

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO**

**Gustavo Ferraresi Bassi**

**Equilíbrio da expansão de capacidade sob incerteza: um estudo de caso  
na indústria petroquímica brasileira**

**Porto Alegre**

**Março/2017**

**Gustavo Ferraresi Bassi**

**Equilíbrio da expansão de capacidade sob incerteza: um estudo de caso na indústria petroquímica brasileira**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Administração da Escola de Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Administração

Programa de Pós-Graduação em Administração

**Orientador: Prof. Tiago Pascoal Filomena, Ph.D.**

**Porto Alegre**

**Março/2017**

### CIP - Catalogação na Publicação

Bassi, Gustavo Ferraresi  
Equilíbrio da expansão de capacidade sob  
incerteza: um estudo de caso na indústria  
petroquímica brasileira / Gustavo Ferraresi Bassi. --  
2017.  
60 f.

Orientador: Tiago Pascoal Filomena.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Administração, Programa  
de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, BR-RS,  
2017.

1. Teoria dos Jogos. 2. Indústria Petroquímica. 3.  
Problema de Complementaridade Mista. I. Filomena,  
Tiago Pascoal, orient. II. Título.

**Gustavo Ferraresi Bassi**

**Equilíbrio da expansão de capacidade sob incerteza: um estudo de caso  
na indústria petroquímica brasileira**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Curso de Mestrado Acadêmico em  
Administração da Escola de  
Administração da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de março de 2017

---

**Tiago Pascoal Filomena, Ph.D.**

**UFRGS**

Orientador

---

**Prof. Denis Borenstein, Ph.D.**

**UFRGS**

Convidado 1

---

**Prof. Marcelo Savino Portugal, Ph.D.**

**UFRGS**

Convidado 2

---

**Prof. Marcelo de Carvalho Griebeler, Dr.**

**UFRGS**

Convidado 3

## **RESUMO**

A Teoria dos Jogos é amplamente utilizada no estudo de fenômenos de interação estratégica, em especial na análise de mercados de commodities. Esse trabalho faz uma análise preliminar do mercado brasileiro de eteno e propeno sob a ótica de um modelo baseado na Teoria dos Jogos, representado matematicamente através de um problema de complementaridade mista. Neste modelo, as empresas atuam em uma competição de Cournot e os custos de produção são parâmetros incertos, representados através de cenários, sendo que, no equilíbrio, três decisões devem ser tomadas: i) o portfólio de tecnologias para produção, ii) a capacidade de produção de cada tecnologia e iii) o nível de produção de cada tecnologia em cada cenário. Considerando as diversas limitações do estudo, as simulações realizadas com o modelo proposto mostram que o comportamento dos agentes da indústria petroquímica brasileira está mais próximo de tomadores de preços, sem possibilidade de regulação de preços através das quantidades produzidas.

Palavras chave: Teoria dos Jogos. Indústria Petroquímica. Problema de Complementaridade Mista.

## **ABSTRACT**

Game Theory is widely used in the study of strategic interaction, especially in the analysis of commodity markets. This work makes a preliminary analysis of the Brazilian ethylene and propylene market from the perspective of a model based on game theory, represented mathematically by a mixed complementarity problem. In this model, firms behave as Cournot players and production costs are uncertain parameters, represented by scenarios, and in equilibrium three decisions must be made: i) the portfolio of technologies for production, ii) technologies capacity and iii) the level of production for each technology in each scenario. Considering the limitations of the study, the simulations carried out with the proposed model show that the behavior of the Brazilian petrochemical industry agents is closer to price takers, without possibility of price regulation by the quantities produced.

**Keywords:** Game Theory. Petrochemical Industry. Mixed Complementarity Problem.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Subgrupos importantes dos problemas de equilíbrio.....	17
<b>Figura 2:</b> Cadeia petroquímica .....	25
<b>Figura 3:</b> Produção atual de eteno e propeno .....	27
<b>Figura 4:</b> Equilíbrio de mercado.....	31
<b>Figura 5:</b> Custos de produção.....	37
<b>Figura 6:</b> Frequência dos custos de produção .....	38
<b>Figura 7:</b> Produção de eteno para o caso de mercado monopolista .....	41
<b>Figura 8:</b> Produção de eteno de P1 em um duopólio.....	43
<b>Figura 9:</b> Produção de eteno de P2 em um duopólio.....	44
<b>Figura 10:</b> Produção de propeno para o caso de mercado monopolista.....	46
<b>Figura 11:</b> Produção de propeno de P1 em um duopólio .....	48
<b>Figura 12:</b> Produção de propeno de P2 em um duopólio .....	48

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Custos de produção em US\$/ton de cada tecnologia em cada cenário.....	39
<b>Tabela 2:</b> Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o eteno em um monopólio.....	40
<b>Tabela 3:</b> Valores calculados de $y_s^t$ e $x^t$ , em ton, para o eteno em um mercado monopolista .....	41
<b>Tabela 4:</b> Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o eteno em um duopólio.....	43
<b>Tabela 5:</b> Valores calculados de $y_{i,s}^t$ e $x_i^t$ , em ton, para o eteno em um duopólio .....	44
<b>Tabela 6:</b> Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o propeno em um monopólio.....	45
<b>Tabela 7:</b> Valores calculados de $y_s^t$ e $x^t$ , em ton, para o propeno em um mercado monopolista .....	46
<b>Tabela 8:</b> Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o propeno em um duopólio.....	47
<b>Tabela 9:</b> Valores calculados de $y_{i,s}^t$ e $x_i^t$ , em ton, para o propeno em um duopólio....	49



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (Despesas de Capital)
COMPERJ	Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
COPENE	Companhia Petroquímica do Nordeste
COPEL	Companhia Petroquímica do Sul
EPEC	<i>Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints</i> (Problema de Equilíbrio com Restrições de Equilíbrio)
KKT	<i>Karush–Kuhn–Tucker</i>
LCP	<i>Linear Complementarity Problem</i> (Problema de Complementaridade Linear)
MCP	<i>Mixed Complementarity Problem</i> (Problema de Complementaridade Mista)
MPEC	<i>Mixed Complementarity Problem with Equilibrium Constraints</i> (Problema de Complementaridade Mista com Restrições de Equilíbrio)
NCP	<i>Nonlinear Complementarity Problem</i> (Problema de Complementaridade Não-Linear)
NGL	<i>Natural gas liquids</i> (Gasolina natural)
PQU	Petroquímica União

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	Objetivo Geral .....	14
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
1.3	LIMITAÇÕES .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	MODELOS DE EQUILÍBRIO.....	16
2.2	PROBLEMAS DE COMPLEMENTARIDADE MISTA .....	17
2.3	MODELOS DE INVESTIMENTO.....	20
2.4	FERRAMENTAS PARA PROBLEMAS DE COMPLEMENTARIDADE MISTA.....	24
<b>3</b>	<b>A PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA BRASILEIRA.....</b>	<b>25</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA.....	25
3.2	A PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA BRASILEIRA .....	26
<b>4</b>	<b>MODELO .....</b>	<b>29</b>
4.1	MODELO DE EQUILÍBRIO.....	29
4.2	CURVA INVERSA DE DEMANDA .....	32
4.3	CONVEXIDADE DO MODELO .....	33
4.4	PREMISSAS E LIMITAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DO MODELO .....	35
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
5.1	CUSTO DE INVESTIMENTO E CENÁRIOS ADOTADOS .....	36
5.2	ETENO .....	40
5.2.1	MONOPÓLIO DE MERCADO .....	40
5.2.2	DUOPÓLIO DE PRODUÇÃO.....	42
5.3	PROPENO .....	45
5.3.1	MONOPÓLIO DE MERCADO .....	45
5.3.2	DUOPÓLIO DE PRODUÇÃO.....	47
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>50</b>
6.2	LIMITAÇÕES .....	51
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE – CÓDIGO AMPL.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A liberalização econômica com o intuito de tornar os mercados mais competitivos pode ser apontada como um dos principais fatores responsáveis pela reestruturação de diversos setores da economia. Uma vez permitida a entrada de outros agentes para compor um determinado mercado, haverá um movimento de cada tomador de decisão, dentro de um universo bem definido de estratégias possíveis, na busca do objetivo que mais lhe beneficie. Uma abordagem que leva em consideração a interação entre essas escolhas e decisões passa então a ter relevância. Nesse contexto, a Teoria dos Jogos vem se mostrando capaz de prover um embasamento robusto para entender e analisar fenômenos de interação estratégica (DIXIT, 2004).

A análise do comportamento de mercados de energia e seus participantes tem recebido especial atenção ao longo dos últimos 30 anos. Devido à reestruturação que este setor sofreu nos Estados Unidos e em diversos países da Europa, modelos e ferramentas que utilizam uma abordagem baseada na Teoria dos Jogos vêm sendo estudados com o objetivo de entender o funcionamento destes mercados (GABRIEL et al., 2013; VENTOSA, BAÍLLO, RAMOS & RIVER, 2005, entre outros).

Quando se analisa a formação e evolução do mercado petroquímico brasileiro, nota-se que o mesmo também passou por um processo de reestruturação semelhante a este observado no mercado de energia citado anteriormente, no que diz respeito a abertura de mercado. A indústria petroquímica no Brasil teve seu início propriamente dito na década de 1960 do século passado, com a construção do complexo da PQU, localizado no Grande ABC no Estado de São Paulo, e posterior construção dos complexos da Copene em Camaçari no Estado da Bahia, e Copesul em Triunfo no Estado do Rio Grande do Sul.

O início das operações foi notoriamente caracterizado pelo alto grau de regulamentação que o governo brasileiro exercia nesta indústria, onde a Petroquisa, subsidiária da Petrobras, detinha a maioria do capital de controle destas companhias. O fornecimento das principais matérias-primas, o gás natural e um derivado do petróleo conhecido como nafta, era exclusivo da Petroquisa e o seu preço era formado com base nos custos advindos do refino e nos custos do petróleo importado pela Petrobras. Não existia a possibilidade de negociação de matéria-prima em outros mercados com preços mais competitivos.

Os produtos petroquímicos, por sua vez, também estavam submetidos às fortes regulamentações e por mais de vinte anos foram controlados pelo governo. Os preços

internos não seguiam regras de mercado, ou seja, não obedeciam às dinâmicas de oferta e demanda. Ao invés disso, guardavam relação com os custos de investimento e de operação, que em geral eram mais altos no Brasil. O alinhamento com os preços praticados no mercado internacional se deu somente a partir de 1991, com a liberação de mercados e remoção das barreiras vigentes à importação (PERRONE, 2010).

A partir de então, o balanço entre oferta e demanda e seus desdobramentos começaram a ser evidenciados no mercado petroquímico, principalmente quando se observam os ciclos de alta e baixa característicos desta indústria. A fase de alta acompanha os crescimentos elevados das principais economias mundiais, levando a grandes investimentos em ampliações de capacidade. Em decorrência do tempo de maturidade deste tipo de investimento e pelo fato das plantas possuírem uma escala mínima para que sejam viáveis economicamente, quando estas novas plantas começam a operar há um excedente na oferta no curto/médio prazo e, por consequência, uma redução geral nos preços (BAIN & COMPANY, 2014).

Diante destas constatações, julga-se importante analisar o setor petroquímico brasileiro sob óticas diferentes e que vêm sendo desenvolvidas e aplicadas para outros mercados de commodities, tal como o de energia. Observando a força que o mercado faz neste segmento da indústria, percebemos que um ou mais agentes usam sua influência para melhorar sua posição e seus lucros. Sob este paradigma, encontra-se a necessidade de modelos robustos para auxiliar os tomadores de decisão.

Baseado em Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014) pretende-se nesta dissertação aplicar um modelo de complementaridade mista para estudar o problema de seleção de tecnologia e capacidade de investimento em um ambiente competitivo sob incerteza, concentrando o estudo e a análise nos principais produtos da 1ª geração da cadeia petroquímica brasileira: o eteno e o propeno.

O trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é feita uma revisão da literatura sobre os trabalhos desenvolvidos no setor de energia que utilizam modelos de complementaridade mista na modelagem deste mercado; no capítulo 3 é feita uma breve descrição da indústria petroquímica brasileira, descrevendo as principais tecnologias e seus principais agentes; no capítulo 4 é apresentado o modelo a ser utilizado e os principais conceitos que o definem; o capítulo 5 apresenta os resultados das simulações realizadas; o capítulo 6 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria petroquímica é o maior segmento da indústria química brasileira, responsável por cerca de 30% do faturamento total de US\$ 156,7 bilhões (ABIQUIM, 2014a). A importância deste setor para a economia brasileira pode ser avaliada também pela dependência que diversas outras indústrias da cadeia à jusante, a indústria de transformação do plástico por exemplo, têm em relação aos produtos petroquímicos.

A necessidade de aumentar a competitividade deste setor é alvo de estudos do BNDES, principal órgão do governo de fomento aos grandes empreendimentos industriais e de infraestrutura. Em Gomes, Dvorsak e Heil (2005), apresenta-se um panorama do setor petroquímico brasileiro e analisa-se sua situação e perspectivas para os anos subsequentes. Este estudo confronta a projeção da demanda interna por produtos petroquímicos com o aumento da oferta, que se baseia nos principais projetos de investimento previstos pelas empresas que compõe o setor. Ao final, se faz o balanço do montante necessário para financiar essas ampliações. Não são avaliadas com profundidade restrições relacionadas a disponibilidade de matéria-prima.

Já em Bain & Company (2014), temos um estudo também voltado para o aumento de competitividade do setor petroquímico, porém à luz de um contexto diferente. A reestruturação que a indústria petroquímica sofreu ao longo deste período, principalmente com a criação da Braskem assumindo o controle das principais centrais petroquímicas (Copene, Copesul e PQU) mais as empresas produtoras de resinas termoplásticas, diminuiu o panorama de investimentos previstos para o setor. Essa concentração de mercado, sobretudo nos produtores da chamada 1ª geração, é um dos fatores apontados no estudo como inibidor dos investimentos. Como propostas para contornar esse cenário, são apresentadas alternativas de diversificação do setor que têm como premissa básica a disponibilidade de matéria-prima com custo competitivo por parte da União, através da construção de novas refinarias, e a entrada de novos investidores no setor petroquímico.

Em Gomes (2011), é feita uma análise da estratégia de integração refino-petroquímica no Brasil, tendo como premissa a expansão das atividades destes setores. A modelagem desta expansão tem o objetivo de fazer uma avaliação integrada dos aspectos financeiros, tecnológicos e ambientais e é realizada utilizando duas metodologias distintas: a simulação e a otimização, via um modelo de programação linear. São escolhidas tecnologias consagradas para a realização dos cálculos e estimação de parâmetros, e ao final são feitas análises comparativas que indicam qual a melhor

configuração para uma nova unidade hipotética integrada de refino e produção de petroquímicos da 1ª geração.

