	1512,49	3,1
Diesel	R3T1	1600,73	3,5
Óleo combustível	R3T1	538,66	1,5
Gasolina	R3T6	866,57	1,8
Diesel	R3T6	869,23	1,9
Óleo combustível	R3T6	425,81	1,2

Fonte: Elaboração própria a partir de Pompermayer (2002)

Os resultados de preço de equilíbrio dos derivados nobres no modelo de Cournot são significativamente maiores do que os obtidos no modelo de Bertrand, mais do que três vezes o limite superior do modelo de competição por preços no primeiro cenário e de quase duas vezes no outro caso. Para comparar com os dados reais da competição

¹ Preços de paridade calculados a partir dos preços dos derivados no exterior e subtraído ou somado do frete, a depender se é a paridade exportação ou importação, respectivamente.

de um refinador dominante no Brasil, a Petrobras, com empresas importadoras, foram obtidos dados disponibilizados pela própria empresa (PETROBRAS, 2022) e dados de paridade importação da ANP (2022) e resumidos no gráfico da Figura 5. O local da paridade importação escolhido foi Santos, por ter uma refinaria próxima, em Cubatão-SP, com dados de preço de venda de combustíveis pela Petrobras e, portanto, evitando uma distorção na comparação pelo fato de o local considerado na paridade estar distante do local de venda pela refinaria.

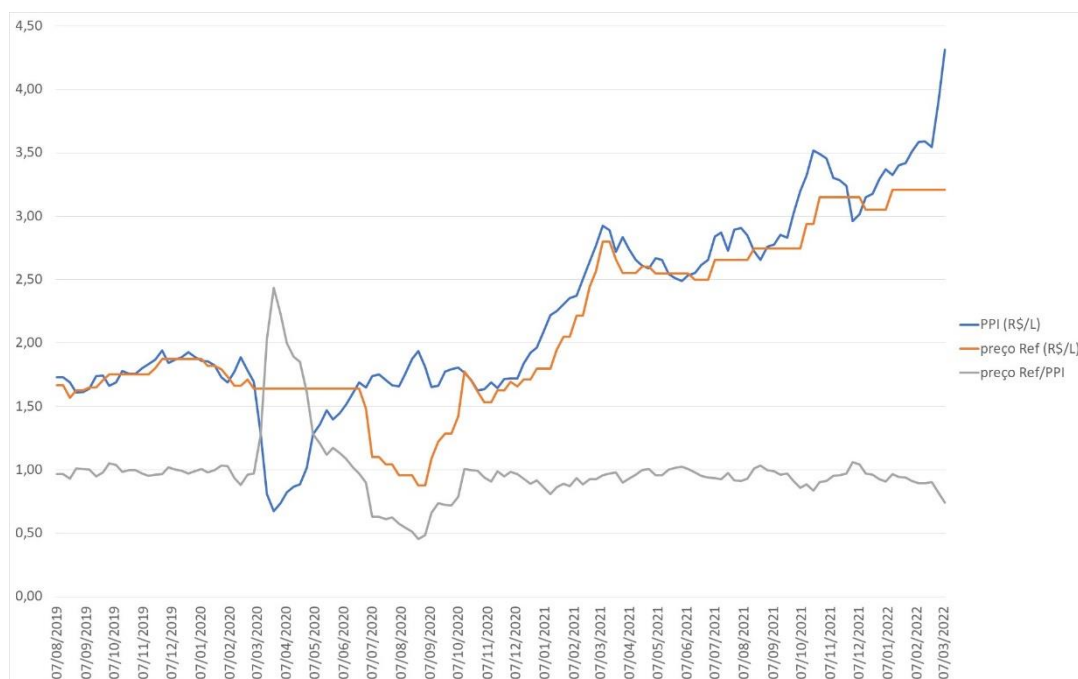


Figura 5 – Preço praticado pela Petrobras em comparação com o PPI

Fonte: elaboração própria a partir de Petrobras (2022) e ANP (2022)

