



Programa de
Recursos
Humanos



Agência
Nacional do
Petróleo



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



Avaliação da Indústria Petroquímica no Brasil: Desenvolvimento de Modelo via Programação Matemática

Flávio Leite Loução Junior

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Prof. Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Fevereiro de 2015

Avaliação da Indústria Petroquímica no Brasil: Desenvolvimento de Modelo via Programação Matemática

Flávio Leite Loução Junior

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Petroquímica.

Aprovado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Karla Mattos Boaventura, M.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, D.Sc.

Orientado por:

Fernando L. Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2015

Junior, Flávio Leite Loução

Avaliação da Indústria Petroquímica no Brasil: Desenvolvimento de Modelo via Programação Matemática/ Flávio Leite Loução Junior. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2015. xi, 98 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2015.
Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Heloísa Lajas Sanches.

1. Planejamento Petroquímico. 2. Otimização de Superestrutura. 3. Avaliação Tecnológica. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Heloísa Lajas Sanches. I. Avaliação da Indústria Petroquímica no Brasil: Desenvolvimento de Modelo via Programação Matemática.

Dedico este trabalho à todos que torceram por mim e me apoiaram nos momentos difíceis, amigos e familiares. Em especial a minha noiva, Joicy, aos meus pais, Flávio e Andréa, ao meu irmão, Kaike, e aos meus orientadores, professores Fernando e Heloísa, que sempre me motivaram.

*“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas
dificuldades que superou no caminho”*

Abraham Lincoln

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, tenho o dever de agradecer à Deus pelas oportunidade que tive na vida de estudar e me tornar cada vez mais capaz.

Aos meus pais, Flávio e Andréa que sempre tiveram confiança na minha capacidade e orgulho das minhas conquistas. À estes também agradeço pelo apoio e pela luta em me manter focado na minha formação e nos meus objetivos acadêmicos e profissionais.

Ao meu irmão, Kaike, que apesar da pouca idade, sempre foi uma fonte de carinho. Também à minha noiva, Joicy, que abriu mão de muitos momentos de felicidade e descontração para que este trabalho fosse realizado.

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo – ANP** – e da **Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP** – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

À professora Flávia Alves pela atenção dispensada e grande contribuição nas questões de mercado e busca de diversas informações importantes. Foi uma professora que sempre se mostrou disposta a me ajudar e entender os desafios do setor.

À professora Heloísa Sanches pela disponibilidade, excelentes observações e grande ajuda no desenvolvimento deste projeto. Além de orientadora foi uma amiga, que nos momentos difíceis me aconselhou a seguir em frente e não perder o foco. Ao professor Fernando Pellegrini pela oportunidade e confiança no desenvolvimento deste trabalho, pelo apoio e também pela disponibilidade em me atender.

Se não fosse a ajuda de todos vocês, este trabalho teria sido uma tarefa muito mais árdua.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Petroquímica.

AVALIAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA NO BRASIL: DESENVOLVIMENTO DE MODELO VIA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Flávio Leite Loução Junior
Fevereiro, 2015

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Prof. Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Atualmente, devido às grandes expectativas que cercam o setor petroquímico nacional, muitas dessas referentes às reservas do pré-sal, este é um cenário muito propício a novas pesquisas. Diante das frequentes variações econômicas nos cenários presentes e na previsão dos cenários futuros, a posse de um modelo matemático da indústria petroquímica do Brasil torna o planejamento de investimentos cada vez mais ágil e eficiente, permitindo ampliar o número de cenários com diferentes situações.

Diversos trabalhos apresentam modelos de indústrias químicas de diferentes países que foram aplicados em diferentes metodologias para apoio à tomada de decisão, mas nenhum destes utilizados no Brasil. O modelo proposto no livro *Petrochemical Technology Assessment* (RUDD *et al.*, 1981) foi o escolhido para a realização da análise da indústria petroquímica brasileira.

O objetivo do trabalho é encontrar as quantidades ótimas que devem ser produzidas de cada produto petroquímico em cada processo químico, a partir de um procedimento de programação linear. Além disto, deseja-se simular diversos cenários para encontrar o gargalo deste setor no Brasil, ou seja, a quais matérias-primas a estrutura da indústria petroquímica brasileira é mais sensível.

Apesar das dificuldades de se encontrarem os dados e parâmetros de entrada do modelo e da desatualização dos dados técnicos, valores referentes aos custos de processo foram estimados com base em dados da ABIQUIM e da ANP. A superestrutura final contempla 60 produtos petroquímicos e 86 processos de transformação.

Embora esta primeira tentativa de otimização não tenha permitido a avaliação dos diversos cenários possíveis, foi possível concluir que a indústria petroquímica brasileira não é autossuficiente, como já esperado. Mais do que isto, foi possível reiterar que há falta de planejamento no setor e que a delimitação da indústria petroquímica e os dados utilizados precisam ser revistos ou adaptados a um novo modelo para que seja possível simular e otimizar outros cenários com resultados que não extrapolem as restrições lógicas.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineering with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Petrochemical.

INDUSTRY PETROCHEMICAL ASSESSMENT IN BRAZIL: DEVELOPMENT OF MODEL VIA PROGRAMMING MATHEMATICS

Flávio Leite Loução Junior
February, 2015

Supervisors: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Prof. Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Currently, due to the high expectations surrounding the national petrochemical industry, many of these related to the pre-salt reserves, there is a favorable scenario to new researches on its structure. The frequent economic changes encourage the development of a mathematical model of the petrochemical industry in Brazil, which makes investment planning agile and efficient.