De uma maneira geral, não se encontram na literatura muitos estudos voltados para a avaliação do setor petroquímico nacional considerando sua configuração e situação atual. Percebe-se que as metodologias usuais realizam as análises financeiras separadamente, após a definição técnica sobre qual tecnologia deve ser utilizada em um determinado investimento de expansão.

A utilização de um modelo com uma abordagem baseada na Teoria dos Jogos representa uma novidade na forma de avaliar este importante setor da indústria brasileira. Tais modelos podem ser representados pelos problemas de complementaridade mista (MCP). O método de solução desta classe de problemas pressupõe resolver o problema de otimização de cada agente (maximização do seu lucro) simultaneamente. Esta propriedade é garantida pela estrutura de complementaridade do problema e sua solução representa o equilíbrio do jogo no mercado que está sendo analisado.

Neste trabalho será utilizado o modelo proposto por Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014), pelo fato do mesmo considerar em sua formulação um portfólio de tecnologias disponíveis para expansão e ter como variáveis de decisão a capacidade total de cada tecnologia no equilíbrio e o nível de produção. Outra característica importante deste modelo é a incorporação de incertezas, que são representadas através de diferentes cenários, cada um com uma probabilidade definida, de custos marginais de produção. Essa última propriedade do modelo possui alta aderência com o setor petroquímico, uma vez que aproximadamente 80% dos custos marginais de produção das plantas petroquímicas dependem do custo de matéria-prima (PEREIRA, 2010; GOMES, 2011; BAIN & COMPANY, 2014).

Levando em consideração a importância do setor petroquímico para a economia brasileira, o aumento da oferta de matérias-primas, principalmente com a entrada em operação da Refinaria Abreu e Lima e do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro, e o aumento da demanda por produtos petroquímicos para os próximos anos (BAIN & COMPANY, 2014), julga-se importante avaliar este setor com um enfoque apropriado para modelos econômicos, tal como os modelos de complementaridade mista.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar as alternativas de configuração para a expansão do mercado petroquímico brasileiro de eteno e propeno em um ambiente competitivo sob incerteza.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Propor cenários com diferentes custos de matéria-prima, que irão representar o ambiente de incerteza a que o mercado está submetido;
- Caracterizar quem são os atuais agentes do mercado petroquímico brasileiro e as principais rotas tecnológicas para produção de eteno e propeno, que irão compor as alternativas para expansão deste mercado;
- Tendo como premissa a projeção de demanda de eteno e propeno e oferta de matéria-prima petroquímica para os próximos anos no mercado brasileiro, resolver o MCP baseado no modelo de Filomena, Campos-Náñez e Duffey, 2014, e, de posse dos resultados, analisar as alternativas de configuração do setor petroquímico brasileiro da 1ª geração.

### 1.3 LIMITAÇÕES

A pesquisa propõe uma análise preliminar do mercado de eteno e propeno e apresenta limitações em sua abrangência. A influência dessas limitações no modelo pode mudar fortemente os resultados.

Não foi levada em conta a dinâmica do mercado externo, ou seja, os níveis de importação e exportação das commodities em estudo. A produção de eteno e propeno no âmbito da pesquisa é considerada suficiente para o mercado brasileiro. Conforme Abiquim (2015), a importação de eteno em 2013 foi da ordem de 4.500 toneladas e a exportação foi da ordem de 3.600 toneladas. No mesmo ano, as importações de propeno foram de 201 toneladas e as exportações foram de 183 toneladas. Esses valores não são representativos frente à quantidade total de eteno e propeno negociados no mercado nacional.

A tendência dos custos das matérias-primas utilizados na pesquisa baseia-se na percepção da consultoria IHS Markit para os próximos anos, que pode se alterar conforme a dinâmica do mercado. Não é objetivo desta pesquisa desenvolver uma análise estruturada para previsão de preços de matérias-primas petroquímicas. Também não foram considerados modelos assimétricos neste estudo, ou seja, as empresas possuem a mesma estrutura de custos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico sobre modelos de equilíbrio econômico, onde são explicitados os principais conceitos e fundamentos sobre este assunto. Inicialmente, na seção 2.1, são apresentados os principais modelos de equilíbrio parcial utilizados na literatura. Na seção 2.2, é abordado o problema de complementaridade mista, uma vez que este será o modelo utilizado no desenvolvimento desta dissertação. A seção 2.3 discorre sobre trabalhos que formulam problemas de equilíbrio considerando a possibilidade de investimentos em expansão de capacidade e incertezas. E por fim, na seção 2.4, abordam-se as ferramentas computacionais utilizadas no tratamento deste tipo de problema.

### 2.1 MODELOS DE EQUILÍBRIO

A Teoria dos Jogos possui um embasamento matemático robusto, capaz de auxiliar a análise de situações em que existem interações entre agentes que buscam a realização de seus objetivos, em um processo onde cada jogador toma a decisão que mais lhe beneficia até o atingimento do equilíbrio. Sem perda de generalidade, três dos principais modelos de equilíbrio parcial utilizados na literatura para descrever oligopólios são: Cournot, Stackelberg e Bertrand. Uma premissa geral para estes três modelos é a homogeneidade do bem produzido, que permite a existência de uma curva única de demanda.

De acordo com Anderson e Engers (1992), o modelo de Cournot concentra-se em um regime de concorrência baseado nas quantidades a serem produzidas por cada participante, onde a decisão de cada firma é tomada de forma independente e simultânea. Cada firma define a quantidade a ser produzida objetivando maximizar o seu lucro, afetando o preço de mercado. O equilíbrio é atingido quando cada firma, levando em conta a reação dos demais participantes sobre determinada quantidade a ser produzida, não tem mais incentivo para mudar suas decisões. Essa definição torna o modelo de Cournot um caso particular do Equilíbrio de Nash para jogos não cooperativos, onde a decisão de um jogador considera a decisão dos demais jogadores. Já o modelo de Stackelberg pressupõe a existência de uma empresa líder que toma a decisão sobre a quantidade a ser produzida antes das demais. Somente após tomar conhecimento deste fato, as empresas seguidoras decidirão o quanto produzir.

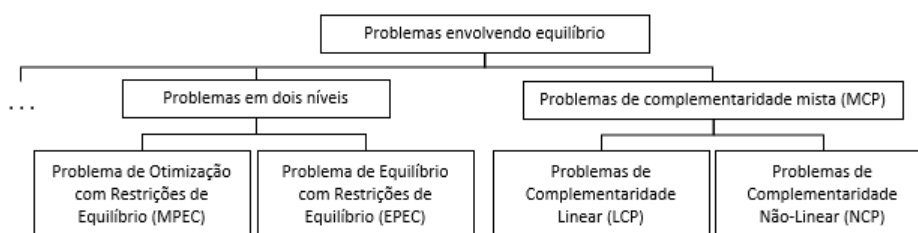
Conforme Kreps e Scheinkman (1983), o modelo de Bertrand baseia-se na competição sobre os preços, ao contrário do modelo de Cournot que se baseia nas



quantidades produzidas. Os preços são decididos de forma independente e simultânea e a demanda é alocada conforme a ordem crescente dos preços, ou seja, a firma com menor preço atende à demanda que lhe é determinada e se existe demanda não atendida, esta vai para a firma com segundo menor preço. A solução encontrada também é um Equilíbrio de Nash.

A modelagem matemática destes fenômenos observados em sistemas econômicos é feita através dos problemas de complementaridade, uma vez que em sua formulação está subjacente a noção de equilíbrio. Tomando como exemplo o balanço entre oferta e demanda de um determinado conjunto de produtos, temos que, para cada produto, a produção total deve atender à demanda e o preço deve ser não negativo. Adicionalmente, deve existir uma complementaridade entre essas duas relações: onde a produção exceder a demanda, o preço deve ser zero, ou equivalentemente, onde o preço é positivo a produção deve ser igual à demanda. É nesta condição de manter a igualdade para pelo menos uma das restrições que reside o conceito de complementaridade.

Em Ferris e Pang (1997) é possível encontrar os principais tipos de problemas de complementaridade, além de uma série de aplicações para estes problemas. A Figura 1 mostra de forma esquemática os subgrupos mais importantes dos problemas que envolvem equilíbrio. Em todos eles, as condições de complementaridade estão presentes em sua formulação.



**Figura 1:** Subgrupos importantes dos problemas de equilíbrio

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo utilizado nesta dissertação se caracteriza como um problema de complementaridade mista. A próxima seção irá discutir este subgrupo de problemas.

## 2.2 PROBLEMAS DE COMPLEMENTARIDADE MISTA

Uma das aplicações dos problemas de complementaridade mista consiste na representação de mercados baseados no modelo de Cournot, sendo que a solução do problema é o Equilíbrio de Nash. Intuitivamente, este equilíbrio representa um padrão de

produção no qual nenhuma firma pode aumentar seu lucro alterando unilateralmente seu nível de produção. Uma vez que nenhuma firma escolhe alterar sua produção, tem-se o equilíbrio (GABRIEL et al., 2013).

Baseado em Choi (2014), a formulação dos problemas de complementaridade mista é apresentada a seguir, primeiramente na forma escalar e em seguida na forma geral.

- Dado  $l, u \in \mathbb{R}$  e uma função suave  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , resolver um problema de complementaridade mista é equivalente a encontrar  $x \in \mathbb{R}$  tal que  $l \leq x \leq u \perp f(x)$ , ou seja:

$$\text{ou } \begin{cases} x = l & \text{e } f'(x) \geq 0, \\ x = u & \text{e } f'(x) \leq 0, \\ l < x < u & \text{e } f'(x) = 0. \end{cases}$$

- Dado  $l, u \in \mathbb{R}^n$  e uma função suave  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , resolver um problema de complementaridade mista é equivalente a encontrar  $x \in \mathbb{R}^n$  tal que  $l \leq x \leq u \perp \partial f / \partial x$ , onde  $\perp$  significa que  $l_i \leq x_i \leq u_i$  é complementar à  $\partial f_i / \partial x_i$  para  $i = 1, \dots, n$ . (CHOI, 2014, p. 5, tradução do autor).

Um problema de complementaridade não-linear (NCP) é caracterizado quando  $l = 0$  e  $u = +\infty$ . Se  $F(x) = Ax + b$  para alguma matriz quadrada  $A$  de ordem  $n$  e algum vetor  $b$  de dimensão  $n$ , tem-se um problema de complementaridade linear (LCP).

A conexão deste problema com o equilíbrio de mercado à la Cournot é feita através das condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Matematicamente, enxergamos essa conexão da seguinte forma:

- Dado  $l, u \in \mathbb{R}^n$  como limites para a variável  $x$  e funções continuamente diferenciáveis  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $c : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , então um ótimo local  $x^*$  satisfaz as condições KKT, o que implica em um MCP:

$$x^* = \min_{l \leq x \leq u} f(x) \quad \text{s.t.} \quad c(x) \geq 0$$

As condições KKT de primeira ordem para este problema são:

$$\exists \lambda \in \mathbb{R}^m \text{ s.t.}$$

$$\begin{cases} l \leq x \leq u \perp \nabla f(x) - \nabla c(x)\lambda = 0 \\ 0 \leq \lambda \perp c(x) \geq 0 \end{cases}$$

onde  $\lambda$  são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições  $c(x)$ .

Supondo ainda que as funções  $f(x)$  e  $c(x)$  são convexas, então a solução deste MCP é a solução ótima global para o problema de otimização (JENSEN & BARD, 2003).

Para encontrar a solução desta classe de problemas, existe uma diversidade de algoritmos. Billups e Murty (2000) descrevem várias formas de problemas de complementaridade com alguns exemplos e aplicações, além de apresentar importantes algoritmos e em quais situações eles podem ser usados de forma eficiente. De acordo com esses autores, o método pivotal de Lemke e Howson (1964) é amplamente utilizado na resolução de LCP's que têm por objetivo computar o equilíbrio de Nash em um jogo bimatrix.

Ainda de acordo com Billups e Murty (2000), no caso dos NCP's vários algoritmos são utilizados para obter sua solução, cada um dos quais é análogo aos métodos iterativos tradicionais de solução de sistemas não lineares. Entre esses, podemos citar o método de Newton, o método quase-Newton e o método de relaxação sucessiva.

Para uma compreensão detalhada sobre o LCP, seus tipos e métodos de solução, pode-se recorrer a Cottle et al. (1992). Para um tratamento mais abrangente sobre o NCP, pode-se consultar Harker e Pang (1990).

O uso de NCP's para resolver problemas de equilíbrio pode ser encontrado em Gabriel, Kiet e Zhuang (2005). Neste trabalho, os autores propõem um modelo de complementaridade mista não linear para o mercado de gás natural norte-americano, levando em conta a interação entre produtores, comerciantes, consumidores e outros agentes deste mercado. As condições KKT são derivadas para o problema de otimização de cada participante, que por sua vez está restringido pelas condições de equilíbrio de mercado (i.e. oferta igual à demanda). O problema é resolvido computacionalmente utilizando a linguagem algébrica GAMS.

Hobbs e Rijkers (2004) apresentam um modelo baseado em um MCP para analisar o mercado de energia elétrica. Este modelo considera a competição em um oligopólio onde os geradores de energia enfrentam um sistema complexo de precificação, ou seja, além dos custos marginais de produção também são levados em consideração os custos referentes à rede de transmissão. Pompermayer et al. (2007) apresenta um modelo de equilíbrio espacial de preços em um mercado oligopolizado de derivados de petróleo. Este modelo é representado através de um problema de desigualdade variacional, que é uma generalização do MCP. Este modelo é aplicado no mercado brasileiro e resolvido através de um algoritmo iterativo do tipo Gauss-Seidel.

Na próxima seção serão discutidos modelos de equilíbrio que consideram investimentos em aumento de capacidade em sua formulação, uma vez que essa dissertação será baseada em um modelo deste tipo.

### 2.3 MODELOS DE INVESTIMENTO

Os trabalhos presentes na literatura e apresentados nessa seção foram desenvolvidos em sua maioria para o setor de energia, porém julga-se que os mesmos podem ser aplicados no mercado petroquímico. Para melhor entendimento do que será apresentado, dois conceitos fundamentais serão introduzidos antes do início das discussões: o conceito de modelos *open-loop* e *closed-loop*.

Conforme Murphy e Smeers (2005), em um jogo do tipo *open-loop* as decisões sobre o investimento e capacidade de produção são feitas ao mesmo tempo. Este jogo é baseado no modelo de Cournot, uma vez que os participantes primeiro escolhem as quantidades e depois se define o preço. Este tipo de jogo é representado matematicamente por um MCP, que apesar de simplificar a natureza dinâmica do problema, apresenta uma interpretação realística. As plantas são construídas e, ao mesmo tempo, sua produção é comercializada através de contrato de longo prazo. Esse tipo de contrato é muito usual no mercado de petroquímicos básicos. O modelo do tipo *closed-loop* é construído sobre as mesmas variáveis de decisão. A grande diferença está no fato de que as decisões não são tomadas ao mesmo tempo. Primeiramente se decide sobre o aumento da capacidade e em um segundo período do jogo, se decide sobre a produção. Este modelo representa de forma mais fidedigna mercados spot, onde as firmas competem sem ter garantias de que irão comercializar sua produção. A modelagem matemática deste tipo de jogo que acontece em dois níveis é feita através de MPEC's ou, de uma forma mais abrangente, como EPEC's. Os autores identificam neste trabalho casos especiais nos quais a solução para modelos do tipo *closed-loop* pode ser encontrada.