Nota: PPI – preço paridade importação em Santos-SP; preço Ref – preço na refinaria de Cubatão-SP

Como pode ser observado no gráfico, a prática da competição entre um refinador praticamente monopolista com importadores faz o preço convergir para a paridade de preço de importação, como o modelo de competição de preços neste trabalho prevê e muito distante do valor de mais de três vezes obtido pelo modelo de Cournot no primeiro cenário e mesmo do valor de quase duas vezes do cenário mais competitivo. Com exceção do período do início da pandemia, em que o PPI despencou e a Petrobras manteve seus preços, e no segundo semestre que fez um movimento contrário, colocando seu preço abaixo de PPI, a razão entre o preço de refinaria e o PPI é bem estável em volta de 1, mesmo com uma variação significativa dos preços nominais de

R\$ 1,50/L até R\$ 3,50/L. Assim, essa comparação e os dados reais corroboram o uso do modelo de Bertand.

6. CONCLUSÃO

O objetivo desta dissertação de desenvolver um modelo de competição em refino de petróleo no curto prazo, baseado na abordagem de Bertrand, foi atingido, incluindo a aplicação e análise de alguns casos considerados emblemáticos para a competição no mercado de refino de petróleo. Apesar das limitações do modelo, que foram devidamente identificadas, foi possível analisar situações do mundo real segundo o modelo escolhido, de competição por preços. Esse modelo busca os preços de equilíbrio em uma competição no mercado de refino de curto prazo, fornecendo também as quantidades de crus processados, derivados produzidos, importados e exportados.

Pela última seção do capítulo anterior, foi possível notar que os preços de equilíbrio do modelo de competição por preços estão mais aderentes à realidade do que o do modelo de competição por quantidades, que se baseia na abordagem de Cournot. Como estudo futuro, seria possível aprofundar essa comparação fazendo um modelo com os mesmos dados, porém um com a competição por quantidade e outro por preços. Outra possibilidade seria comparar se ambos os métodos são capazes de prever o fechamento de refinarias menos rentáveis, algo que ocorre no mundo real, sobretudo no caso dos Estados Unidos de refinarias de menor complexidade e escala, sem vantagens de nicho de mercado. Seria possível também analisar se o resultado do modelo de Cournot de que o número de *traders* altera significativamente o preço de equilíbrio encontra respaldo em dados reais, ou se seria indiferente como o modelo de competição por preços resulta. Finalmente, é possível sugerir uma comparação dos resultados operacionais de ambos os modelos, como carga processada, mercados atendidos, entre outros.

O modelo proposto, usando um algoritmo iterativo associado à execução de um problema de programação linear como um de seus passos, se mostrou razoável dentro do escopo do trabalho, mesmo com todas as simplificações. Algumas simplificações, como a ausência da variável espaço, impede a comparação com sistemas reais em que a distância é uma variável significativa. A falta da variável tempo impede a análise de sistemas que utilizam estoque como estratégia de amortecer as variações de mercado sem repassá-las imediatamente aos preços, além de permitir a precificação abaixo do PPI, permitindo ganho de mercado. Porém, o objetivo de se obter uma primeira visão de como um modelo de competição por preços se comporta em um mercado complexo como o refino foi alcançado.

Vale destacar que a competição entre as empresas de refino pode não levar à uma redução de preços ex-refinaria, em comparação a uma estrutura de um refinador monopolista competindo com importadores, se o mercado for deficitário em derivado.

Porém, caso a produção supere a demanda na região, pode haver queda de preços ex-refinaria devido à concorrência, até o limite da paridade exportação, a partir da qual as empresas não possuem incentivo a baixar seus preços, pois passam a ter a possibilidade de vender sua produção no mercado externo¹.