Several studies present models of the petrochemical industries in several countries, which have been applied to different methodologies to support decision-making. However, none of these presented a model of the brazilian petrochemical industry. The model proposed in the book *Petrochemical Technology Assessment* was chosen to carry out the analysis of the brazilian petrochemical industry.

Despite the difficulties in finding the adequate input parameters and the outdated technical data found in this reference, these were estimated with ABIQUIM and ANP data. The final superstructure comprises 60 petrochemicals and 86 processes.

The objective is to find the optimal production of the petrochemicals in all chemical process considered with a linear programming procedure. In addition to that, it is intended to find the bottlenecks of the petrochemical industry in Brazil, that is, the raw materials to which this industry is more sensitive.

Although the first attempt to optimization did not succeed in assessment of possible scenarios, it was concluded that the brazilian petrochemical industry is not self-sufficient, as expected. It was also concluded that the petrochemical industry lacks planning in Brazil and that the delimitation of the petrochemical industry and the data used must be reviewed and adapted to a new model, so that optimization procedures satisfy all the constraints.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
I.1 – Indústria petroquímica brasileira	1
I.2 – Motivação	3
I.3 – Aplicação	4
I.4 – Objetivos	4
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 – Modelos tradicionais	5
II.2 – Programação linear	9
II.3 – Pesquisas relacionadas	10
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	19
III.1 – Seleção do modelo	20
III.2 – Busca e estimação de parâmetros	26
III.2.1 – Estimação da demanda (D_i)	27
III.2.2 – Estimação do fornecimento (S_i)	28
III.2.3 – Estimação do preço dos petroquímicos (P_i)	30
III.2.4 – Estimação do preço de queima (H_i)	32
III.2.5 – Estimação da restrição de capacidade (B_j)	35
III.2.6 – Estimação dos custos de processo (C_j)	40
III.2.7 – Coeficientes técnicos de processo (a_{ij})	44
III.3 – Escolha do software	54
III.4 – Simulação do modelo	55
CAPÍTULO IV – RESULTADOS	56
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	62
CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE A – ARQUIVO DA SIMULAÇÃO	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 – Estrutura da indústria petroquímica brasileira.	2
Figura II.3 – Estrutura da rede petroquímica de Rudd et al (1981).	7
Figura II.4 – Problema genérico de programação linear.	9
Figura III.1 – Estrutura genérica do estudo de caso.	21
Figura III.2 – Representação esquemática do modelo escolhido.	24
Figura III.3 – Reações de formação das etanolaminas.	36
Figura III.4 – Reação de formação do DBP.	37
Figura III.5 – Cálculo dos custos referentes aos processos de produção (C_j).	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela III.1 – Dados de demanda (D_i) do estudo de caso.	22
Tabela III.2 – Dados de fornecimento (S_i) do estudo de caso.	22
Tabela III.3 – Dados de preço de venda (P_i) e queima (H_i) do estudo de caso.	22
Tabela III.4 – Dados de restrição de capacidade instalada (B_j) dos processos de produção do estudo de caso.	23
Tabela III.5 – Dados de custo (C_j) de produção dos processos do estudo de caso.	23
Tabela III.6 – Coeficientes de processo (a_{ij}) do estudo de caso.	23
Tabela III.7 – Resultados de compra de petroquímicos (F_i) de fora da rede proposta no estudo de caso.	24
Tabela III.8 – Resultados de quantidade produzida de petroquímicos (Q_i) no estudo de caso.	25
Tabela III.9 – Resultados de quantidade produzida pelos processos j (X_j) no estudo de caso.	25
Tabela III.10 – Produtos que compõem a superestrutura da rede petroquímica brasileira.	26
Tabela III.11 – Demanda dos produtos da indústria petroquímica brasileira.	27
Tabela III.12 – Limites de fornecimento aos produtos da indústria petroquímica brasileira.	29
Tabela III.13 – Preço de venda (P_i) dos petroquímicos da indústria nacional.	31
Tabela III.14 – Entalpia de combustão dos petroquímicos da indústria nacional.	33
Tabela III.15 – Preço de queima (H_i) dos petroquímicos da indústria nacional.	34
Tabela III.16 – Restrição de limite de produção dos processos (B_j).	37
Tabela III.17 – Custo de produção dos processos da indústria petroquímica (C_j).	42

Tabela III.18 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 1-6.	44
Tabela III.19 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 2-6.	46
Tabela III.20 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 3-6.	47
Tabela III.21 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 4-6.	49
Tabela III.22 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 5-6.	51
Tabela III.23 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 6-6.	52
Tabela IV.1 – Resultados de compra de petroquímicos (F_i) de fora da rede petroquímica.	56
Tabela IV.2 – Resultados de quantidade produzida de petroquímicos (Q_i) na indústria brasileira.	57
Tabela IV.3 – Resultados de quantidade produzida pelos processos j (X_j) na rede petroquímica.	58

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 – Indústria petroquímica brasileira

Antes de começar qualquer análise sobre o setor petroquímico brasileiro, se faz necessário citar a indústria química, na qual se insere este setor. A importância da indústria química é considerada estratégica, devido à presença de seus produtos em diversas outras indústrias, ou seja, é possível considerá-la a base da indústria como um todo. Segundo o Anuário da Indústria Química Brasileira (ABIQUIM, 2012), o faturamento em 2011 atingiu a marca de US\$ 157,3 bilhões, sendo sua participação no PIB de 2,5%.