Em Wogrin et al. (2013), é apresentado um modelo de expansão de capacidade que é resolvido tanto para uma estrutura de jogo *open-loop* quanto *closed-loop*. O modelo é resolvido analiticamente e numericamente com a atribuição de valores hipotéticos, porém não são consideradas incertezas nos parâmetros de demanda ou custos. Conforme os resultados apresentados, quando o comportamento de mercado segue o modelo de Cournot, os resultados são próximos para as duas formas de estrutura do jogo. Porém em mercados de competição perfeita, o modelo *closed-loop* se mostra mais apropriado. Ainda segundo os autores, a resolução de problemas *closed-loop* pode se mostrar muito

desafiadora. Por esse motivo, aplicações práticas tem um forte incentivo para recorrer a modelos *open-loop*, de mais fácil resolução. Isso explica de certa forma a popularidade que este modelo tem em diversos trabalhos.

Pineau e Murto (2003) propõem um modelo para descrever o perfil de expansão de capacidade entre três firmas no mercado de energia elétrica finlandês, considerando incertezas no crescimento da demanda e uma estrutura de jogo do tipo *open-loop*. Essa incerteza é representada através de uma árvore de cenários, associando uma probabilidade para cada evento. O modelo permite escolher duas tecnologias com custos de produção diferentes, e foi implementado computacionalmente utilizando dados históricos do mercado em questão. Este modelo apresenta uma característica multiperíodo, ou seja, o jogo se estende por um período de dez anos e se aplica um fator de desconto no lucro de cada jogador em cada ano, de forma que a análise seja feita em valores presentes. De uma maneira geral, os autores puderam constatar que, frente a um cenário de crescimento de demanda, o correspondente aumento de capacidade não acontece e o conseqüente aumento de preços se transforma em uma ameaça para o mercado.

Garcia e Shen (2010) chegam a resultados semelhantes, porém utilizando outra abordagem. É proposto pelos autores um modelo estilizado para o mercado de energia, onde as firmas competem por quantidades e se considera o crescimento estocástico da demanda. O problema é dividido em dois estágios: no primeiro, de longo prazo, as empresas adequam sua capacidade de produção através de investimentos. É aplicado o conceito de Equilíbrio Perfeito de Markov para obter a solução. No segundo estágio, de curto prazo, as capacidades são fixadas e a competição se dá pela definição das firmas acerca da produção ótima, comportando-se como no modelo de Cournot. Essa estrutura de jogo *closed-loop* é resolvida analiticamente e conclui-se que o mercado não induz a um aumento de capacidade correspondente ao aumento da demanda. A magnitude dos resultados varia conforme são alterados os custos de entrada e os custos de produção e investimento.

O risco enfrentado por investidores no setor de energia quando decidem expandir sua capacidade é estudado por Ehrenmann e Smeers (2011). O modelo de equilíbrio é formulado como um problema de complementaridade e capta diversas características do mercado de energia que influenciam as decisões das firmas atuantes, tais como a escolha entre a tecnologia da planta (gás natural ou carvão), períodos de pico de demanda e incertezas nos custos dos combustíveis. As firmas são tratadas como neutras ou avessas ao risco, sendo que a aversão ao risco é modelada através do CVaR (*Conditional Value*

at Risk) do lucro das plantas. Os resultados numéricos mostram que o risco induz a mudanças de capacidade, porém quando as firmas são avessas ao risco, os investimentos tendem a ser menores do que quando consideradas neutras ao risco. Consequentemente, a aversão ao risco aumenta a possibilidade de escassez de capacidade, o que pode impactar diretamente nos preços. Em Ehrenmann e Smeers (2013), o risco em modelos de equilíbrio de expansão de capacidade é avaliado sob uma ótica diferente. O modelo multiperíodo proposto incorpora o uso do CAPM (*Capital Asset Pricing Model*) com o objetivo de estudar a influência das taxas de desconto em projetos de expansão de capacidade. Em outras palavras, receitas com vendas e custos com combustível, por exemplo, são descontados cada um com taxas específicas. Algumas simulações numéricas são realizadas e a principal conclusão é de que a configuração final de expansão difere ao se adotar o modelo proposto quando comparado com os resultados obtidos utilizando uma taxa única de desconto.

A avaliação do impacto em um mercado ocasionado pela possibilidade de escolha de uma firma entre diferentes tecnologias é estudado por Goyal e Netessine (2007). O modelo considera um duopólio que atua sob incerteza na demanda, onde as firmas podem optar por uma tecnologia dedicada à fabricação de um determinado produto ou uma tecnologia flexível, que permite a fabricação de dois tipos de produtos. Três decisões devem ser feitas em sequência, onde cada uma consiste em um jogo independente: primeiro se faz a escolha da tecnologia, seguido pela definição da capacidade e terminando na definição sobre as quantidades a serem produzidas. As definições sobre tecnologia e capacidade são feitas considerando a demanda como incerta, porém a produção é definida em um momento posterior, quando a curva de demanda é conhecida. O modelo é resolvido de forma analítica e os autores concluem que flexibilizar as tecnologias de produção nem sempre é a melhor resposta, podendo coexistir tecnologias dedicadas e flexíveis no equilíbrio. Outro resultado interessante apontado pelos autores mostra que, conforme o custo de produção aumenta, seja ela flexível ou dedicada, diminui a disposição das firmas com tecnologia flexível pagar pelo custo extra que esta flexibilidade acarreta.

Pineau, Rasata e Zaccour (2011) revisitam o modelo multiperíodo adotado por Pineau e Murto (2003) para avaliar as mudanças ocorridas no mercado de energia elétrica finlandês, no que diz respeito aos investimentos de aumento de capacidade realizados no setor. A estrutura informacional do modelo é do tipo *open-loop*, e seu uso é justificado pelos autores devido à facilidade de implementação computacional e a existência de

algoritmos eficientes para sua resolução. São feitas diversas alterações em alguns parâmetros do modelo, tais como a elasticidade de preços, taxa de depreciação e o horizonte de análise, de forma a estudar a influência dessas variações nos níveis de investimento das empresas e permitir comparar com o que foi efetivamente realizado ao longo dos anos. As principais conclusões apontam para uma adequada escolha da taxa de depreciação e do horizonte de planejamento adotados, pois são os parâmetros de maior influência nos resultados. Outro fato constatado foi a avaliação da eficiência do modelo, onde se observou baixa aderência entre as tecnologias adotadas pelas empresas nas ampliações realizadas em relação aos níveis de investimento previstos. Dois fatores são apontados como os principais limitantes, sendo eles a equação de custo de operação de cada tecnologia, que carece de mais observações empíricas para obter um melhor ajuste, e a própria estrutura informacional do problema que, segundo os autores, pode ser uma suposição muito forte para o comportamento dos agentes deste mercado.

Huppmann e Egging (2014) propõem um modelo de complementaridade mista de larga escala, com estrutura do tipo *open loop*, para analisar o mercado global de energia, levando em consideração a possibilidade de substituição de combustíveis como matéria prima, restrições de capacidade e investimento para adequação à demanda. Apesar do modelo conter parâmetros determinísticos, são propostos dois cenários para ilustrar sua funcionalidade: o primeiro analisa o impacto na diminuição da disponibilidade do *shale gas* como matéria-prima nos Estados Unidos e o segundo considera o aumento da pressão política pela utilização de tecnologias com baixa emissão de gás carbônico. Os autores utilizam uma função de custo marginal não linear, porém convexa, e aplicam dados reais do setor para resolução do modelo. Dentre as principais conclusões, observa-se o renascimento da energia nuclear como fonte de energia para os próximos anos.

Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014) apresentam um modelo estilizado para determinar o equilíbrio de capacidade e produção em um ambiente competitivo de geração de energia elétrica, levando em consideração um portfólio de tecnologias disponível. As incertezas enfrentadas pelas firmas estão nos custos marginais de produção e são inseridas no modelo através de cenários com probabilidades associadas. O modelo é resolvido analiticamente para um duopólio do tipo *open-loop* e para um jogo de dois estágios com uma estrutura *closed-loop*, de forma que as condições que relacionam os resultados obtidos em ambas as estruturas de jogo possam ser identificadas e discutidas.

## 2.4 FERRAMENTAS PARA PROBLEMAS DE COMPLEMENTARIDADE MISTA

Conforme visto na seção anterior, um jogo com estrutura informacional do tipo *open-loop* que pode ser modelado como um problema de complementaridade mista é mais fácil de tratar do que problemas com estrutura do tipo *closed-loop*, onde sua formulação leva a um problema de otimização com restrições de equilíbrio e cuja resolução, tanto analítica quanto computacional, pode se tornar inviável em muitos casos.

A implementação computacional de problemas de equilíbrio se popularizou através da utilização de linguagens algébricas de modelagem, como AMPL e GAMS. Elas oferecem um ambiente adequado para construir expressões matemáticas, além de gerenciar de maneira eficiente uma grande quantidade de dados, de forma que o usuário se concentre no modelo ao invés do método de solução (FERRIS e PANG, 1997).

Aliado a essas linguagens utilizam-se os *solvers* para a resolução numérica dos problemas. Para problemas de complementaridade de uma maneira geral, o *solver* utilizado de forma mais abrangente é o PATH (DIRKSE & FERRIS, 1995), devido à alta eficiência e rapidez do algoritmo iterativo que ele executa. De acordo com Choi (2014), o PATH solver é baseado no método clássico de Newton para sistemas não-lineares combinado com algoritmo pivotal de Lemke, e apesar de existirem vários outros *solvers* capazes de encontrar soluções ótimas para problemas de complementaridade mista, o PATH tem se mostrado o de maior sucesso.

Devido a essa capacidade que as linguagens de modelagem algébrica possuem para definição dos modelos através de sintaxe declarativa, foi escolhida o AMPL (*A Mathematical Programming Language*) juntamente com o PATH para a modelagem e resolução do problema de complementaridade mista proposto nesta dissertação. Um exemplo do código elaborado em AMPL para este trabalho pode ser encontrado no Apêndice.

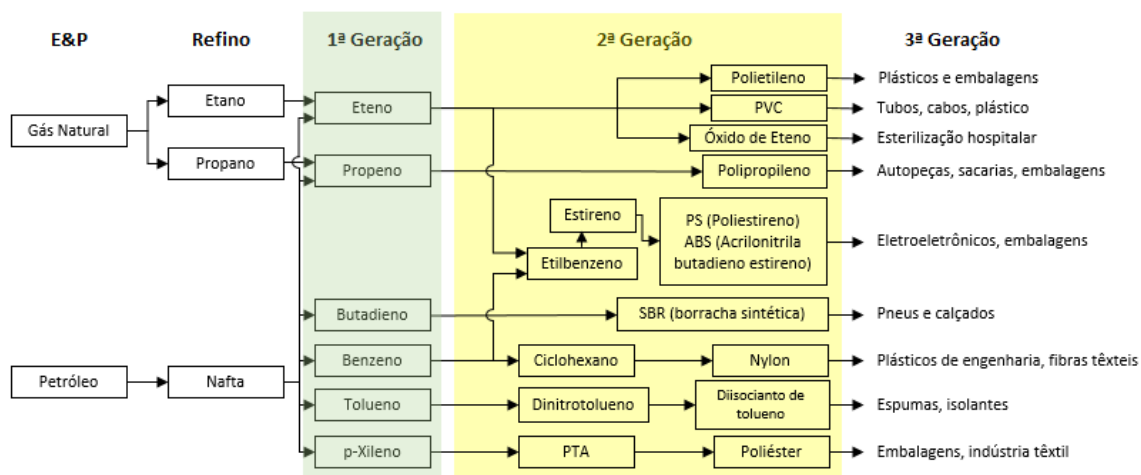


### 3 A PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA BRASILEIRA

Neste capítulo apresenta-se um breve panorama do setor petroquímico brasileiro, concentrando-se na primeira geração e seus principais produtos: o eteno e o propeno. Pretende-se mostrar as principais características da cadeia petroquímica, os principais produtores, volumes produzidos atualmente e principais tecnologias de produção

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

De acordo com Perrone (2010), a indústria petroquímica constitui um ramo da indústria química que utiliza derivados do petróleo e gás natural como matéria-prima e, dessa forma, não faz parte do setor de exploração e refino do petróleo. No Brasil, convencionou-se dividir as etapas de produção da indústria petroquímica em três gerações. A primeira realiza a transformação da nafta ou gás natural em petroquímicos básicos, dos quais os mais importantes são o eteno e o propeno; a segunda utiliza os insumos petroquímicos da geração anterior para a produção de petroquímicos intermediários, tais como as resinas termoplásticas, o estireno, o nylon, dentre outros; por fim, a terceira geração contempla as empresas que utilizam os petroquímicos intermediários para a comercialização de produtos finais, utilizados nos segmentos de embalagens, construção civil, alimentação, e diversos outros. A Figura 2 mostra de forma esquemática e simplificada esta divisão da cadeia petroquímica e o grau de encadeamento com outros setores industriais.



**Figura 2:** Cadeia petroquímica

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em BAIN&COMPANY, 2014

A indústria petroquímica ilustra um caso de oligopólio concentrado, com fortes barreiras à entrada além de ser intensiva em capital, ou seja, dependente de grande volume

de investimentos (ativo imobilizado) para manter sua posição. Segundo Bastos (2009), a escala de produção e o acesso à matéria prima com baixo custo representam os principais fatores de competitividade desta indústria, salientando-se que este último é responsável por cerca de 80% dos custos totais de produção dos petroquímicos de primeira geração. O modelo de precificação dessa indústria é bem característico sendo o mercado e o balanço entre oferta e demanda os grandes reguladores de preços. A alta na demanda gera a necessidade de investimentos, que são realizados em grande escala e possuem um longo período de maturação e implementação. Como consequência, a expansão da oferta ocorre “em saltos” e posteriormente levam a queda de preços. Os investimentos cessam até que a oferta e a demanda se equilibrem.

As tecnologias de produção na indústria petroquímica baseiam-se em processos químicos e dependem, como já dito anteriormente, de grande escala para se tornarem viáveis. No segmento de petroquímicos básicos, i.e. da primeira geração, isso se torna mais evidente pelo fato dos produtos serem homogêneos, ou seja, não há necessidade de investir em inovação dos mesmos com objetivo de obter vantagens competitivas em relação aos concorrentes.