Uma outra conclusão relevante é que a estrutura de custos e rendimentos de cada refinaria é relevante no resultado final. Apesar da afirmação anterior de que uma capacidade de produção acima do mercado pode levar à diminuição de preços via competição, as empresas, em tese, estão sempre procurando operar de forma rentável. No caso base, por exemplo, a refinaria R1 encerra sua competição quando seu lucro se anula, o que ocorreu antes do atingimento do preço de paridade exportação. Ou seja, mesmo tendo capacidade de produzir óleo combustível acima do mercado, associado à refinaria R2, o preço de paridade exportação implicaria em prejuízo para R1 que preferiu não atingir esse nível. Porém, no caso 1, com a subida do PPE do óleo combustível, esse patamar foi atingido e a refinaria pôde explorar sua capacidade de produção desse derivado.

Pode-se destacar também a possibilidade que o modelo encontrou de que uma refinaria possa ser desligada devido à competição. Essa é uma possibilidade que se verifica em mercados competitivos de refino, em que refinarias menos rentáveis, normalmente mais antigas, menos complexas e menores e sem vantagem de posição, são obrigadas a terminar suas operações frente aos concorrentes com estruturas mais complexas e mais rentáveis de refino.

É importante fazer a ressalva de que o estudo seguiu a ótica microeconômica de maximização do lucro e que fugiu ao seu escopo avaliar questões macroeconômicas associadas à precificação de derivados, como impactos sobre preços relativos na economia, efeitos inflacionários, efeitos cambiais, entre outros.

Entre os estudos futuros que poderão ser realizados a partir deste trabalho, destacam-se aqueles que flexibilizam algumas simplificações do modelo proposto. A principal delas é a inclusão da variável de distância entre as refinarias e seus mercados, o que poderia dar uma dimensão mais real de sistemas que possuem distâncias significativas, como as observadas entre os blocos regionais brasileiros. Quanto maior a distância entre os competidores e os mercados a serem atendidos, maior será a diferença nos resultados entre esse novo modelo e o que foi apresentado nesta dissertação.

Outra possibilidade é a utilização de dados reais, em um determinado momento no tempo, para que se possa tirar conclusões de como um determinado sistema não

¹ Ressaltando que os preços aqui mencionados se referem ao preço do refinador e não ao do consumidor final

competitivo operaria se estivesse em uma estrutura competitiva, podendo comparar os resultados do modelo com o que de fato ocorreu no sistema levantado.

Um estudo futuro relevante seria a associação deste modelo de curto prazo a modelos de longo prazo. Toda decisão que envolve investimentos precisa ser avaliada em um modelo de longo prazo, pois usualmente o tempo de maturação dos investimentos em unidades de refino é da ordem de dezenas de anos. Portanto, como foi constatado nas simulações realizadas nesta dissertação, investimentos em aumento de complexidade da refinaria melhoram a posição na estrutura de competição, o que pode ser avaliado neste modelo de curto prazo. Porém, esses resultados precisam de alguma forma ser repassados a um modelo de longo prazo para verificar se a remuneração do capital é suficiente.

Uma outra associação a modelo de longo prazo que foi levantada nesta dissertação foi o aumento de capacidade (de destilação) da refinaria mais complexa, a R2. Por ter uma vantagem competitiva, verificou-se que o aumento de sua capacidade de produção foi capaz de desligar a refinaria R1. Além da avaliação da maturação do investimento de R2 no longo prazo, poderia ser avaliado o seu novo posicionamento no mercado como um refinador monopolista, com a saída definitiva da empresa R1. Passando a competir apenas com importadores, a refinaria R2 poderia praticar preços de paridade de importação indefinidamente, após o encerramento definitivo das operações de R1. Precisaria ser avaliado, neste caso, se essa prática de preços poderia atrair investimentos em novas refinarias ou no upgrade de R1, visando o aproveitamento desta maior margem de R2. Se R2 de fato se tornar monopolista no mercado, sem entrada de novos competidores, haveria possivelmente transferência de excedente do consumidor para a nova empresa monopolista.