Nos últimos anos, observa-se um crescimento econômico brasileiro acompanhado pelo aumento da demanda dos produtos químicos. Entretanto, os investimentos no setor não têm acompanhado a crescente demanda no Brasil. O déficit da balança comercial de produtos químicos tende a crescer cada vez mais e já alcançou US\$ 26,51 bilhões em 2011 (ABIQUIM, 2012).

Como parte da indústria química, a petroquímica carece de novos investimentos para atendimento de demanda interna, além disso, o Brasil apresenta grande déficit tecnológico no parque de refino brasileiro. Investimentos neste setor, além de apresentarem tempo de retorno elevado, são de grande porte, o que dificulta a presença de investidores, bem como a tomada de decisão por parte dos investidores.

Uma outra dificuldade consiste na dificuldade de se realizarem estudos para agilizar a tomada de decisão, pois geralmente estes estudos possuem elevada complexidade. Isto porque devem ser simulados diferentes cenários considerando variações em preços e condições de oferta e demanda, além de restrições de capacidade instalada e inclusões de novas rotas tecnológicas.

Segundo o anuário da ABIQUIM (2012), a indústria petroquímica brasileira é concentrada e baseada na importação de diversos produtos, sobretudo da nafta, a matéria-prima principal deste setor. A Figura I.1 apresenta uma esquema das empresas

A expectativa pela conclusão das construções de novas refinarias e da produção em larga escala dos poços do pré-sal, dentre as novas refinarias, o complexo petroquímico denominado COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro), torna o setor petroquímico o cenário ideal para estudos e pesquisas científicas nos setores de óleo e gás e petroquímico. A partir destas expectativas diversos estudos têm sido realizados ressaltando a importância da integração desta indústria com a de óleo e gás, mais especificamente o segmento de refino, sempre destacando o déficit presente na produção dos petroquímicos básicos e a previsão de crescimento da demanda por estes produtos.

I.2 – Motivação

Conforme apresentado, o cenário atual da indústria petroquímica nacional indica um cenário propício a pesquisas no setor. Além disso, o elevado déficit tecnológico, referente ao sucateamento do parque de refino brasileiro, embora este esteja em reestruturação, mostra a necessidade de investimentos no setor. Em virtude desta necessidade, metodologias de planejamento podem ser de grande ajuda na tomada de decisões, principalmente para não perder recursos financeiros alocando-os de maneira indevida.

As motivações para se realizarem estudos de planejamento não são somente encontradas em notícias de jornais e revistas. Na literatura, trabalhos como o de Alves *et al.* (2005) mostraram o quão necessário se faz um planejamento mais adequado na indústria petroquímica brasileira. Ao avaliar as competências para inovar na indústria petroquímica do Brasil, foi observado que o grande problema deste setor não é a falta de recursos humanos qualificados (ALVES *et al.*, 2005).

Além disto, o nível técnico pode ser classificado como bom, apesar da dependência por alguns petroquímicos e tecnologia estrangeira. O grande entrave à modernização e capacidade inovadora da petroquímica nacional está nas competências organizacionais deste setor, ou seja, a falta de planejamento estratégico é um grande obstáculo (ALVES *et al.*, 2005).

Logo, de posse de um modelo matemático que represente a indústria petroquímica do Brasil, o estudo de novos investimentos e a realização de um planejamento a médio e longo prazo torna-se mais ágil e eficiente, pois permite ampliar o número de cenários com diferentes situações, dando robustez e aumentando a confiabilidade nas decisões que deverão ser tomadas.

I.3 – Aplicação

A aplicação deste trabalho basicamente consiste em melhor direcionar os recursos financeiros e/ou naturais, recursos estes que podem ser provenientes, por exemplo, de um aumento na quantidade de uma determinada matéria-prima devido à descoberta de uma nova reserva natural.

Este trabalho também pode ser aplicado à avaliação tecnológica de uma indústria, neste caso a petroquímica. De posse de informações estratégicas, como informações técnicas e financeiras dos processos, questões como a substituição de tecnologias obsoletas, por exemplo, podem ser avaliadas. É preciso ressaltar que, trabalhos desta linhagem possuem como foco o estudo de novos investimentos para suportar decisões estratégicas no planejamento a médio e longo prazo.

I.4 – Objetivos

O trabalho tem como objetivo analisar estruturas ótimas para a indústria petroquímica brasileira em diferentes cenários. As análises acerca do setor são baseadas nos resultados da minimização dos custos do setor petroquímico. Situações como excesso ou escassez de matérias-primas ou um súbito aumento na demanda por um determinado produto podem modificar a estrutura do setor e portanto, fazem parte das análises.

Os objetivos do trabalho consistem, primeiramente na modelagem correta da indústria petroquímica brasileira. Após o corte correto nos produtos da indústria química, delimitando o setor petroquímico, os cenários avaliados incluem a avaliação deste setor em relação as duas principais matérias-primas, nafta e gás natural, respectivamente. Além disso, diante do elevado gasto com energia elétrica industrial, pode ser interessante analisar o peso deste gasto em toda a indústria petroquímica brasileira.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, os modelos propostos por Rudd *et al.* (1981) no livro *Petrochemical Technology Assessment* serão subdivididos em partes, as quais serão explicadas uma a uma. Diante da linearidade dos modelos, uma breve revisão sobre programação linear será feita, mais voltada ao método simplex.