A grande maioria dos petroquímicos básicos se encontram no estado gasoso em diferentes condições de temperatura e pressão, sendo que para se tornarem líquidos precisam ter sua temperatura rebaixada à patamares criogênicos, implicando em altos custos de armazenamento e transporte. Esse é um dos principais fatores que justificam a formação de polos petroquímicos de produção que integram a produção da primeira e da segunda geração, tanto no Brasil quanto no resto do mundo. Dessa forma, não existe incentivo para consumidores de petroquímicos básicos armazenarem esses produtos para se protegerem de futuras flutuações de preço.

Na próxima seção serão apresentados os principais produtores de eteno e propeno no Brasil, qual a capacidade instalada e perspectivas para demanda destes produtos.

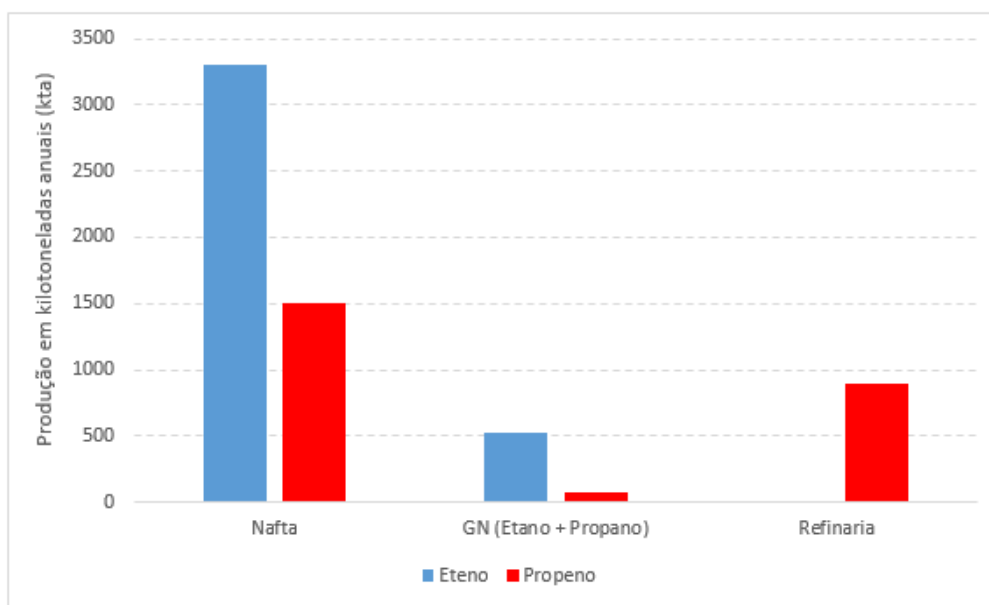
### **3.2 A PRIMEIRA GERAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA BRASILEIRA**

A formação e o início das operações da indústria petroquímica foram brevemente apresentados na introdução deste documento. Complementarmente ao histórico apresentado, se faz importante destacar o processo de privatização e integração sofrido por este setor, que modificou sua estrutura adequando-a aos padrões de competitividade.

A abertura comercial ocorrida na década de 1990 obrigou a indústria petroquímica nacional a se reorganizar, pois as políticas protecionistas de preços obsoletas deixaram de

existir e automaticamente expuseram a indústria como um todo às forças do mercado. O caminho encontrado para retomar a competitividade passou inicialmente por um processo de privatização, através da venda das participações acionárias da Petroquisa. Este movimento, porém, levou a uma pulverização da indústria e os novos arranjos societários acabaram colocando grupos concorrentes no controle de empresas tanto da primeira quanto da segunda geração, constituindo um obstáculo à expansão. A partir de 2007 uma série de fusões e aquisições tiveram início, sendo que em 2010 esse processo foi concluído com a Braskem passando a controlar toda a primeira geração da indústria petroquímica e produção de resinas termoplásticas. Mais detalhes podem ser encontrados em Perrone, 2010.

A produção atual de eteno e propeno pode ser visualizada na Figura 3. A parcela produzida oriunda de nafta, etano e propano (estes dois últimos provenientes do tratamento do gás natural, ou GN) são de responsabilidade das plantas da Braskem, as quais compreendem as unidades dos polos petroquímicos de Camaçari (BA), Triunfo (RS), Capuava (SP) e Duque de Caxias (RJ), sendo que esta última é a única unidade que produz petroquímicos básicos a partir do etano e propano. As refinarias da Petrobras são responsáveis pela produção de 36% de propeno, resultante dos processos de separação inerentes ao refino do petróleo.<sup>1</sup>



**Figura 3:** Produção atual de eteno e propeno

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em BAIN & COMPANY, 2014

<sup>1</sup> Existe uma planta de produção de eteno com capacidade de 200 kta, localizada no Polo Petroquímico de Triunfo (RS), cuja matéria prima é o etanol. Como esta tecnologia de produção ainda não se mostrou competitiva, não será considerada neste estudo.

A projeção da demanda por estes insumos petroquímicos é calculada tomando como referência o nível do consumo dos produtos da segunda e terceira geração da cadeia que utilizam esses insumos em seu processo produtivo. Historicamente, os produtos derivados do eteno e propeno apresentam déficit na balança comercial, e o volume de produtos da primeira geração contidos nos produtos da segunda geração importados é o principal parâmetro utilizado na projeção da demanda por petroquímicos básicos. Utilizando esta premissa, Bain & Company (2014) projeta a duplicação da demanda por eteno e propeno até 2025 em relação aos valores atuais. Esse aumento da demanda por petroquímicos básicos requer necessariamente um aumento da oferta de matéria prima provenientes do refino do petróleo. Os investimentos recentes feitos pela Petrobras acompanham essa tendência, tais como a Refinaria Abreu e Lima e o Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro, ambos em fase de conclusão de construção. A partida destes empreendimentos representa uma enorme oportunidade para a expansão do setor petroquímico, tanto para tecnologias baseadas na utilização de nafta quanto gás natural.

Para o desenvolvimento deste trabalho, serão consideradas como alternativas tecnológicas para produção de eteno e propeno aquelas que já estão em operação no Brasil, a saber:

- Craqueamento a vapor de cargas leves: utiliza o etano e o propano como matéria prima e produz eteno e propeno;
- Craqueamento a vapor de cargas líquidas: utiliza a nafta como matéria prima, produzindo eteno, propeno e demais petroquímicos básicos (aromáticos e butadienos). Possui flexibilidade para adaptar sua utilização com carregamento de gás natural, tornando-o um cracker de cargas mistas. Outra matéria prima líquida, alternativa à nafta, que pode ser processada utilizando esta rota tecnológica com algumas alterações é a NGL. Esta matéria prima será considerada nas simulações, assim como o custo das adequações necessárias;

Existem outras tecnologias para produção de petroquímicos básicos, porém as mesmas dependem de matérias primas alternativas que não se mostram competitivas no cenário brasileiro. Mais informações sobre processos de produção de insumos petroquímicos podem ser encontradas em Gomes (2011).

## 4 MODELO

Neste capítulo serão apresentadas as equações que compõem o modelo de equilíbrio utilizado nesta dissertação. Na seção 4.1 encontram-se a função objetivo e restrições que, submetidas às condições KKT, modelam o equilíbrio de mercado. Na seção 4.2 mostra-se como será calculada a curva inversa de demanda. Na seção 4.3 discute-se a convexidade do modelo. A seção 4.4 traz as limitações do modelo e premissas adotadas para a sua aplicação neste trabalho.

### 4.1 MODELO DE EQUILÍBRIO

O problema de definição de tecnologia e capacidade de produção sob incerteza será tratado nesta dissertação baseando-se no modelo proposto por Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014). A abordagem utilizada considera um ambiente onde as empresas competem em um oligopólio a la Cournot, ou seja, competem por quantidades, e tomam as decisões sobre o portfólio de tecnologias, capacidades e produção de forma simultânea, caracterizando o modelo como um jogo de um estágio. A estrutura informacional do modelo é do tipo *open-loop*, de forma que as decisões passadas dos agentes não retroalimentam o jogo. Isso implica que cada agente não observa as ações dos demais e que, no equilíbrio, não haverá estímulo para os jogadores alterarem suas decisões.

O modelo será aplicado no mercado brasileiro de eteno e propeno, separadamente para cada produto. Todos os agentes estão submetidos à mesma curva inversa de demanda, em que os preços são dados pela equação  $\pi(Q) = \alpha - \beta Q$ , onde  $\alpha$  representa a interceptação da curva quando a quantidade produzida é zero,  $\beta$  representa a inclinação da curva e  $Q$  representa a quantidade total produzida. A incerteza é incorporada ao modelo através do custo marginal de produção, que é definido dentro de um conjunto  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  de cenários possíveis. Cada cenário  $s \in S$  possui uma probabilidade  $p_s > 0$  associada, de forma que  $\sum_{s \in S} p_s = 1$ .

Conforme apresentado na seção 2.2 deste documento, a competição entre empresas seguindo o modelo de Cournot pode ser representado por um problema de complementaridade mista, cuja estrutura pode ser obtida através das condições de Karush-Kuhn-Tucker de primeira ordem associadas ao problema de maximização de lucro de cada agente. A solução do problema de complementaridade mista, por sua vez, representa o equilíbrio do jogo.

A notação utilizada na formulação do modelo é a seguinte:

$i$	Índice de empresas petroquímicas produtoras de eteno e propeno.
$t$	Índice de tecnologias produtoras de eteno e propeno.
$T$	Conjunto de todas as tecnologias.
$s$	Índice de cada cenário.
$S$	Conjunto de cenários.
$k^t$	Custo anual de investimento por tonelada – dependente de $t$ . Este parâmetro pode ser interpretado como o CAPEX necessário para ampliações industriais.
$v_s^t$	Custo marginal de produção por tonelada – dependente de $s$ e $t$ .
$x_i^t$	Variável de decisão: capacidade total de produção de cada tecnologia – dependente de $i$ e $t$ .
$y_{i,s}^t$	Variável de decisão: nível de produção de cada tecnologia – dependente de $i$ , $t$ e $s$ .
$\lambda_{i,s}^t$	Variável dual referente à restrição de capacidade.
$\mu_i^t$	Variável dual referente à restrição de não negatividade de $x_i^t$ .
$\omega_{i,s}^t$	Variável dual referente à restrição de não negatividade de $y_{i,s}^t$ .
$p_s$	Probabilidade de realização do cenário.
$\alpha$	Intercepto da curva inversa de demanda (função linear).
$\beta$	Inclinação da curva inversa de demanda (função linear).
$\sum_{-i} y_{-i,s}^h$	Somatório da produção de todas as empresas, excluindo a produção da empresa $i$ .
$\sum_s p_s v_s^t + k^t$	Custo total esperado de cada tecnologia de produção (custo marginal mais custo de investimento).

A função objetivo de maximização de lucro de cada empresa é representada conforme as equações de (1) a (3):

$$\max \sum_s p_s \left\{ \left[ \alpha - \beta \sum_{h \in T} \left( y_{i,s}^h + \sum_{-i} y_{-i,s}^h \right) \right] \sum_{h \in T} y_{i,s}^h - \sum_{h \in T} v_s^h y_{i,s}^h \right\} - \sum_{h \in T} k^h x_i^h \quad (1)$$

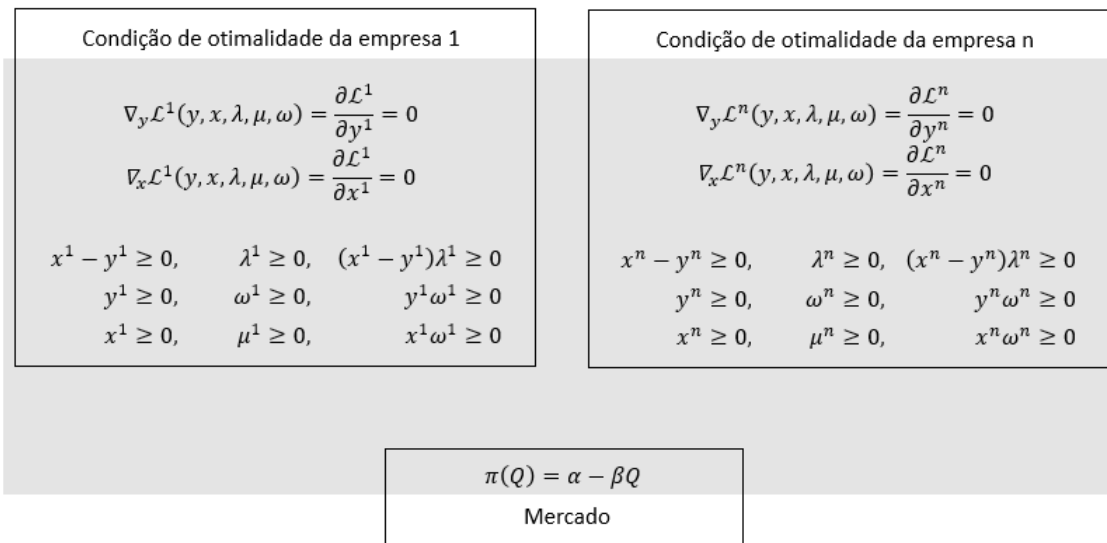
$$y_{i,s}^t \leq x_i^t \quad \forall i, t, s \quad (2)$$

$$y_{i,s}^t, x_i^t \geq 0 \quad \forall i, t, s \quad (3)$$

A função objetivo representada pela equação (1) é quadrática em  $y_{i,s}^h$  é côncava, como é demonstrado na seção 4.3. A restrição representada pela equação (2) define que a produção total das empresas, para cada tecnologia  $t$  e em cada cenário  $s$ , não deve

exceder a capacidade total definida para cada tecnologia. A restrição representada pela equação (3) indica que as variáveis de decisão devem ser não negativas. Ambas as restrições também são funções convexas.

Obedecidas as condições de convexidade da função objetivo e das restrições, podemos aplicar as condições KKT de primeira ordem para encontrar a solução ótima deste problema de programação não linear. Fazendo isso, estaremos resolvendo o problema de maximização de todos os jogadores simultaneamente, pois a função inversa da demanda, que representa o preço de mercado do produto considerado, conecta todos os jogadores e as interações entre eles. A Figura 4 mostra isso de forma esquemática.