Outro trabalho futuro que poderia ser feito se refere à flexibilização da premissa de que a demanda é perfeitamente inelástica no curto prazo. Essa premissa é mais fraca principalmente no produto de menor valor, o óleo combustível, e poderia ser um ponto de partida para esse tipo de análise.

7. BIBLIOGRAFIA

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013. Regulamenta as especificações do óleo diesel de uso rodoviário, contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2013, e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 Dezembro 2013. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=263587>>. Acesso em: 27 Novembro 2021.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico 2021. **PORTAL BRASILEIRO DE DADOS ABERTOS**, 2021. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dataset/anuario-estatistico-2021>>. Acesso em: 12 Maio 2022.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Preços de paridade de importação. **Site da ANP**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-paridade-de-importacao>>. Acesso em: 22 Março 2022.

ARAUJO, T. . L. . K. et al. Brazilian Amazônia, deforestation and environmental degradation: Analyzing the process using game, deterrence and rational choice theories. **Environmental Science & Policy**, 117, 2021. 46-51.

BAROUGH, A. S.; SHOUBI, M. V.; SKARDI, M. J. E. Application of Game Theory Approach in Solving the Construction Project Conflicts. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 58, 2012. 1586-1593.

BARROS, M. M. D. **Análise da flexibilidade do refino de petróleo para lidar com choques de demanda de gasolina no Brasil**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

BLUME, A. Bertrand without fudge. **Economics Letters**, 78, n. 2, Fevereiro 2003. 167-168.

BOONE, J. et al. Bertrand competition with asymmetric costs: Experimental evidence. **Economics Letters**, 117, n. 1, Outubro 2012. 134-137.

BRONS, M. et al. A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand. A SUR approach. **Energy Economics**, v. 30, n. 5, Setembro 2008. 2105-2122.

CHEN, G. et al. Electricity Market Nash-Cournot Equilibrium Analysis with High Proportion of Gas-Fired Generators. **Energy Procedia**, Pequim, 105, 2017. 3282-3288.

CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA. Perguntas gerais sobre defesa da concorrência. **Site do Conselho Administrativo de Defesa**

Econômica, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/cade/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/perguntas-gerais-sobre-defesa-da-concorrencia>>. Acesso em: 20 Fevereiro 2022.

COURNOT, A. A. **Researches into the mathematical principles of the theory of wealth**. Tradução de N. T. Bacon e I. Fisher. Nova Iorque: The Macmillan Company, 1838.

DE NIJS, R. Further results on the Bertrand game with different marginal costs. **Economics Letters**, 116, n. 3, Setembro 2012. 502-62.

DUQUE, M. A. **O futuro da indústria do refino europeu à luz do conflito entre soberania energética e política climática**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2017.

EITCHES, E.; CRAIN, V. Using gasoline data to explain inelasticity. **Beyond the Numbers: Prices & Spending**, v. 5, n. 5, Março 2016. Disponível em: <<https://www.bls.gov/opub/btn/volume-5/using-gasoline-data-to-explain-inelasticity.htm>>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods**. Bruxelas. 2017. BS EN 590:2013+A1:2017.

FIANI, R. **Teoria dos Jogos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

HALLACK, L. N.; KAUFMANN, R.; SZKLO, A. S. Price discovery in Brazil: causal relations among prices for crude oil, ethanol, and gasoline. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, 2020. 230-251.

HUPPMANN, D. Endogenous shifts in OPEC market power: A Stackelberg oligopoly with fringe. **DIW Discussion Papers**, Berlim, n. 1313, 2013.

HUPPMANN, D.; HOLZ, F. **Global Oil Markets Revisited – Cartel or Stackelberg Market?** International Energy Workshop 2010. Estocolmo: [s.n.]. 2010.

IEA. A 10-Point Plan to Cut Oil Use, Paris, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-cut-oil-use>>. Acesso em: 27 Março 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. From well to tank: How governments can use gasoline prices to accelerate a green and just transition. **IEA**, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/from-well-to-tank-how-governments-can-use-gasoline-prices-to-accelerate-a-green-and-just-transition>>. Acesso em: 11 Março 2022.