Trabalhos realizados a partir dos modelos propostos por Rudd *et al.* (1981) também serão avaliados, bem como suas principais conclusões. Também será feito uma análise da indústria Petroquímica dos países onde este modelo foi aplicado mostrando se houve alguma evolução do setor à época de realização dos estudos analisados.

II.1 – Modelos tradicionais

A modelagem matemática pode ser utilizada para o planejamento de empresas e setores industriais. Neste contexto, foi proposto um modelo para análise e planejamento de um dos setores mais importantes da economia global, o setor petroquímico. Os modelos sugeridos por Rudd *et al.* (1981) foram baseados na forte indústria petroquímica dos Estados Unidos entre o final da década de 70 e início da década de 80 e se baseiam na minimização do custo de produção da indústria petroquímica, ou seja, do custo total de funcionamento da rede petroquímica avaliada.

Para construção destes modelos, foram considerados 182 processos de transformação (representados pelo índice j) envolvendo 131 produtos petroquímicos, intermediários e matérias-primas (representados pelo índice i). A modelagem ainda envolve a aplicação de restrições de fornecimento de petroquímicos (S_i), de capacidade instalada dos processos (B_j), da demanda pela quantidade de produto ou intermediário produzido (D_i) e de balanço de massa.

O primeiro modelo apresentado é descrito pela Equação II.1 (RUDD *et al.*, 1981):

$$\text{Custo de produção} = \sum_{i=1}^N P_i F_i + \sum_{j=1}^M C_j X_j + \sum_{i=1}^N (Q_i - D_i)(P_i - H_i) \quad (\text{II.1})$$

Analisando as variáveis e os parâmetros que compõem o modelo, P_i é o preço do produto i enquanto H_i é o *heating value*, ou seja, representa o preço da energia obtida através da combustão do produto i , supondo que haja um excesso na produção. O parâmetro C_j representa o custo do total de produção do processo j , este é composto por outros quatro termos, custo fixo I_j , mão-de-obra L_j , custo com catalisadores e aditivos M_j e utilidades U_j . A variável X_j é o nível de produção, ou seja, a quantidade de produto principal produzido no processo j . É importante ressaltar que, caso um sub-produto de um processo j não faça parte da rede, ele entra como crédito no custo com aditivos e catalisadores, como um abatimento neste custo. Finalmente F_i é o parâmetro que indica a quantidade de produto i que vem de fora da rede petroquímica analisada.

Com relação às três parcelas da equação, a primeira representa o custo de compra de produtos vindos de fora da superestrutura analisada; o segundo representa o custo de produção total pelo processo j , já que é composto pelo produto do preço unitário (por tonelada) pela quantidade produzida, em toneladas. O último somatório do modelo representa um termo definido como uma correção ao excesso, ou seja, resumidamente, representa o quanto se deixa de ganhar. Note que este termo se anula quando $Q_i = D_i$, ou seja, quando apenas o demandado é produzido, não há correção.

O segundo modelo considera a rede petroquímica como uma superestrutura completamente integrada. Esta é uma situação ideal, mas que pode ser aplicada a países em desenvolvimento, já que os intermediários e subprodutos são utilizados dentro da indústria por não apresentar alto valor agregado no mercado. A equação II.2 utiliza as mesmas terminologias do modelo anterior (RUDD *et al.*, 1981).

$$\text{Custo de produção} = \sum_{i=1}^N P_i F_i + \sum_{j=1}^M C_j^* X_j - \sum_{i=1}^N (Q_i - D_i)(H_i) \quad (\text{II.2})$$

Em comparação com o primeiro modelo, nota-se que a única diferença é com relação ao parâmetro C_j^* . Este não inclui créditos com subprodutos, o único abatimento no custo total da indústria petroquímica se refere aos créditos de energia pela queima do excesso de produto. Este modelo é capaz de mostrar uma interessante visão dos limites de performance considerando a indústria petroquímica completamente integrada.

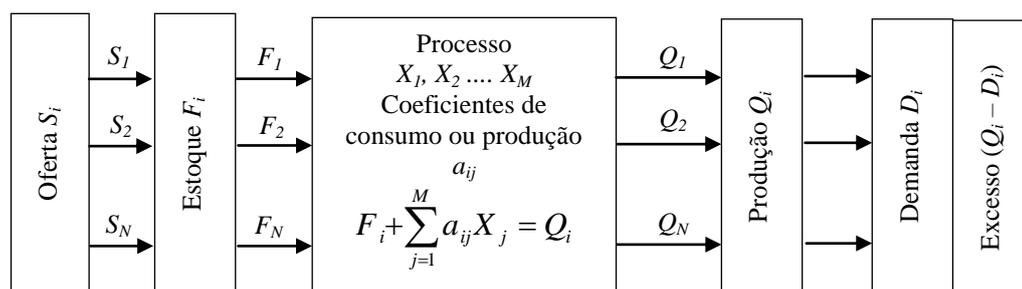


Figura II.3 – Estrutura da rede petroquímica

Fonte: Adaptada de Rudd *et al.* (1981).

A Figura II.3 apresenta um esquema da modelagem proposta por Rudd *et al.* (1981) conforme discutido nesta seção. Um ponto comum aos dois modelos é a necessidade de uma restrição de balanço de massa. Ou seja, se uma certa quantidade de matéria-prima entra no modelo, é necessário que haja uma equação que represente sua transformação em produto. Nesse contexto, os parâmetros a_{ij} , que representam os coeficientes técnicos do petroquímico i no processo j , sendo este valor negativo para reagentes (indicando o consumo) e positivo para produtos (indicando a formação), representam matematicamente a transformação química de cada composto.