**Figura 4:** Equilíbrio de mercado

Fonte: Elaborado pelo autor

O Lagrangeano da função objetivo é representado pela equação (4), a seguir.

$$\begin{aligned}
& \mathcal{L}(y_i^t, x_i^t, \lambda_i^t, \omega_i^t, \mu_i^t) \\
&= \sum_s p_s \left\{ \left[ \alpha - \beta \sum_{h \in T} \left( y_{i,s}^h + \sum_{-i} y_{-i,s}^h \right) \right] \sum_{h \in T} y_{i,s}^h - \sum_{h \in T} v_s^h y_{i,s}^h \right\} \\
& \quad - \sum_{h \in T} k^h x_i^h \\
& \quad + \sum_s \sum_{h \in T} \lambda_{i,s}^h (x_i^h - y_{i,s}^h) + \sum_s \sum_{h \in T} \omega_{i,s}^h y_{i,s}^h + \sum_{h \in T} \mu_i^h x_i^h
\end{aligned} \tag{4}$$

As condições de otimalidade, ou condições KKT, são as seguintes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial y_{i,s}^t} &= p_s \left[ \alpha - \beta \left( \sum_{h \in T} \left( 2y_{i,s}^h + \sum_{-i} y_{-i,s}^h \right) \right) - v_s^t \right] - \lambda_{i,s}^t + \omega_{i,s}^t \\ &= 0 \quad \forall i, t, s \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial x_i^t} = -k^t + \sum_{r \in S} \lambda_{i,r}^t + \mu_i^t = 0 \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$y_{i,s}^t \leq x_i^t \perp \lambda_{i,s}^t \geq 0, \quad \forall i, t, s \quad (7)$$

$$y_{i,s}^t \geq 0 \perp \omega_{i,s}^t \geq 0, \quad \forall i, t, s \quad (8)$$

$$x_i^t \geq 0 \perp \mu_i^t \geq 0, \quad \forall i, t \quad (9)$$

Resolvendo as equações de (5) a (9), percebemos que cada jogador está otimizando sua estratégia baseando-se nas estratégias que os outros jogadores adotaram. Neste modelo open loop adotado os jogadores tomam a decisão de quanto investir em cada tecnologia, representado pela variável  $x_i^t$ , simultaneamente com a decisão de quanto produzir em cada cenário, representado pela variável  $y_{i,s}^t$ . Como está sendo assumido que não há líderes de mercado presentes neste jogo, o modelo não é um MPEC nem um EPEC.

#### 4.2 CURVA INVERSA DE DEMANDA

A curva inversa de demanda na forma linear será utilizada para descrever a relação entre preço e produção de eteno e propeno. Isso significa que a quantidade demandada da commodity e o seu preço possuem uma relação inversa e proporcional. Para estima-la, serão utilizados a elasticidade do preço na demanda e um ponto de referência na curva.

De acordo com Gabriel et al. (2013), é comum utilizar a elasticidade do preço na demanda para analisar a capacidade de resposta da quantidade demandada de um determinado bem a uma alteração de preço, dado que a receita e as preferências dos consumidores permanecem inalteradas. Esse parâmetro adimensional, representado por  $\varepsilon$ , pode ser calculado da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\partial Q/Q}{\partial P/P} = \left( \frac{\partial Q}{\partial P} \right) \cdot \frac{P}{Q} \quad (10)$$

onde  $\partial Q/Q$  representa uma variação fracionária da quantidade demandada e  $\partial P/P$  representa uma variação fracionária do preço da commodity.

Valores de  $\varepsilon$  situados no intervalo  $(-1, 0)$  indicam demanda inelástica do bem, ou seja, a quantidade demandada não responde com muita intensidade a alterações de preços. Espera-se esse comportamento com as commodities eteno e propeno, pois são bens sem



substitutos no mercado e que continuarão a ser demandados, independente das oscilações de preço.

Derivando a equação geral da curva de demanda  $P = \alpha + \beta \cdot Q$ , temos:

$$\frac{\partial P}{\partial Q} = \beta \quad (11)$$

Assumindo um ponto de referência na curva de demanda  $(Q^{REF}, p^{REF})$  e substituindo (11) em (10), temos:

$$\varepsilon = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{p^{REF}}{Q^{REF}} \rightarrow \beta = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{p^{REF}}{Q^{REF}} \quad (12)$$

Substituindo (12) na equação geral da curva de demanda, temos:

$$p^{REF} = \alpha + \beta \cdot Q^{REF} \rightarrow \alpha = p^{REF} - \beta \cdot Q^{REF} \quad (13)$$

O cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda utilizou apenas três pontos neste trabalho, como é mostrado na seção 5. Sabe-se que para obter uma curva mais fidedigna seriam necessários mais pontos, porém houve limitação na obtenção de dados históricos que permitisse um tratamento mais amplo para este cálculo.

### 4.3 CONVEXIDADE DO MODELO

A resolução das equações e avaliação dos resultados requer uma análise prévia sobre a convexidade do modelo, uma vez que a função objetivo a ser maximizada é não-linear (quadrática na variável  $y_{i,s}^t$ ).

De acordo com Jensen e Bard (2003), em problemas de otimização não-lineares existem condições necessárias e suficientes a serem atendidas para caracterizar se a solução encontrada é a solução ótima do problema. As condições necessárias são as próprias condições KKT. As condições suficientes requerem que a função objetivo seja convexa, no caso de minimização de uma função, ou côncava, no caso de maximização de uma função. Além disso, as restrições devem ser funções convexas. Essas condições de convexidade e concavidade podem ser analisadas com o auxílio da matriz hessiana de cada função, pois funções côncavas possuem a matriz hessiana negativa semidefinida e funções convexas possuem a matriz hessiana positiva semidefinida.

Uma matriz é negativa semidefinida se, e somente se, todos os menores principais de ordem ímpar da matriz são menores ou iguais a zero e todos os menores principais de ordem par da matriz são maiores ou iguais a zero. É positiva semidefinida se, e somente se, todos os menores principais da matriz são maiores ou iguais a zero (BORTOLOSSI, 2002).

Como a matriz hessiana é composta pelas derivadas parciais de segunda ordem da função, temos que as equações (2) e (3) terão suas hessianas compostas apenas por zeros, pois tratam-se somente de equações lineares. Isso significa que os menores principais serão todos iguais a zero, ou seja, a matriz é positiva semidefinida e as restrições são convexas.

No caso da função objetivo, equação (1), temos a primeira derivada para cada jogador  $i$  representada pela equação (14).

$$\frac{\partial f(\dots)}{\partial y_{i,s}^t} = p_s \left[ \alpha - \beta \left( \sum_{h \in T} \left( 2y_{i,s}^h + \sum_{-i} y_{-i,s}^h \right) \right) - v_s^t \right] \quad (14)$$

Com o objetivo de exemplificar a construção da matriz Hessiana, vamos supor um conjunto de três cenários para os custos marginais de produção ( $s = 3$ ), e duas tecnologias possíveis para compor o portfólio de produção ( $t = 2$ ). A matriz fica então da seguinte forma:

$$H[f(\mathbf{x})] = \begin{bmatrix} -2p_{s1}\beta & 0 & 0 & -2p_{s1}\beta & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{s2}\beta & 0 & 0 & -2p_{s2}\beta & 0 \\ 0 & 0 & -2p_{s3}\beta & 0 & 0 & -2p_{s3}\beta \\ -2p_{s1}\beta & 0 & 0 & -2p_{s1}\beta & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{s2}\beta & 0 & 0 & -2p_{s2}\beta & 0 \\ 0 & 0 & -2p_{s3}\beta & 0 & 0 & -2p_{s3}\beta \end{bmatrix}$$

As derivadas parciais de segunda ordem da variável  $x_i^t$  são todas iguais a zero e, portanto, não têm influência no cálculo do determinante. Por esse motivo não foram inseridas na matriz Hessiana.

Calculando os menores principais, temos:

$$|H[f(\mathbf{x})]_1| = -2p_{s1}\beta$$

$$|H[f(\mathbf{x})]_2| = \begin{vmatrix} -2p_{s1}\beta & 0 \\ 0 & -2p_{s2}\beta \end{vmatrix} = 4p_{s1}p_{s2}\beta^2$$

$$|H[f(\mathbf{x})]_3| = \begin{vmatrix} -2p_{s1}\beta & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{s2}\beta & 0 \\ 0 & 0 & -2p_{s3}\beta \end{vmatrix} = -8p_{s1}p_{s2}p_{s3}\beta^3$$

$$|H[f(\mathbf{x})]_4| = \begin{vmatrix} -2p_{s1}\beta & 0 & 0 & -2p_{s1}\beta \\ 0 & -2p_{s2}\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2p_{s3}\beta & 0 \\ -2p_{s1}\beta & 0 & 0 & -2p_{s1}\beta \end{vmatrix} = 0$$

Os menores principais de ordem 4, 5 e 6 possuem pelo menos duas linhas iguais e, portanto, têm determinante igual a zero. Percebe-se que a matriz Hessiana é negativa semidefinida e a função  $f(\mathbf{x})$ , côncava. Com isso, concluímos que o problema a ser estudado é convexo e atende as condições necessárias e suficientes.

#### 4.4 PREMISSAS E LIMITAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DO MODELO

Para a apresentação e análise das simulações é importante deixar explícito as considerações que estão sendo adotadas.

O custo de investimento, representado pelo parâmetro  $k^t$ , não se refere a um projeto do tipo *greenfield*, ou seja, não considera a construção de uma facilidade industrial em local sem estrutura de utilidades industriais, áreas de armazenamento e área de processamento previamente construídas. Esse parâmetro representa o custo de projetos tipo *brownfield*, que são implementados em facilidades existentes, sendo, portanto, custos de ampliações das plantas atuais. Para simplificação das análises, está sendo considerado que as modificações representadas por esse parâmetro ocorrem em um ano. Essa simplificação se deve ao fato de que o projeto, aquisição de equipamentos e construção das modificações podem levar vários anos para serem concluídas. As unidades de custos e produção serão dólar e tonelada, respectivamente. Essas bases são as mais utilizadas nas análises e estudos do mercado petroquímico e a Braskem utiliza essa moeda para comercializar seus produtos.

A estrutura do modelo adotado considera que todas as empresas são capazes de produzir com todas as tecnologias escolhidas em cada jogo simulado. Por essa razão, as empresas estudadas neste trabalho serão a Braskem e o Comperj.

A produção de eteno e propeno utilizando gás natural não produz os demais hidrocarbonetos aromáticos ilustrados na Figura 2. Essa restrição não está incorporada no modelo. O impacto do mercado ficar sem esses produtos não está sendo levado em consideração neste estudo. Além disso, os mercados de eteno e propeno são analisados de forma independente neste trabalho. Não é considerada a influência que a produção de um petroquímico tem na produção do outro.

## 5. RESULTADOS

Este capítulo traz os resultados das simulações realizadas. Na seção 5.1 são apresentadas as premissas e dados utilizados para o cálculo dos cenários adotados e para o cálculo do parâmetro de custo de investimento ( $k^t$ ). A seção 5.2 trata da análise dos resultados obtidos para o eteno e a seção 5.3, dos resultados referentes ao propeno.

### 5.1 CUSTO DE INVESTIMENTO E CENÁRIOS ADOTADOS

O conjunto  $T = \{t_1, t_2, t_3\}$  que abrange as tecnologias utilizadas nas simulações será o mesmo para o caso do eteno e do propeno, pois todas produzem ambos os produtos. Dessa forma, temos que as tecnologias são:

- $t_1$ : cracker de gás natural;
- $t_2$ : cracker de carga líquida, que processa nafta nos fornos;
- $t_3$ : cracker de carga líquida, que processa NGL nos fornos;

A matéria-prima denominada NGL é composta de hidrocarbonetos e possui alto teor de etano e propano em sua composição. Ela é extraída durante o processo de produção de gás natural e pode ser utilizada em plantas petroquímicas para produção de eteno e propeno.

Uma vez caracterizado o conjunto  $T$ , podemos definir os custos de investimento associados a cada tecnologia, designados por  $k^{t1}$ ,  $k^{t2}$  e  $k^{t3}$ , a saber:

- $k^{t1}$ : US\$ 38,00/ton/ano;
- $k^{t2}$ : US\$ 5,00/ton/ano;
- $k^{t3}$ : US\$ 42,00/ton/ano;

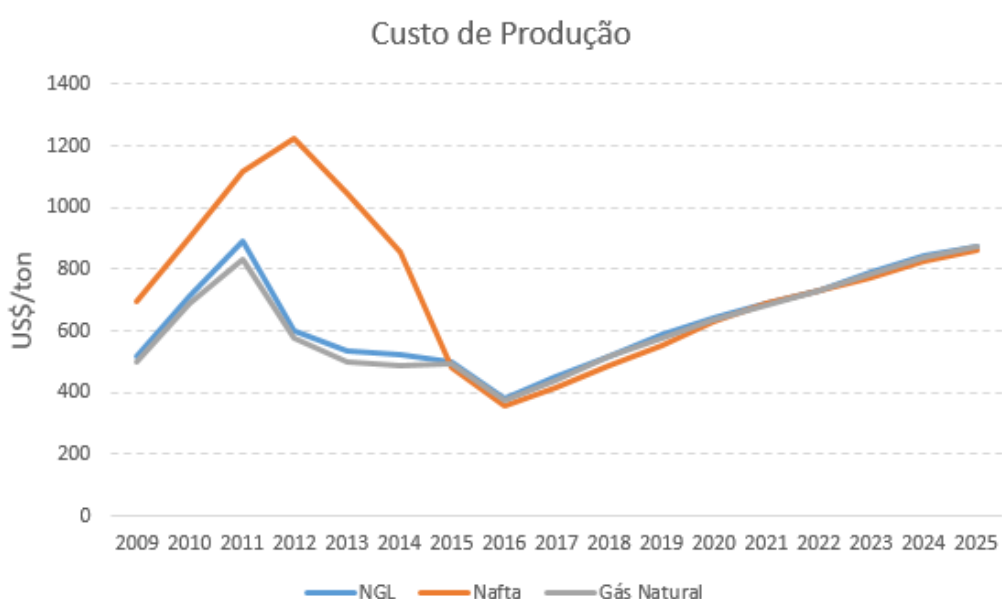
Os crackers existentes no Brasil foram projetados para processamento de nafta em seus fornos, com exceção do cracker localizado em Duque de Caxias/RJ, conforme mostrado anteriormente na Figura 3. O custo representado por  $k^{t1}$  considera o custo das intervenções necessárias nas plantas existentes para que elas possam processar gás natural. Isso implica em adequações na área de tancagem, novos dutos de transferência e novos equipamentos para troca térmica. Baseando-se em Conforto e Spranger (2008), estima-se um custo de US\$ 49.000.000,00 para realizar tais adequações, o que permitiria uma produção anual de 1.300.000 toneladas de eteno. Esse custo de investimento é estimado com base em índices aplicados sobre o valor total de equipamentos a serem adquiridos para esta modificação, e o custo dos equipamentos foi estimado com base em

projetos já realizados na Braskem. Essa metodologia também foi adotada para estimar  $k^{t2}$  e  $k^{t3}$ .

O custo representado por  $k^{t2}$  considera desengargalamentos de baixa complexidade que poderiam ser realizadas nos crackers existentes para obter pequenos incrementos de produção. Este custo é menor que os demais pois as facilidades existentes já processam nafta e não possuem capacidade para expansão sem que seja feito um alto investimento.

O custo representado por  $k^{t3}$  considera o custo das intervenções necessárias nas plantas existentes para que elas possam processar NGL, incluindo adequações em torres de separação e novos trocadores de calor. Baseando-se em Conforto e Spranger (2008), estima-se um custo de US\$ 55.000.000,00 para realizar tais adequações, o que permitiria uma produção anual de 1.300.000 toneladas de eteno.