INTERNATIONAL ENERGY STATISTICS AND ANALYSIS. Marine fuels: Price impact of new 2020 low sulfur regulations negated by refineries and Covid-19. **Oil and Energy Trends**, Singapura, Agosto 2020. 3-5.

KARP, L. S.; PERLOFF, J. M. Dynamic Models of Oligopoly in Agricultural Export Markets. In: COTTERIL, R. W. **Competitive Strategy Analysis In The Food System**. [S.l.]: [s.n.], 1993. Cap. 6, p. 113-134.

KAVIARI, F. et al. Simulation of urban growth using agent-based modeling and game theory with different temporal resolutions. **Cities**, 95, 2019.

KREPS, D. M.; SCHEINKMAN, J. A. Quantity Precommitment and Bertrand Competition Yield Cournot Outcomes. **The Bell Journal of Economics**, 14, n. 2, 1983. 326–337.

LUNDIN, E.; TANGERAS, T. P. Cournot competition in wholesale electricity markets: The Nordic power exchange, Nord Pool. **International Journal of Industrial Organization**, 68, Janeiro 2020.

MENDES, A. P. A. et al. **Mercado de Refino de Petróleo no Brasil**. BNDES. Rio de Janeiro. 2018.

MITCHELL, S. et al. Optimization with PuLP, 2009. Disponível em: <<https://coin-or.github.io/pulp/>>. Acesso em: 24 Março 2022.

MONTEIRO, R. G. **Um Estudo de Caso sobre a entrada da PETROBRAS no Retail Norte Americano**. Dissertação (Mestrado Executivo em Gestão Empresarial) - Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro. 2008.

ODDONE, H. **Refinação de Petróleo no Brasil**. Boletim Técnico PETROBRAS. Rio de Janeiro. 1965.

OECD. **Glossary of Industrial Organisation Economics and Competition Law**. [S.l.]: [s.n.], 1993.

OHARA, A. P. **Possíveis destinos para o excedente de petróleo brasileiro: um estudo sobre o mercado chinês**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

OSBORNE, M. . J.; PITCHIK, C. Price Competition in a Capacity-Constrained Duopoly. **Journal of Economic Theory**, 38, n. 2, Abril 1986. 238-260.

PARK, H. An Analysis on the Competitiveness of the Oil Refinery Market in South Korea. **Journal of Asian Finance, Economics and Business**, 7, n. 6, 2020. 145-155.

PERISSÉ, J. B. **Evolução do refino de petróleo no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

PETROBRAS. Novos caminhos, 2020. Disponível em: <https://novoscaminhos.petrobras.com.br/qual-e-o-futuro-da-petrobras-ela-continuara-crescendo.html?gclid=Cj0KCQiA_8OPBhDtARIsAKQu0gbD-BiTPv6k8ypt0qffbFZJ6Q-rKtBNyXSVh78hwkaIRmOLHSp_YaAotBEALw_wcB>. Acesso em: 26 Junho 2022.

PETROBRAS. Preços de Venda de Combustíveis. **Site da Petrobras**, 2022. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/precos-de-venda-de-combustiveis/>>. Acesso em: 22 Março 2022.

POMPERMAYER, F. M. **Modelos de equilíbrio espacial de preços para o mercado oligopolizado de derivados de petróleo brasileiro**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

ROMAN, F.; HARTMANN, S. Models in Science. In: ZALTA, E. N. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Spring. ed. [S.l.]: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/models-science/>>.

S&P GLOBAL. S&P Global Commodity Insights. **APPEC: Narrow light-heavy crude spread puts pressure on Asian refiners to diversify feedstock**, 2019. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/market-insights/latest-news/oil/091019-appec-narrow-light-heavy-crude-spread-puts-pressure-on-asian-refiners-to-diversify-feedstock>>. Acesso em: 11 Março 2020.