Assim, a equação que representa o balanço de massa, apresentada na Figura II.3, mostra que: A quantidade de produto i produzida (Q_i) é igual à quantidade que entra na rede (F_i), mais o que é gerado pelo processo j , $a_{ij} > 0$, subtraído da quantidade de i consumida no processo j , quando $a_{ij} < 0$.

A simulação do modelo em diferentes cenários da indústria petroquímica foi utilizada para exemplificar as possíveis conclusões que podem ser feitas a partir destes modelos de suporte ao planejamento (RUDD *et al.*, 1981). Os autores se basearam nos dados de capacidade de produção de 1977 e em algumas estimativas sobre o cenário do mercado nos anos seguintes para avaliar possíveis investimentos na indústria petroquímica até 1985.

Para esta análise, foram considerados diferentes cenários com diferentes fatores de utilização da capacidade de produção, tomando como base 1977. Os fatores utilizados foram 100%, 50% e 0%. Quando o fator é 100%, as possibilidades de expansão são as

menores possíveis, já que as unidades já trabalham em capacidade máxima. Em 50%, existe uma possibilidade de substituição de metade da capacidade de produção por novas alternativas. Quando o fator de utilização assumido é 0%, situação ideal, toda a capacidade de produção pode ser substituída, logicamente caso seja uma alternativa à minimização dos custos ou maximização dos lucros da indústria petroquímica. O uso destes diferentes cenários permite que se entendam as ineficiências da estrutura atual do setor, identificando possíveis correções.

Os autores também verificaram a variação dos resultados quando novas tecnologias são introduzidas no modelo, como possíveis alternativas. Os cenários com 100%, 50% e 0% do fator de utilização da capacidade de produção, ano base 1977, foram novamente simulados, de modo que as novas rotas tecnológicas de produção introduzidas no modelo são tomadas como opções para novos investimentos.

Outras perturbações na indústria petroquímica também foram alvo dos estudos de Rudd *et al.* (1981). Estudos de sensibilidade foram realizados, ou seja, o modelo matemático foi submetido à variações nos parâmetros, como o preço da energia e impactos na oferta de determinadas matérias-primas, neste caso identificando a qual matéria-prima/insumo a indústria estudada é mais sensível.

O estudo das ineficiências na indústria petroquímica, da introdução de novas tecnologias e das perturbações das condições de mercado exemplificam como os modelos propostos auxiliam o planejamento a médio e longo prazo. Diante da importância e sensibilidade dos parâmetros envolvidos nos modelos, quanto maior a confiabilidade dos dados, melhores são as respostas no que diz respeito à tomadas de decisões e análise de investimentos no setor. Aparentemente, os autores do estudo possuíam acesso a informações confiáveis sobre demandas e produção da indústria petroquímica. A dificuldade da obtenção de dados da indústria petroquímica relativos a outras épocas e outros países pode ser um motivo para a baixa quantidade de trabalhos encontrados sobre tais metodologias de planejamento.

II.2 – Programação Linear

A definição matemática mais simples referente aos problemas de programação linear (PL) diz que estes são problemas de otimização nos quais tanto a função objetivo, quanto as restrições são lineares (HIMMELBLAU, 1988). A programação linear é uma importante área da otimização, já que muitos problemas práticos em pesquisa operacional são lineares. Além disso, diversos conceitos centrais da otimização foram inspirados na PL, como por exemplo, dualidade, decomposição, e a importância da convexidade e suas generalizações.

A Figura II.4 representa um problema genérico de programação linear. As variáveis x_n são as variáveis de decisão, os termos a_{mn} representam os coeficientes das variáveis e os símbolos b_m representam os termos independentes.

$$\begin{aligned} & \text{Max (ou min) } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 \dots + c_nx_n \} \text{ função objetivo} \\ & \text{Sujeito a: } \left. \begin{aligned} & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ & a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n = b_3 \\ & \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{aligned} \right\} \text{ Restrições} \\ & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \} \text{ condição de não-negatividade} \end{aligned}$$

Figura II.4 – Problema genérico de programação linear

Fonte: PASSOS, 2008.

Alguns problemas como os de *network flow* e de *multicommodity flow* foram de grande importância no desenvolvimento de algoritmos para resolução dos problemas de programação linear. Entretanto, é importante ressaltar que existe uma gama enorme de algoritmos voltados à resolução de outros problemas de otimização que também são capazes de resolver problemas lineares, dada a simplicidade da PL.

A programação linear ganhou destaque após o final da segunda guerra em 1947, quando o método simplex foi criado. O simplex foi desenvolvido por George Dantzig através do projeto SCOOP (*Scientific Computation of Optimum Programs*). Inicialmente, a solução

pelo método simplex era manual, porém, com a intensificação do uso de computadores, o método teve seu uso expandido para problemas maiores.

Através do simplex, os problemas de programação linear podem ser resolvidos de maneira simplificada. O algoritmo deste método descreve uma sequência de passos para a solução dos sistemas lineares sujeitos à função objetivo. De maneira mais sucinta, o simplex consiste na apresentação de uma solução inicial. A partir desta, soluções subsequentes passam a ser calculadas em um processo iterativo. Logo, trata-se de um método iterativo para maximizar ou minimizar uma função objetivo de um modelo matemático linear, considerando algumas restrições lineares.