Para a geração dos cenários, levou-se em consideração os custos históricos de produção de eteno e propeno de cada tecnologia e a projeção dos custos até 2025, conforme mostra a Figura 5.



**Figura 5:** Custos de produção

Fonte: IHS Markit<sup>2</sup>, 2016

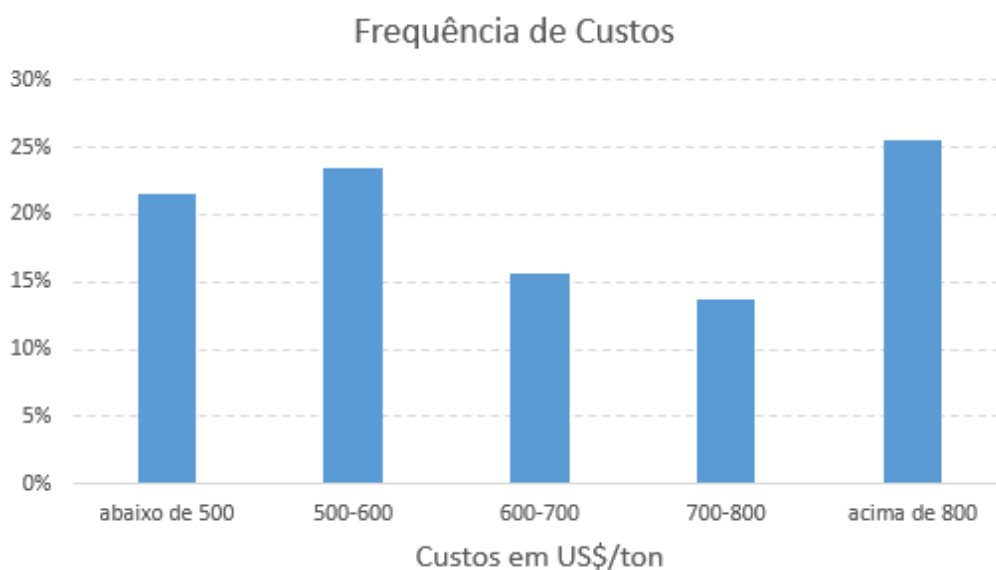
Percebe-se que antes do ano de 2014, havia uma diferença entre o custo de produção das tecnologias baseadas em craqueamento de gás natural e NGL em relação ao

<sup>2</sup> IHS Markit é uma empresa de consultoria com sede em Londres, especializada na análise de diversos setores da indústria no mundo.

craqueamento de nafta. A partir de 2014 o preço do barril de petróleo começou a sofrer uma queda de preço, que levou inevitavelmente à queda do preço da nafta e à diminuição do custo de produção de eteno e propeno baseado nesta tecnologia. As projeções de custo de produção a partir de 2016 levam em consideração que o preço do barril de petróleo não voltará a ter uma diferença acentuada em relação ao gás natural.

Conforme Bain & Company (2014), a oferta de gás natural no Brasil não é suficiente para atender à demanda da indústria petroquímica e, dessa forma, o acesso a esta matéria prima e à NGL deve ser feita via importação. O frete e os custos de importação destes insumos foram agregados no custo de produção e como pode ser visto na Figura 5, essa consideração leva a uma equiparação dos custos de produção entre as diferentes tecnologias.

A partir dos dados da Figura 5, pode-se construir um gráfico de frequência de ocorrência de custos de produção e estabelecer as probabilidades de cada um. A Figura 6 mostra esse gráfico.



**Figura 6:** Frequência dos custos de produção

Fonte: Elaborado pelo autor

O conjunto de cenários  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$  é caracterizado então da seguinte forma:

- $s_1$ : probabilidade de 22%. Considera a probabilidade dos custos de produção ficarem abaixo de US\$ 500/ton de eteno/propeno produzido. O

custo de cada tecnologia neste cenário é o custo médio histórico desta faixa de custos;

- $s_2$ : probabilidade de 24%. Considera a probabilidade dos custos de produção ficarem entre US\$ 500/ton e US\$ 600/ton de eteno/propeno produzido. O custo de cada tecnologia neste cenário é o custo médio histórico desta faixa de custos;
- $s_3$ : probabilidade de 16%. Considera a probabilidade dos custos de produção ficarem entre US\$ 600/ton e US\$ 700/ton de eteno/propeno produzido. O custo de cada tecnologia neste cenário é o custo médio histórico desta faixa de custos;
- $s_4$ : probabilidade de 14%. Considera a probabilidade dos custos de produção ficarem entre US\$ 700/ton e US\$ 800/ton de eteno/propeno produzido. O custo de cada tecnologia neste cenário é o custo médio histórico desta faixa de custos;
- $s_5$ : probabilidade de 25%. Considera a probabilidade dos custos de produção ficarem acima de US\$ 800/ton de eteno/propeno produzido. O custo de cada tecnologia neste cenário é o custo médio histórico desta faixa de custos;

Os custos de produção para cada tecnologia em cada cenário estão mostrados na tabela 1 e valem para produção de eteno e propeno. Os valores apresentados nesta tabela mostram o custo médio de cada tecnologia, conforme o intervalo de custos estabelecido para cada cenário, e levam em conta os custos passados e a tendência para os próximos anos, conforme mostrado na Figura 5.

**Tabela 1:** Custos de produção em US\$/ton de cada tecnologia em cada cenário

	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$
$t_1$	420	543	671	758	848
$t_2$	458	555	671	752	978
$t_3$	415	541	668	745	870

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados das simulações para o eteno e propeno, considerando a situação de monopólio de mercado e um duopólio hipotético. As soluções encontradas representam um equilíbrio do jogo, porém não se pode garantir que este

equilíbrio é único. Uma das condições necessárias para garantir unicidade da solução seria ter uma função estritamente convexa a ser maximizada no modelo. Essa condição não é atendida no modelo considerado neste trabalho, como foi mostrado na seção 4.3.

## 5.2 ETENO

### 5.2.1 MONOPÓLIO DE MERCADO

Nesta seção serão mostrados os resultados das simulações considerando apenas um jogador ( $i = 1$ ), representando a situação atual do mercado nacional monopolista de produção de eteno.

A primeira etapa necessária para iniciar as simulações é o cálculo dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da curva inversa de demanda. Foram utilizadas as equações (12) e (13) para este fim. Os dados referentes à produção anual de eteno e capacidade instalada foram obtidos em ABIQUIM, 2014b, e os preços médios anuais foram consultados na base de dados da IHS Markit. Esses dados são utilizados no cálculo da elasticidade do preço na demanda através da equação (10), para então proceder com o cálculo dos parâmetros da curva. Os resultados são mostrados na tabela 2.

**Tabela 2:** Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o eteno em um monopólio

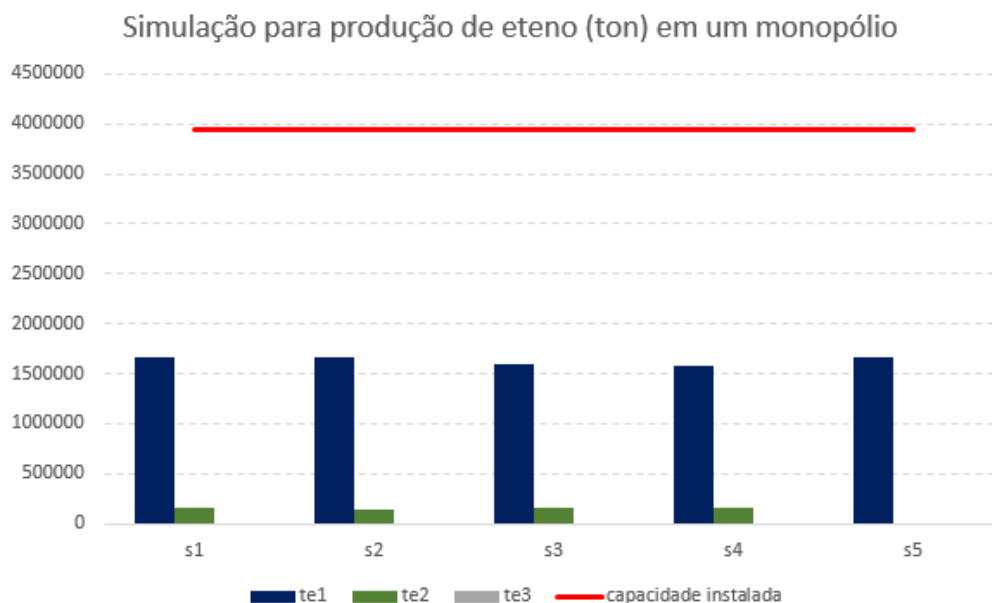
Ano	Produção de eteno (ton)	Preço médio do eteno (US\$/ton)	$\varepsilon$	$\alpha$	$\beta$
2010	3.276.626,60	1.100,01	-	-	-
2011	3.119.158,40	1.284,18	-0,287	5758	-0,0014
2012	3.171.464,00	1.152,37	-0,163	8205	-0,0022
2013	3.372.826,00	1.017,00	-0,540	2898	-0,0006

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em IHS MARKIT, 2016, e ABIQUIM, 2014b

Os valores de  $\varepsilon$  estão dentro do intervalo  $(-1,0)$ , mostrando que a demanda é inelástica para este produto. Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  adotados nas simulações é o valor médio entre os representados na tabela 1, ou seja,  $\alpha = 5620$  e  $\beta = -0,0014$ .

Os resultados podem ser visualizados na Figura 7 e na tabela 3.





**Figura 7:** Produção de eteno para o caso de mercado monopolista

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 3:** Valores calculados de  $y_s^t$  e  $x^t$ , em ton, para o eteno em um mercado monopolista

	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$s_1$	1.672.000	164.818	0
$s_2$	1.672.000	136.929	0
$s_3$	1.602.680	164.818	0
$s_4$	1.571.610	164.818	0
$s_5$	1.672.000	0	0
$x^t$	1.672.000	164.818	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam um investimento na produção de eteno via craqueamento de gás natural ( $t_1$ ) em todos os cenários, ou seja, a conversão das unidades existentes para permitir o processamento desta matéria prima nos fornos.

Analisando o custo esperado ( $\sum_s p_s v_s^t + k^t$ ) de cada tecnologia, poderíamos pensar intuitivamente que o investimento deveria ser feito somente na tecnologia de menor custo ( $t_1$ ), uma vez que:

$$\begin{array}{ccccc} \text{custo esperado de } t_1 & & \text{custo esperado de } t_3 & & \text{custo esperado de } t_2 \\ 686 \text{ US\$/ton} & < & 692 \text{ US\$/ton} & < & 696 \text{ US\$/ton} \end{array}$$

Observa-se, porém, uma diversificação da produção de eteno nos cenários  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$ , onde a tecnologia  $t_2$  também é selecionada. A exceção é feita no cenário  $s_5$ , em que apenas  $t_1$  é selecionada. E em nenhum dos cenários  $t_3$  foi selecionada para composição do portfólio de produção. Verifica-se que nos cenários  $s_1$ ,  $s_2$ , e  $s_5$  a empresa produz na capacidade máxima em  $t_1$ , e nos cenários  $s_1$ ,  $s_3$  e  $s_4$  a empresa produz na capacidade máxima em  $t_2$ .

Nos cenários  $s_3$  e  $s_4$ , a produção de eteno por  $t_1$  é a diferença entre o limite de Cournot para esta tecnologia e a produção calculada para  $t_2$ . Conforme Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014), o limite de Cournot é um *upper bound* para a variável  $y_s^t$  e pode ser calculado com o auxílio da equação 15:

$$y_s^t \leq \frac{\alpha - v_s^t}{(n + 1)\beta} \quad (15)$$

onde  $n$  é o número de empresas do jogo.

Utilizando a equação (15) para os cenários  $s_3$  e  $s_4$ , temos que os limites de Cournot são, respectivamente, 1.767.500 e 1.736.429. Subtraindo a produção de  $t_2$  (164.818), chegamos aos valores indicados na tabela 3.

Os resultados mostram uma capacidade total de produção ( $x_i^t$ ) e níveis de produção ( $y_{i,s}^t$ ) abaixo do que é praticado no mercado petroquímico. No caso monopolista, espera-se que o preço aumente para otimizar o lucro com a consequente diminuição da quantidade produzida. Essa premissa não é necessariamente correta para o mercado de eteno e propeno. Os preços desses produtos sofrem forte influência do mercado internacional e a Braskem, mesmo sendo um monopólio no Brasil, não tem poder suficiente para regular preços livremente. Ela tem comportamento mais próximo de uma tomadora de preço e por isso tem que manter sua escala de produção sempre no máximo.

### 5.2.2 DUOPÓLIO DE PRODUÇÃO

Com a entrada em operação do Comperj, podemos supor um duopólio hipotético ( $i = 2$ ) para a produção de eteno e propeno no Brasil. A produção estimada de eteno é de 1.300.00 ton/ano, que se somariam à capacidade instalada atual. Para o cálculo dos

parâmetros da curva inversa de demanda neste caso, serão utilizados os mesmos preços indicados na tabela 2. A tabela 4 mostra os valores adotados e o cálculo de  $\alpha$  e  $\beta$  para cada ano.

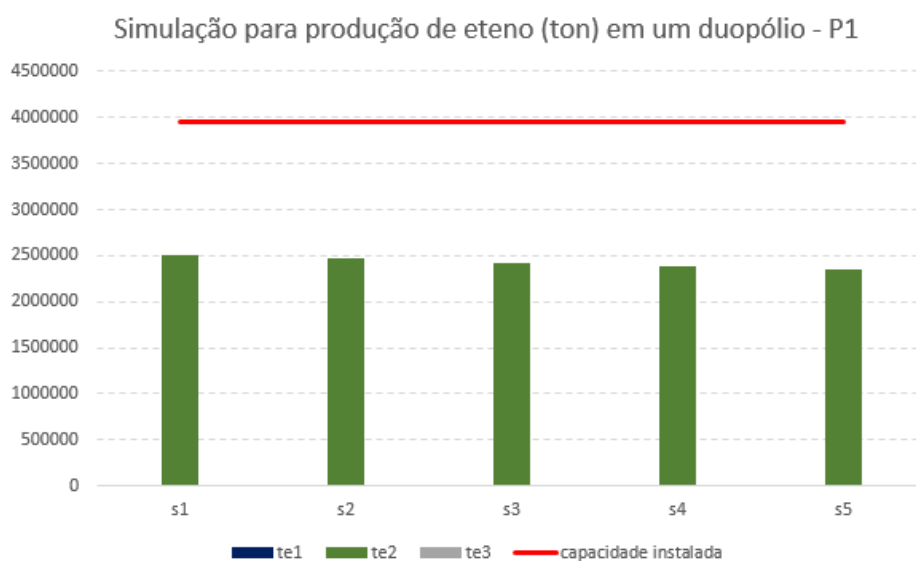
**Tabela 4:** Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o eteno em um duopólio

Ano	Produção de eteno (ton)	Preço médio do eteno (US\$/ton)	$\varepsilon$	$\alpha$	$\beta$
2010	4.576.626,60	1.100,01	-	-	-
2011	4.419.158,40	1.284,18	-0,206	7533	-0,0014
2012	4.471.464,00	1.152,37	-0,115	11146	-0,0022
2013	4.672.826,00	1.017,00	-0,383	3670	-0,0006

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores médios são:  $\alpha = 7450$  e  $\beta = -0,0014$ . É importante ressaltar que no caso de duopólio, adota-se a premissa que as empresas dividem a mesma estrutura de custos de produção. Caso contrário, elas teriam outros incentivos para investir em determinada tecnologia, o que descaracterizaria o jogo.

Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 8 e 9 e na tabela 5. Os jogadores do duopólio são designados por P1, representando as plantas existentes, e P2, representando a planta do Comperj.



**Figura 8:** Produção de eteno de P1 em um duopólio

Fonte: Elaborado pelo autor



**Figura 9:** Produção de eteno de P2 em um duopólio

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 5:** Valores calculados de  $y_{i,s}^t$  e  $x_i^t$ , em ton, para o eteno em um duopólio

	P1			P2		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$s_1$	0	2.502.600	0	0	1.251.300	0
$s_2$	0	2.466.790	0	0	1.233.390	0
$s_3$	0	2.421.070	0	0	1.210.540	0
$s_4$	0	2.390.000	0	0	1.195.000	0
$s_5$	0	2.357.860	0	0	1.178.930	0
$x_i^t$	0	2.502.600	0	0	1.251.300	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se neste caso a dominância de  $t_2$  na composição do portfólio, mesmo essa tecnologia apresentando o maior custo esperado de produção. O que pode explicar esse resultado é o baixo valor de investimento para esta tecnologia, uma vez que está sendo considerado o custo de expansão de plantas existentes. Nota-se que, para os dois jogadores, a produção total em todos os cenários fica abaixo da capacidade instalada. A diferença, porém, é maior para P1 do que para P2.

### 5.3 PROPENO

#### 5.3.1 MONOPÓLIO DE MERCADO

Nesta seção serão mostrados os resultados das simulações considerando apenas um jogador ( $i = 1$ ), representando a situação atual do mercado nacional monopolista de produção de propeno.

Os custos de produção utilizados são os representados na tabela 1. Vale salientar que plantas baseadas no processo de produção steam cracking são projetadas visando a produção de eteno, e não propeno (BOULAMANTI & MOYA, 2016). No Brasil a Petrobras também produz propeno, através do processo denominado FCC catalítico. Este propeno, porém, não possui as mesmas características daquele produzido nos *crackers* petroquímicos, apresentando um grau de pureza inferior e também um custo de produção inferior. Dessa forma, optou-se por não considerar a parcela de propeno produzido pela Petrobras nas simulações.

Para o cálculo dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da curva inversa de demanda foram utilizados os dados referentes à produção anual de propeno e capacidade instalada obtidos em ABIQUIM, 2014b, e os preços médios anuais foram consultados na base de dados da IHS Markit. Os resultados são mostrados na tabela 6.

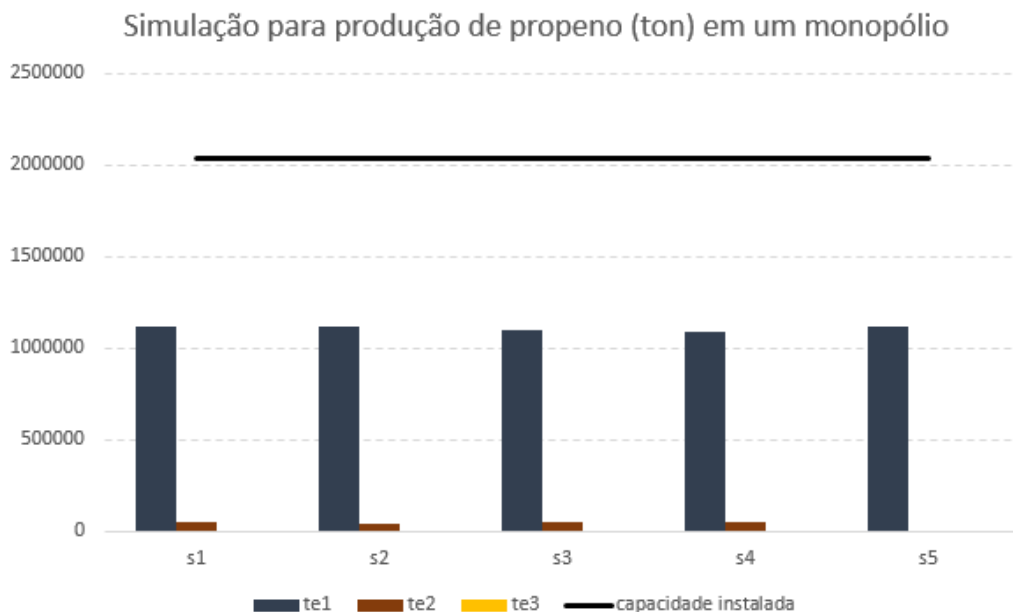
**Tabela 6:** Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o propeno em um monopólio

Ano	Produção de eteno (ton)	Preço médio do propeno (US\$/ton)	$\varepsilon$	$\alpha$	$\beta$
2010	2.191.597,20	1.313,57	-	-	-
2011	2.200.402,10	1.298,88	-0,359	4914	-0,002
2012	2.150.964,00	1.516,70	-0,134	12837	-0,005
2013	2.128.125,00	1.679,84	-0,098	18697	-0,008

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em IHS MARKIT, 2016, e ABIQUIM, 2014b

Os valores médios são  $\alpha = 12150$  e  $\beta = -0,005$ . Observa-se que os valores de  $\varepsilon$  estão dentro do intervalo  $(-1,0)$ , mostrando que a demanda também é inelástica para este produto.

Os resultados podem ser visualizados na Figura 10 e na tabela 7.



**Figura 10:** Produção de propeno para o caso de mercado monopolista

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 7:** Valores calculados de  $y_s^t$  e  $x^t$ , em ton, para o propeno em um mercado monopolista

	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$s_1$	1.121.160	46.149	0
$s_2$	1.121.160	38.340	0
$s_3$	1.101.750	46.149	0
$s_4$	1.093.050	46.149	0
$s_5$	1.121.160	0	0
$x^t$	1.121.160	46.149	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como no caso do eteno, os resultados indicam um investimento na produção de propeno via craqueamento de gás natural ( $t_1$ ) em todos os cenários, ou seja, a conversão das unidades existentes para permitir o processamento desta matéria prima nos fornos.

Observa-se diversificação da produção de propeno semelhante ao caso do eteno. A tecnologia  $t_3$  não se mostrou viável em nenhum cenário e nos cenários  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$ , a tecnologia  $t_2$  também é selecionada. A exceção é feita no cenário  $s_5$ , em que apenas  $t_1$

é selecionada. Verifica-se que nos cenários  $s_1$ ,  $s_2$ , e  $s_5$  a empresa produz na capacidade máxima em  $t_1$ , e nos cenários  $s_1$ ,  $s_3$  e  $s_4$  a empresa produz na capacidade máxima em  $t_2$ .

Nos cenários  $s_3$  e  $s_4$ , a produção de eteno por  $t_1$  é a diferença entre o limite de Cournot para esta tecnologia e a produção calculada para  $t_2$ . Utilizando a equação (15) para os cenários  $s_3$  e  $s_4$ , temos que os limites de Cournot são, respectivamente, 1.147.900 e 1.139.200. Subtraindo a produção de  $t_2$  (46.149), chegamos aos valores indicados na tabela 7.

Aqui os resultados também mostram uma capacidade total de produção ( $x_i^t$ ) e níveis de produção ( $y_{i,s}^t$ ) abaixo do que é praticado no mercado petroquímico, indicando a tendência do comportamento da Braskem mais próximo de uma tomadora de preço do que uma empresa monopolista capaz de regular os preços.

Os resultados observados nas simulações de monopólio para o eteno e o propeno indicam a migração de tecnologia de produção de nafta para gás natural. Esse é um movimento que está sendo adotado pela indústria petroquímica no Brasil, conforme pode-se verificar em Exame, 2016.

### 5.3.2 DUOPÓLIO DE PRODUÇÃO

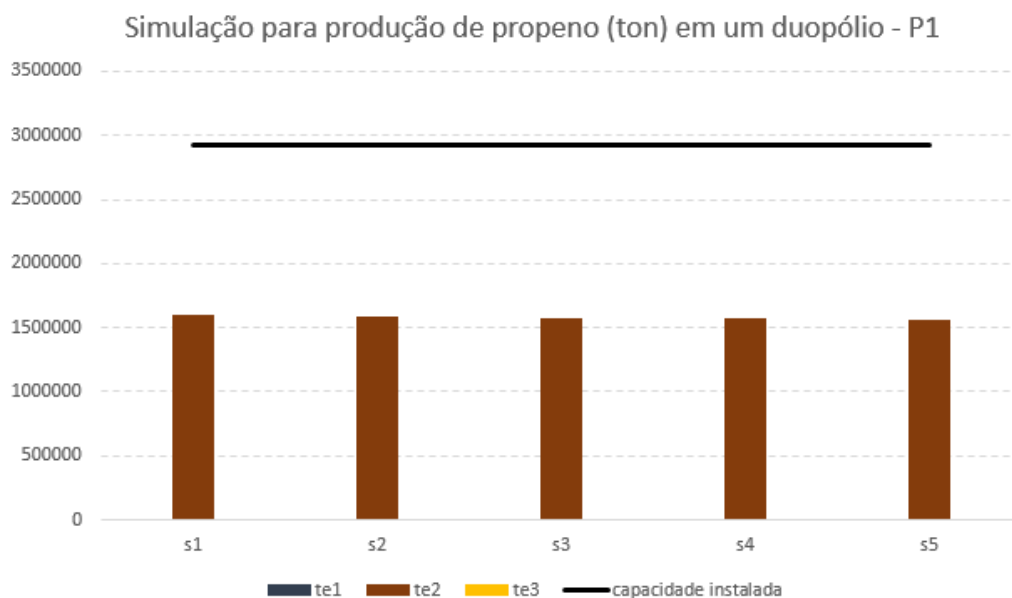
Para o duopólio hipotético ( $i = 2$ ) de produção de propeno, a capacidade adicional é de 880.000 ton/ano, que se somariam à capacidade instalada atual. Para o cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda neste caso, serão utilizados os mesmos preços indicados na tabela 6. A tabela 8 mostra os valores adotados e o cálculo de  $\alpha$  e  $\beta$  para cada ano.

**Tabela 8:** Cálculo dos parâmetros da curva inversa de demanda para o propeno em um duopólio

Ano	Produção de eteno (ton)	Preço médio do propeno (US\$/ton)	$\varepsilon$	$\alpha$	$\beta$
2010	3.071.597,20	1.313,57	-	-	-
2011	3.080.402,10	1.298,88	-0,256	6366	-0,002
2012	3.030.964,00	1.516,70	-0,095	17365	-0,005
2013	3.008.125,00	1.679,84	-0,070	25659	-0,008

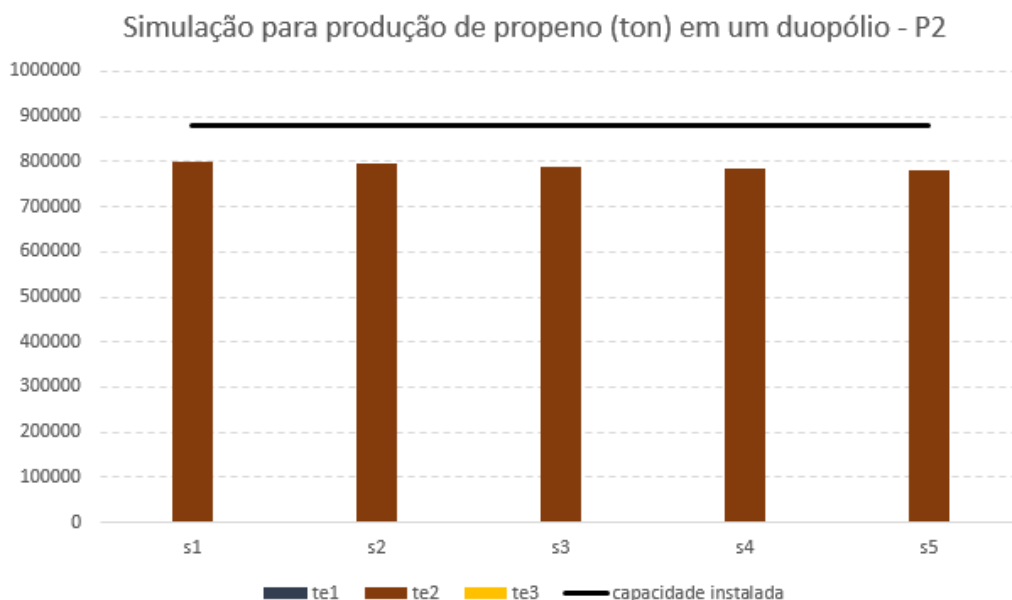
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em IHS MARKIT, 2016, e ABIQUIM, 2014b

Os valores médios são:  $\alpha = 16463$  e  $\beta = -0,005$ . Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 11 e 12 e na tabela 9. Os jogadores do duopólio são designados por P1, representando as plantas existentes, e P2, representando a planta do Comperj.



**Figura 11:** Produção de propeno de P1 em um duopólio

Fonte: Elaborado pelo autor



**Figura 12:** Produção de propeno de P2 em um duopólio

Fonte: Elaborado pelo autor



**Tabela 9:** Valores calculados de  $y_{i,s}^t$  e  $x_i^t$ , em ton, para o propeno em um duopólio

	P1			P2		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$s_1$	0	1.602.030	0	0	801.014	0
$s_2$	0	1.592.000	0	0	796.000	0
$s_3$	0	1.579.200	0	0	789.600	0
$s_4$	0	1.570.500	0	0	785.250	0
$s_5$	0	1.561.500	0	0	780.750	0
$x_i^t$	0	1.602.030	0	0	801.014	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se também neste caso a dominância de  $t_2$  na composição do portfólio, e que a produção total em todos os cenários fica abaixo da capacidade instalada. A diferença também se mantém maior para P1 do que para P2.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aplicações de modelos de equilíbrio para análise de mercados são amplamente encontradas para o setor de energia, existindo na literatura diversas classes de problemas utilizadas para sua caracterização e análise. A aplicação de um modelo de complementaridade mista para o mercado petroquímico proposta neste trabalho, porém, é uma tentativa nova e não explorada em trabalhos anteriores.