SOTO-REYES, L.; GUTIERREZ-ALCARAZ, G. **Energy Market Model Competition: A Discrete Event System Simulation Equivalent**. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 1-7.

STACKELBERG, H. V. **Market Structure and Equilibrium**. Tradução de Damien Bazin; Lynn Urch e Rowland Hill. 1. ed. Bonn: Springer, 2011.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. P. **Fundamentos do Refino do Petróleo. Tecnologia e Economia**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

TEIXEIRA, R. C. **Perspectivas para expansão do uso de minirrefinarias modulares de petróleo no Brasil**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2021.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Gasoline prices tend to have little effect on demand for car travel. **Today in energy**, Washington, DC, 15 Dezembro 2014. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=19191>>. Acesso em: 23 Novembro 2021.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. PETROLEUM & OTHER LIQUIDS. **Site da EIA**, 2022. Disponível em: <<https://www.eia.gov/petroleum/data.php#prices>>. Acesso em: 27 Março 2022.

ULLER, V. C. **Oportunidades e desafios da colocação de óleos brasileiros no mercado internacional: o refino e o mercado norte-americano de combustíveis**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Motor Fuels: Understanding the factors that influence the retail price of gasoline.** Washington, D.C., p. 51. 2005.

VARIAN, H. R. **Microeconomia:** conceitos básicos. Tradução de M. J. C. Monteiro e R. Doninelli. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

VASS, A.; POLNER, B. Paranoia and game theory: Altered interpersonal functioning through the lens of interactive games. **Schizophrenia Research**, 241, 2022. 116-118.

WILLEMS, B. Modeling Cournot Competition in an Electricity Market with Transmission Constraints. **The Energy Journal**, 23, n. 3, 2002. 95-125.

WOOD MACKENZIE. **European refining at the Rubicon again – which assets will make it over?** Wood Mackenzie. [S.l.], p. 14. 2020.

YANG, Z. Is the Leading Role Desirable?: A Simulation Analysis of the Stackelberg Behavior in World Petroleum Market. **Computational Economics**, n. 42, 2013. 133-150.

APÊNDICE – Código fonte do programa

```
# Import PuLP modeler functions
from pulp import *
import pandas
import operator

BigM=1000000

# Creates a list of all the refineries
refinaria = ['r1', 'r2']

# Counts the number of refineries in competition
NumRef=0
for x in refinaria:
    NumRef += 1

# Creates a dictionary for the capacity of refineries
RefCap = {"r1": 120,
          "r2": 120}

# Creates a list of all oils
pet = ["leve", "pesado"]

# Creates a dictionary for the price of oil
PrecoPet = {"leve":34,
            "pesado":30,}

# Creates a list of all products
der = ["diesel", "OC"]

# Counts the number of products
NumDer=0
for x in refinaria:
    NumDer += 1

# Creates a dictionary for the price of products - initial in import parity
PrecoDer = {"diesel":60,
            "OC":20,}

# Creates a dictionary for the price of products export parity
PrecoDerExp = {"diesel":30,
               "OC":5,}

# Creates a list of yield of oil in products
rend = [#diesel OC
        [[.6,.4],#r1 leve
         [.4,.6]],#r1 pesado
        [[.7,.3], #r2 leve
         [.5,.5]] #r2 pesado
        ]

# Creates a list of product demand
demand = [ #product
```

```

#diesel OC
[200,200],#r1
[200,200] #r2
]

# The demand data is made into a dictionary
demand = makeDict([refinaria,der],demand,0)

# Creates a list of product demand total
demandTot = [ #product
#diesel OC
100,100]

# The demand data is made into a dictionary
demandTot = makeDict([der],demandTot,0)

# The yield data is made into a dictionary
rend = makeDict([refinaria,pet,der],rend,0)

# variable to store sensitivity data of opt
sens={}

# variable to store excess of production
ExcProd={}
for d in der:
    ExcProd[d]=0

# variable to store refinery production
RefProd={}
for r in refinaria:
    RefProd[r]={}
    for d in der:
        RefProd[r][d]=0

# variable to store excess of production total
ExcProdTot=sum(ExcProd.values())

#Variable to store sum of marginal values
TotValMarg=0

#variable to store the refinery with less margin
RefLessMarg="r1"

# variable to store status of price limits reached
LimPreco=[1 for d in der]

# The price limit variable is made into a dictionary
LimPreco = makeDict([der],LimPreco,0)

# variable to finish the competition loop
fim=sum(LimPreco.values())

# variable to store the optimization results
PetProcRes=[[0 for r in refinaria] for p in pet]