Deste modo, a cada iteração realizada, a solução obtida é mais próxima da ótima, ou seja, as soluções passam de um ponto extremo da região de soluções a outro, até atingir a ótima. As iterações terminam no momento em que, estando em um ponto extremo, todos os pontos extremos adjacentes a ele fornecem valores menores (em problemas de maximização) ou maiores (em problemas de minimização) para a função objetivo (SILVA, 2012).

Existem outras descrições acerca do funcionamento do simplex. Aurich (2004) descreve o simplex como um método que consiste no avanço de um vértice a outro adjacente da região de busca definida pelas restrições do problemas procurando otimizar, maximizar ou minimizar, a função objetivo.

Na literatura é possível encontrar uma vasta gama de trabalhos sobre a utilização do simplex em programação linear. Os trabalhos se dividem quanto a utilização de pacotes de softwares de otimização, os mais utilizados são LINDO, o SOLVER, o LINGO, o VISUAL XPRESS, MATLAB e GAMS, este último o pacote escolhido neste trabalho.

II.3 – Pesquisas relacionadas

O processo de tomada de decisão na indústria petroquímica é algo de extrema dificuldade, principalmente quando estas decisões estão associadas a um planejamento a longo prazo. Isto se deve principalmente à grande flutuação do mercado que engloba este setor. Para dar suporte ao processo de decisão, diferentes autores, quase sempre se

baseando nos modelos de Rudd *et al.* (1981), apresentaram modelos matemáticos baseados em diferentes metodologias e conceitos da otimização.

A relevância e aplicabilidade dos modelos propostos por Rudd *et al.* (1981) é observada nas regiões onde pesquisas semelhantes foram realizadas. Nota-se que na maioria dos casos se tratam de regiões de referências nos setores de óleo e gás e petroquímico ou de regiões que passavam por uma reestruturação destes setores, como o México, por exemplo. Os modelos apresentados foram aplicados em diferentes cenários, como por exemplo, na avaliação de novos processos de produção, análise de investimentos no setor e em estudos de sensibilidade do mercado.

Stadtherr e Rudd (1975) iniciaram estudos em uma tentativa de modelagem da indústria petroquímica, que mais tarde seria refinada por Rudd *et al.* (1981). A visão da indústria, proposta como um sistema de M transformações químicas e N produtos petroquímicos resultaria em uma equação matricial pela qual foram feitas previsões razoáveis no que diz respeito ao comportamento do setor petroquímico quanto à variações no fornecimento e na demanda, bem como na utilização de matérias-primas.

Os pesquisadores chegaram à conclusão de que este modelo preliminar seria essencialmente um modelo estático de alocação de recursos. Quando se consideram projeções de desenvolvimento do setor, este modelo poderia ser utilizado para se obter alguma percepção sobre o seu futuro. Resumidamente, pode-se dizer que este modelo foi apenas um precursor de um modelo mais amplo com a capacidade de prever bem as flutuações deste setor tão dinâmico da indústria.

Os estudos de Mikkelsen e Rudd (1979) para o desenvolvimento da indústria petroquímica da Noruega foram realizados num cenário parecido com o atual brasileiro. A descoberta de uma importante reserva no Mar do Norte impulsionou o setor local, atingindo boa parte da Europa, daí a importância dos estudos para direcionar da melhor forma como utilizar estes recursos naturais. Estes campos foram de grande importância no desenvolvimento da estatal norueguesa Statoil.

O modelo contemplou toda a indústria petroquímica europeia de modo a definir quão impactante seria esta nova reserva na participação da Noruega na indústria petroquímica

européia. Dos 23 produtos que se mostraram interessantes economicamente a partir da simulação, 13 já estavam sendo produzidos.

Como resultados, a simulação não identificou uma alavancagem econômica da petroquímica norueguesa, ou seja, as reservas do Mar do Norte não representavam uma oportunidade de crescimento do setor petroquímico norueguês. Logo, foi predito pelo modelo que os recursos provenientes do Mar do Norte deveriam ser comercializados como matéria-prima pelo setor de óleo e gás sem qualquer integração com a indústria petroquímica (MIKKELSEN e RUDD, 1979).

Recentemente, a empresa EY publicou um estudo sobre perspectivas para a indústria de óleo e gás no Brasil, mais especificamente, sobre as lições aprendidas com as reservas do Mar do Norte. Os dados apresentados no relatório reforçam as conclusões de Mikkelsen e Rudd (1979), pois demonstram que a política da Noruega esteve baseada no fortalecimento da indústria de óleo e gás, mantendo a produção dos campos em um ritmo mais lento de desenvolvimento, de modo a respeitar os tempos nas diferentes fases da exploração e produção. Esse desenvolvimento da produção com passos firmes permitiu ao país desenvolver a sua estrutura logística e de suporte ao setor de óleo e gás (EY, 2009).

Jiménez *et al.* (1982) propuseram um estudo da indústria petroquímica do México mais voltado para uma reestruturação do setor. Desta vez, o modelo a ser utilizado não foi puramente linear devido ao processo de substituição de importações que fazia parte do cenário econômico mexicano na época. Os autores também apresentaram uma abordagem heurística para estudo do nível de utilização das unidades de processo.

Devido às particularidades da indústria petroquímica mexicana à época, os autores escolheram uma abordagem diferente, por programação inteira mista (PIM). Nesta abordagem, o termo não linear se referiu diretamente à substituição de importações e contemplou uma variável binária referente ao início da construção ou não de novas unidades de produção.