O modelo proposto por Filomena, Campos-Náñez e Duffey (2014) utilizado apresenta em sua formulação o custo de produção como parâmetro estocástico, sendo definido através de cenários probabilísticos. A definição dos cenários e valores utilizados para este parâmetro podem ser encontrados na seção 5.1, e foram baseados em custos históricos e previsões futuras amparadas em estudos da consultoria IHS Markit. Cabe ressaltar que essas previsões são passíveis de revisão de tempos em tempos. Dessa forma, os cenários utilizados neste trabalho refletem a percepção, por parte desta consultoria, do quadro atual de disponibilidade e comercialização dos principais insumos petroquímicos.

Os resultados das simulações realizadas para os mercados de eteno e propeno para o caso monopolista indicam um nível de produção aquém da capacidade instalada atual. Levando em consideração que o modelo está baseado na competição de Cournot, entende-se que a empresa monopolista deveria ajustar sua produção para obter preços mais altos e, conseqüentemente, maiores receitas. Essa lógica não se aplica necessariamente ao mercado petroquímico nacional, pois a Braskem possui limitações para alterar o preço de venda de eteno e propeno, uma vez que o preço destas commodities é balizado por referências internacionais, fazendo com seu comportamento se aproxime de um *price taker* independente do custo de produção e matéria prima utilizada.

Foi observada diversificação de tecnologia de produção de eteno e propeno no caso monopolista, mostrando que no equilíbrio a tecnologia de menor custo esperado não é necessariamente a tecnologia dominante de produção. Este resultado, mesmo que não seja intuitivo à primeira vista, indica a tendência de aumento da produção de eteno e propeno baseada no processamento de gás natural e que vem sendo adotada no mercado petroquímico. Conforme informado em Exame (2016), a Braskem está investindo na conversão de parte de seus fornos, que atualmente processam nafta, para permitir o processamento de gás natural.

Além disso, o movimento de diversificação de tecnologias para produção de eteno e propeno é uma realidade para o mercado petroquímico, uma vez que o custo das matérias-primas influencia diretamente na competitividade deste negócio. Os ativos

devem estar preparados para processar a matéria-prima que se apresenta mais atrativa no momento e neste sentido, esse trabalho mostra uma alternativa de como diversificar a produção de eteno e propeno.

Nas simulações para duopólios de eteno e propeno também foi observado nível de produção calculado abaixo da capacidade instalada, explicado pelos mesmos argumentos do caso monopolista. Não se observou, porém, diversificação de tecnologias, mantendo as plantas com produção baseada em processamento de nafta.

## 6.2 LIMITAÇÕES

A pesquisa limitou-se a aplicação do modelo de complementaridade mista para dois produtos do setor petroquímico, não considerando o impacto dos demais produtos na dinâmica do mercado, e nem a influência do mercado externo, o que pode mudar muito a análise.

Outro ponto importante é um estudo mais estruturado dos preços das matérias-primas, uma vez que esse parâmetro representa a fonte de incerteza do modelo adotado. Essa limitação ocorreu devido ao fato desta análise não ser o objetivo principal deste estudo.

A comparação dos resultados com outros modelos assimétricos não foi realizada. Isso ampliaria a base de comparação e permitiria enxergar a aplicabilidade destes modelos para o mercado petroquímico.

## 6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Mantendo a linha das limitações da pesquisa, discutidas acima, os estudos futuros poderiam incorporar ao modelo uma restrição de produção mínima de eteno e propeno baseado no craqueamento de nafta, garantindo a manutenção dos subprodutos do craqueamento de nafta no mercado. Isso alteraria as condições KKT do modelo utilizado neste trabalho, porém não alteraria a convexidade.

No modelo de Cournot, o preço das commodities estudadas são calculados em função das quantidades produzidas. Se ao invés disso o preço fosse inserido como um parâmetro do modelo, estaríamos simulando um mercado de concorrência perfeita onde os agentes não têm, por si só, influência sobre o preço de mercado. Isso eliminaria a não linearidade do problema, porém as condições de complementaridade ainda deveriam ser atendidas para a resolução do equilíbrio. Essa reformulação abre a possibilidade para uma nova verificação do mercado de eteno e propeno sob a ótica de modelos de equilíbrio.

Outro modelo que poderia ser utilizado é o de Stackelberg, o que alteraria a estrutura informacional inserindo uma empresa líder, com poder de determinar o preço e a produção do mercado. Isso levaria a um problema de complementaridade mista com restrições de equilíbrio que, apesar de demandar uma capacidade maior de processamento computacional, complementa e enriquece a análise baseada em Cournot.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. O Desempenho da Indústria Química Brasileira em 2014, 2014. Disponível em <[www.abiquim.org.br/pdf/livreto-de-dados-2014-paginas.pdf](http://www.abiquim.org.br/pdf/livreto-de-dados-2014-paginas.pdf)> Acesso em: 20 de março de 2015.
- [2] ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. Anuário da Indústria Química Brasileira – 2014. São Paulo: ABIQUIM, 2015.
- [3] ANDERSON, P. S., ENGERS, M. Stackelberg versus Cournot Oligopoly Equilibrium. *International Journal of Industrial Organization*. Vol 10, pp. 127-135, 1992.
- [4] BAIN & COMPANY. Potencial de diversificação da indústria química brasileira: Relatório 6 – Matéria-prima petroquímica. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep\\_fep/chamada\\_publica\\_FEPprospec0311\\_Quimicos\\_Petroquimica.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Petroquimica.pdf)> Acesso em: 15 de março de 2015.
- [5] BASTOS, V. D. Desafios da Petroquímica Brasileira no Cenário Global. *BNDES Setorial*. Vol 29, pp. 321-358, 2009.
- [6] BILLUPS, S. C., MURTY, K. G. Complementarity Problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol 124, pp. 303-318, 2000.
- [7] BORTOLOSSI, H. J. Cálculo Diferencial a Várias Variáveis: Uma Introdução à Teoria da Otimização. Rio de Janeiro: Editora PUC-RIO, 2002.
- [8] BOULAMANTI, A., MOYA, J.A., Production Costs of the Chemical Industry in the EU and Other Countries: Ammonia, Methanol and Light Olefins. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.021i>.
- [9] CHOI, S. T., A Complementarity Approach to Solving Computable General Equilibrium Models. *Computational Economics*, pp. 1-19, 2014.
- [10] CONFORTO, S., SPRANGER, M., Estimativa de Custos de Investimentos para Empreendimentos Industriais. Rio de Janeiro: Taba Cultural, 2008.

- [11] COTTLE, R. W., et al. *The Linear Complementarity Problem*. Boston: Academic Press, 1992.
- [12] DIRKSE, S. P., FERRIS, M. C. The PATH solver: a non-monotone stabilization scheme for mixed complementarity problems. *Optimization Methods and Software*. Vol 5, pp. 123-156, 1995.
- [13] DIXIT, A., SKEATH, S. *Games of Strategy*. New York: W. W. Norton & Company, 2004.
- [14] EHRENMANN, A., SMEERS, Y. Generation Capacity Expansion in a Risky Environment: A Stochastic Equilibrium Analysis. *Operations Research*. Vol 59, n° 6, pp. 1332–1346, 2011.
- [15] EHRENMANN, A., SMEERS, Y. Risk adjusted discounted cash flows in capacity expansion models. *Mathematical Programming*. Vol 140, n° 2, pp. 267–293, 2013.
- [16] EXAME. Braskem usa gás de xisto para depender menos da Petrobras. São Paulo, março de 2016. Disponível em <<http://exame.abril.com.br/negocios/braskem-usa-gas-de-xisto-para-depender-menos-da-petrobras/>> Acesso em 17 de agosto de 2016.
- [17] FERRIS, M. C., PANG, J. S. *Engineering and Economic Applications of Complementarity Problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Vol 39, n° 4, pp. 669-713, 1997.
- [18] FILOMENA, T. P., CAMPOS-NÁÑEZ, E., DUFFEY, M. R. Technology selection and capacity investment under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. Vol 232, pp. 125-136, 2014.
- [19] GABRIEL, S.A., CONEJO, A.J., FULLER, J.D., HOBBS, B.F., RUIZ, C. *Complementarity Modeling in Energy Markets*. New York: Springer-Verlag, 2013.
- [20] GABRIEL, S. A., KIET, S., ZHUANG, J. A Mixed Complementarity-Based Equilibrium Model of Natural Gas Markets. *Operations Research*, Vol 53, n° 5, pp. 799-818, 2005.
- [21] GARCIA, A., SHEN, Z. Equilibrium Capacity Expansion Under Stochastic Demand Growth. *Operations Research*. Vol 58, n° 1, pp. 30–42, 2010.

- [22] GOMES, G. L. Análise da Integração Refino-Petroquímica – Oportunidades Econômicas, Estratégicas e Ambientais. 2011. 284 f. Dissertação (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [23] GOMES, G., DVORSAK, P., HEIL, T. Indústria Petroquímica Brasileira: Situação Atual e Perspectivas. BNDES Setorial. Vol 21, pp. 75-104, 2005. Disponível em <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2105.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2105.pdf)> Acesso em: 20 de março de 2015.
- [24] GOYAL, M., NETESSINE, S. Strategic Technology Choice and Capacity Investment Under Demand Uncertainty. *Management Science*. Vol 53, nº 2, pp. 192–207, 2007.
- [25] HARKER, P. T., PANG, J. S., Finite-dimensional Variational Inequality and Nonlinear Complementarity Problems: A Survey. *Mathematical Programming*, Vol 48, pp. 161-220, 1990.
- [26] HOBBS, B. F., RIJKERS, F. A. M. Strategic Generation with Conjectured Transmission Price Responses in a Mixed Transmission Pricing System. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 19, nº 2, pp. 707-717, 2004.
- [27] HUPPMANN, D., EGGING, R. Market power, fuel substitution and infrastructure – A large-scale equilibrium model of global energy markets. *Energy*, Vol 75, pp. 483-500, 2014.
- [28] IHS MARKIT. Chemical Competitive Cost and Margin Analytics – Ethylene, 2015. Disponível em <<http://connect.ihs.com>> Acesso em: 20 de julho de 2016.
- [29] JENSEN, P. A., BARD, J. F. *Operations Research Models and Methods*. John Wiley & Sons, 2003.
- [30] KREPS, D., SCHEINKMAN, J. Quantity Precommitment and Bertrand Competition Yield Cournot Outcomes. *Bell Journal of Economics*. Vol 14, pp. 326-337, 1983.

- [31] LEMKE, C. E., HOWSON, J. T. Equilibrium points of a bimatrix game. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol 12, nº 2, pp. 413-423, 1964.
- [32] MURPHY, F. H., SMEERS, Y. Generation Capacity Expansion in Imperfect Competitive Restructured Electricity Markets. *Operations Research*. Vol 53, nº 4, pp. 646–661, 2005.
- [33] PEREIRA, R. A. Análise dos Principais Processos Críticos para Produção de Insumos Petroquímicos e sua Evolução Tecnológica. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [34] PERRONE, O. V. A Indústria Petroquímica no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- [35] PINEAU, P. O., MURTO, P. An Oligopolistic Investment Model of the Finnish Electricity Market. *Annals of Operations Research*. Vol 121, pp. 123–148, 2003.
- [36] PINEAU, P. O., RASATA, H., ZACCOUR, G. Impact of some parameters on investments in oligopolistic electricity markets. *European Journal of Operational Research*. Vol 213, pp. 180-195, 2011.
- [37] POMPERMAYER, F.M., et al. A spatial price equilibrium model in the oligopolistic market for oil derivatives: an application to the Brazilian scenario. *Pesquisa Operacional*. Vol 27, nº 3, pp. 517–534, 2007.
- [38] VENTOSA, M., BAÍLLO, A., RAMOS, A., RIVER, M. Electricity market modeling trends. *Energy Policy*, Vol 33, nº 7, pp. 897-913, 2005.
- [39] WOGRIN, S., et al. Open versus closed loop capacity equilibria in electricity markets under perfect and oligopolistic competition. *Mathematical Programming*. Vol 140, nº 2, pp. 295–322, 2013.



## APÊNDICE – CÓDIGO AMPL

Neste apêndice estão os códigos AMPL dos arquivos utilizados nas simulações do caso eteno duopolista, com o objetivo de mostrar um exemplo de aplicação. O primeiro arquivo, chamado de eteno.mod, contém as condições de complementaridade que devem ser atendidas e o segundo arquivo, chamado de eteno.dat, contém os parâmetros do problema.

eteno.mod:

# Jogadores

set I;

# Tecnologias

set T;

# Cenários

set S;

# Alpha

param a;

# Beta

param b;

# Probabilidades

param p{S};

# Custo de produção

param v{T,S};

# Custo de investimento

param k{T};

# Produção

var  $y\{I,T,S\}$ ;

# Capacidade Total

var  $x\{I,T\}$ ;

# Dual da restrição de capacidade

var  $l\{I,T,S\}$ ;

# Dual da restrição de não negatividade para produção

var  $w\{I,T,S\}$ ;

# Dual da restrição de não negatividade do investimento

var  $m\{I,T\}$ ;

# Jogador 1

subject to Prod\_1 {t in T, s in S}:

$p[s]*(-a+b*\sum\{r \text{ in } T\}(2*y["P1",r,s])+v[t,s])+l["P1",t,s]-w["P1",t,s]=0$ ;

# Jogador 2

subject to Prod\_2 {t in T, s in S}:

$p[s]*(-a+b*\sum\{r \text{ in } T\}(2*y["P2",r,s]+y["P1", r, s])+v[t,s])+l["P2",t,s]-w["P2",t,s]=0$ ;

subject to investment {i in I, t in T}:

$k[t]-\sum\{s \text{ in } S\} l[i,t,s]-m[i,t]=0$ ;

subject to Compl\_Cap {i in I, t in T, s in S}:

$y[i,t,s]-x[i,t] \leq 0$  complements

$l[i,t,s] \geq 0$ ;

subject to Compl\_Prod {i in I, t in T, s in S}:

$y[i,t,s] \geq 0$  complements

$w[i,t,s] \geq 0$ ;

subject to Compl\_Inv {i in I, t in T}:

$x[i,t] \geq 0$  complements

$m[i,t] \geq 0$ ;

eteno.dat:

set I := P1 P2;

set T := te1 te2 te3; #te1 = gás natural te2 = nafta te3 = NGL

set S := s1 s2 s3 s4 s5;

param a := 7450;

param b:= 0.0014;

param p :=

s1 0.22

s2 0.24

s3 0.16

s4 0.14

s5 0.25;

param v :=

te1 s1 458

te1 s2 555

te1 s3 671

te1 s4 752

te1 s5 978

te2 s1 420

te2 s2 543

te2 s3 671

te2 s4 758

te2 s5 848

te3 s1 415  
te3 s2 541  
te3 s3 668  
te3 s4 745  
te3 s5 870;

param k :=  
te1 38  
te2 5  
te3 42;