```



```

# The optimization results data is made into a dictionary
PetProcRes = makeDict([refinaria,pet],PetProcRes,0)

while fim!= 0:
    #verify if there is competition
    if NumRef<2:
        fim=0
        continue
    for r in refinaria:
        print(PrecoDer)
        # Creates the 'prob' variable to contain the problem data
        prob = LpProblem("Refinery Optmization",LpMaximize)

        # Creates a list of tuples containing all the possible allocation of oil
        PetProc = [(r,p) for r in refinaria for p in pet]

        # A dictionary called 'Vars' is created to contain the referenced variables(the oils)
        vars = LpVariable.dicts("PetProc", (refinaria,pet),0,None,LpContinuous)

        # The objective function is added to 'prob' first
        prob += lpSum([vars[r][p]*(rend[r][p][d]*PrecoDer[d]-PrecoPet[p]/len(der)) for p in
        pet for d in der]), "refinery_profit_%s"%r

        # refinery capacity constraints
        prob += lpSum([vars[r][p] for p in pet])<=RefCap[r], "Refinery_capacity_%s"%r

        # The demand minimum constraints are added to prob for each demand node (bar)
        for d in der:
            prob += lpSum([vars[r][p]*rend[r][p][d] for p in pet])<=demand[r][d],
            "Demand_limit_%s"%d

        # The problem data is written to an .lp file
        prob.writeLP("RefineryOptimization.lp")

        # The problem is solved using PuLP's choice of Solver
        prob.solve()

        # The status of the solution is printed to the screen
        print("Status:", LpStatus[prob.status])

        # Each of the variables is printed with it's resolved optimum value
        for v in prob.variables():
            print( v.name, "=", v.varValue)
            pos=v.name.index(r)+len(r)+1
            PetProcRes[r][v.name[pos:]]=v.varValue
        # The optimized objective function value is printed to the screen
        print ("Refinery_profit = ", value(prob.objective))
        sr=[{'Constraint Names':cname,'Slack Values':cinfo.slack,'Shadow Prices':cinfo.pi}
        for cname, cinfo in prob.constraints.items()]
        sens[r]={}
        for y in range(NumDer+1):
            if y==0:
                sens[r]['cap']=sr[0]
            else:
                sens[r][der[y-1]]=sr[y]