A partir deste modelo foi possível prever o percentual da capacidade de produção instalada associado ao menor custo total de produção. Porém, diferente do modelo

tradicional, o custo também inclui a construção de novas unidades de produção. Outras conclusões importantes obtidas através da comparação da solução ótima com dados do setor foram:

- A não produção do metanol que causou uma substituição no processo de produção do benzeno;
- O menor investimento requerido na construção de novas plantas;
- O processo de produção do acrilato de etila, produzido a partir do acetileno, utilizou apenas 57% da capacidade de produção;
- O custo mínimo na indústria petroquímica mexicana foi alcançado quando os processos utilizaram 60% de sua capacidade instalada.

O estudo de Jiménez *et al.* (1982) foi aprimorado, por Jiménez e Rudd (1987). Neste novo trabalho, se introduziu um modelo recursivo de programação linear inteira mista que apresenta o planejamento anual da indústria petroquímica do México para aumento de capacidade de produção e instalação de unidades de processos novas para atendimento de demanda em 10 anos.

Seguindo os estudos na petroquímica mexicana, Toledo *et al.* (2010) apresentaram um novo modelo à indústria petroquímica do México com o objetivo de ajudar na tomada de decisão sobre a escolha de rota de produção de petroquímicos. O modelo considerou a cadeia desde o refino do petróleo até os produtos petroquímicos finais. A pesquisa mostrou que, à época, o uso do petróleo como matéria-prima na produção de petroquímicos era uma opção economicamente mais atrativa que a exportação do petróleo bruto.

Fathi-Afshar *et al.* (1985) propuseram a adição de uma segunda função objetivo ao modelo tradicional de Rudd. Esta nova função busca uma rede ótima de processos petroquímicos que apresente menor custo e menor toxicidade associada à emissão dos produtos químicos produzidos.

Neste estudo, os autores demonstram que o conjunto ótimo de processos químicos com menor custo não corresponde ao conjunto dos processos químicos com menor nível de toxicidade. Isto porque uma redução da toxicidade acarreta um aumento nos custos e

vice-versa. Para resolução do problema, os autores utilizaram os conceitos de programação multiobjetivo. Os resultados revelam o conjunto ótimo de processos para uma estrutura industrial economicamente e ambientalmente viável.

Outros autores como Santiago *et al.* (1986) propuseram a aplicação de um modelo não linear para minimizar o custo anual do setor petroquímico sujeito às mesmas restrições de demandas, fornecimento de matérias-primas e balanço de massa. Para utilizar técnicas de programação linear, os autores apresentam uma estratégia de linearização do modelo que permite chegar de maneira mais rápida ao ótimo global.

Al-Fadli *et al.* (1988) apresentaram uma formulação de modelo linear de fluxo em rede como uma alternativa ao modelo tradicional de programação linear em uma aplicação dos conceitos para o planejamento da indústria petroquímica da Arábia Saudita. Os resultados mostraram que a resolução através do fluxo em rede apresentou a solução ótima em um tempo três vezes menor que a programação linear, indicando que a modelagem apresentada pode ser uma boa alternativa para problemas de programação linear de larga escala.

Gurkan e Kartal (1989) fizeram uso das premissas do trabalho de Rudd *et al.* (1981), associados a restrições de demanda e fornecimento, para descrever o desenvolvimento da indústria petroquímica da Turquia. Após várias simulações, obteve-se o panorama associado ao menor custo contendo quais são as matérias-primas da estrutura ótima, bem como os processos.

O estudo do modelo criado reiterou que a demanda, a capacidade de produção e o preço das matérias-primas são informações de extrema importância para o planejamento da indústria devido à sensibilidade do modelo a estes fatores. Outro resultado importante consiste na capacidade de redução no custo do setor a partir da aplicação de novas tecnologias de produção. No caso da indústria turca, os autores revelaram que esta redução poderia alcançar até 9% (GURKAN e KARTAL, 1989).

Um fator de suma importância no setor petroquímico é a sensibilidade em relação a variações de preço, demanda e fornecimento. Os autores identificaram para a petroquímica da Turquia que a matéria-prima mais influente no custo total do setor é a

nafta. Uma simulação mostrou que se o preço da nafta for dobrado, o custo de produção é aumentado em 25% (GURKAN e KARTAL, 1989).

Outra variante do modelo de Rudd foi o modelo gráfico proposto por Chávez *et al.* (1990), cuja finalidade foi obter resultados com maior grau de confiabilidade. Este simulador poderia ser utilizado por setores específicos da indústria química em situações de perturbações externas ou troca de cenários econômicos.

Embora a simulação tenha considerado cada tecnologia como uma entidade individual, a aproximação que levou ao ótimo considerou a indústria como um todo. Ou seja, o programa é flexível quanto a utilização de aproximações para permitir uma melhor avaliação da lucratividade individual de cada processo. Em geral, esta simulação é mais adequada para estudos de sensibilidade, até mesmo pela possibilidade de desagregação e avaliação das diferentes tecnologias separadamente. Entretanto, ainda existem muitos estudos que buscam aperfeiçoar esta abordagem e, devido à maior complexidade desta análise, os modelos econômicos lineares ainda são os mais utilizados para estes tipos de estudos.

Al-Sharrah desenvolveu, em diversas parcerias com outros pesquisadores, modelos de planejamento a longo prazo para a indústria petroquímica do Kuwait com diferentes funções objetivo. Em Al-Sharrah *et al.* (2001), um modelo de planejamento integrado a uma função objetivo ambiental foi apresentado. O modelo de programação linear inteira mista possuía duas funções objetivo, uma para atender ao balanço de massa de forma a minimizar os custos, sujeito as restrições tradicionais, e outra ligada ao mínimo risco ambiental, baseada em um índice de toxicidade dos produtos petroquímicos.