```

```

print(pandas.DataFrame(sens))

#loop to verify production excess
for x in refinaria:
    for d in der:
        RefProd[x][d]=0
for d in der:
    ExcProd[d]=-demandTot[d]
    for p in pet:
        for x in refinaria:
            RefProd[x][d]+=PetProcRes[x][p]*rend[x][p][d]
            ExcProd[d]+=PetProcRes[x][p]*rend[x][p][d]

ExcProdTot=sum(ExcProd.values())

#check the total marginal value of product with most surplus
TotValMarg=0
for x in refinaria:
    TotValMarg+=sens[x][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]["Shadow Prices"]

#verify refinery shutdown
for x in refinaria:
    if sum(RefProd[x].values())==0:
        for y in der:
            sens[x][y]["Shadow Prices"]=BigM
        NumRef-=1

#check if demand excess has marginal value
if ExcProd[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]>0.01:
    if TotValMarg==0:
        #generate MV
        for x in refinaria:
            demand[x][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=RefProd[x][max(ExcProd,
key=ExcProd.get)]-0.01
            if RefProd[x][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]==0:
                demand[x][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=0
            continue
        else:
            for x in refinaria:
                #verify if refinery has the smallest MV, if it has, the variable "refinery" with the
smallest MV receive it
                if sens[x][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]["Shadow
Prices"]<sens[RefLessMarg][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]["Shadow Prices"]:
                    RefLessMarg=x
            else:
                fim=0
                continue

#purge demand excess in refinery with less margin
if ExcProd[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]>0.01:
    #update demand purging excess and price to zero margin of refinery
    demand[RefLessMarg][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=-ExcProd[max(ExcProd,
key=ExcProd.get)]
    PrecoDer[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=-sens[RefLessMarg][max(ExcProd,
key=ExcProd.get)]["Shadow Prices"]-0.01

```

```

    #if less than export price, than export and infinite demand
    if PrecoDer[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]<=PrecoDerExp[max(ExcProd,
key=ExcProd.get)]:
        PrecoDer[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=PrecoDerExp[max(ExcProd,
key=ExcProd.get)]
        demand[RefLessMarg][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=BigM
        demandTot[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=BigM
        LimPreco[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=0
        continue
    #if refinery production is less than excess, price goes to lower its VM and shutdown
    if demand[RefLessMarg][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]<=0:
        PrecoDer[max(ExcProd, key=ExcProd.get)]+=-0.02
        demand[RefLessMarg][max(ExcProd, key=ExcProd.get)]=0
        continue

print (demand)
print (ExcProd)
fim=sum(LimPreco.values())
if ExcProdTot!=0:
    for x in refinaria:
        for y in der:
            demand[x][y]=demandTot[y]
for r in refinaria:
    print(PrecoDer)
    # Creates the 'prob' variable to contain the problem data
    prob = LpProblem("Refinery Optmization",LpMaximize)

    # Creates a list of tuples containing all the possible allocation of oil
    PetProc = [(r,p) for r in refinaria for p in pet]

    # A dictionary called 'Vars' is created to contain the referenced variables (the routes)
    vars = LpVariable.dicts("PetProc", (refinaria,pet),0,None,LpContinuous)

    # The objective function is added to 'prob' first
    prob += lpSum([vars[r][p]*(rend[r][p][d]*PrecoDer[d]-PrecoPet[p]/len(der)) for p in
pet for d in der]), "refinery_profit_%s"%r

    # refinery capacity constraints
    prob += lpSum([vars[r][p] for p in pet])<=RefCap[r], "Refinery_capacity_%s"%r

    # The demand minimum constraints are added to prob for each demand node (bar)
    for d in der:
        prob += lpSum([vars[r][p]*rend[r][p][d] for p in pet])<=demand[r][d],
"Demand_limit_%s"%d

    # The problem data is written to an .lp file
    prob.writeLP("RefineryOptimization.lp")

    # The problem is solved using PuLP's choice of Solver
    prob.solve()

    # The status of the solution is printed to the screen
    print("Status:", LpStatus[prob.status])

    # Each of the variables is printed with it's resolved optimum value

```

```

for v in prob.variables():
    print( v.name, "=", v.varValue)
    pos=v.name.index(r)+len(r)+1
    PetProcRes[r][v.name[pos:]]=v.varValue
# The optimised objective function value is printed to the screen
print ("Refinery_profit = ", value(prob.objective))
sr=[{'Constraint Names':cname,'Slack Values':cinfo.slack,'Shadow Prices':cinfo.pi}]
for cname, cinfo in prob.constraints.items()]
    sens[r]={}
    for y in range(NumDer+1):
        if y==0:
            sens[r]['cap']=sr[0]
        else:
            sens[r][der[y-1]]=sr[y]
print(pandas.DataFrame(sens))

```