Nos trabalhos publicados em 2002, 2003 e 2006, o modelo original de Al-Sharrah *et al.* (2001) foi modificado de modo a incluir novas restrições que permitissem a busca de soluções em novos objetivos. Em AL-SHARRAH *et al.* (2002), um critério de seleção estratégica de novas unidades de processamento foi adicionado, objetivando a busca por sustentabilidade e estabilidade econômica por um longo período de tempo às empresas do setor.

No trabalho de Al-Sharrah *et al.* (2003), foram incluídos modelos para previsão de preços dos petroquímicos a curto e longo prazo. Estes modelos de previsão foram aplicados no planejamento da indústria petroquímica do Kuwait. Segundo os resultados obtidos, a inclusão da previsão dos preços proporcionou uma melhor análise de planejamento a longo prazo, dada a sensibilidade do planejamento deste setor aos dados de entrada, como os preços dos petroquímicos, por exemplo.

Al-Sharrah *et al.* (2006) aprimoraram o modelo apresentado em 2001 para a indústria petroquímica do Kuwait. As melhorias foram voltadas à escolha de rotas para a produção de petroquímicos associados a uma maior lucratividade e menor risco à população local no que diz respeito a acidentes. O estudo foi realizado a partir de uma combinação de resultados obtidos a partir da programação linear inteira mista (PLIM) em busca da solução que apresente maior lucratividade e menor risco e utilizando uma ferramenta estratégica de seleção e eliminação dos processos químicos selecionados com os melhores resultados da PLIM.

Em Al-Qahtani *et al.* (2008), os autores incluíram no modelo determinístico de Al-Sharrah *et al.* (2001), incertezas dos parâmetros de rendimento de processo, custos de matérias-primas, preço dos produtos e limite inferior da demanda. Além da incerteza, o risco associado às variações do lucro obtido, nos rendimentos de processo e na previsão de demanda futura também foram avaliadas. A inclusão da incerteza no modelo gerou 5.341 parâmetros incertos que foram modelados em um número total de 200 cenários para cada parâmetro aleatório. Segundo os autores, este modelo apresenta maior robustez na análise de novas estruturas petroquímicas.

Os modelos matemáticos de apoio ao planejamento do setor petroquímico são complexos e sensíveis. Portanto, a diminuição do tempo e esforço computacional na resolução destes modelos é um tema de grande importância, abordado por diversos autores. Em seu trabalho, Sahinidis *et al.* (1989), trouxeram a proposta de uma modelagem multiperíodo de programação linear inteira mista (PLIM) para escolha de processos e avaliação do aumento da capacidade de produção da indústria analisada.

O tempo computacional para resolução do modelo foi analisado em diferentes metodologias, a saber: enumeração e limitação (“*branch and bound*”), corte inteiro

(“*integer cuts*”), plano de corte (“*strong cutting planes*”), decomposição de Benders (“*Benders decomposition*”) e heurística. A partir dos resultados obtidos, as metodologias de cortes inteiros, planos de corte e enumeração e limitação apresentaram os melhores resultados.

Van den Heever e Grossmann (1999) apresentaram dois algoritmos de planejamento em sua pesquisa. Os algoritmos foram apresentados de forma genérica; deste modo, podem ser adaptados a diferentes tipos de problema. As metodologias aplicadas aos algoritmos foram: aproximação externa (“*outer approximation*” - OA) e decomposição em dois níveis (“*bilevel decomposition*”). Suas performances em tempo computacional para resolução dos problemas apresentados foram melhores que o tempo computacional de ferramentas comerciais.

Outro importante trabalho de modelagem matemática voltada ao planejamento estratégico do setor petroquímico é o trabalho de Al-Qahtani e Elkamel (2010). Em seu livro, *Planning and Integration of Refinery and Petrochemical Operations*, os autores apresentam na primeira parte, uma introdução ao refino do petróleo e à indústria petroquímica. As classificações chave da indústria petroquímica, no que diz respeito aos petroquímicos básicos e produtos finais, bem como as possíveis sinergias entre a indústria de óleo e gás e petroquímica também são explicadas.

Na segunda parte do livro, foca-se na explicação e classificação dos modelos disponíveis usados no planejamento sob condições determinísticas, todos ilustrados por uma série de estudos de caso por abordagens diferentes. Esta parte também aborda o projeto e análise da integração refino-petroquímica, através de técnicas de programação linear inteira mista (PLIM). O sistema é modelado como um problema de PLIM e ilustrado através de exemplos numéricos.

Os autores também desenvolvem um quadro para a concepção e análise de possíveis estratégias de integração e coordenação de redes de refinaria e petroquímica de modo a satisfazer as demandas e outras restrições lógicas. A principal característica desta abordagem é o desenvolvimento de uma metodologia para a análise simultânea da integração da rede de processos dentro do sistema refinaria-petroquímica.

As duas primeiras partes servem como base para a terceira e última sessão do livro. Nesta sessão, os autores abordam o planejamento sob incertezas e considerando o gerenciamento de riscos utilizando técnicas de programação estocástica. As incertezas dos parâmetros foram inclusas em coeficientes na função objetivo e como parâmetros nas restrições de desigualdade. A robustez do modelo é analisada a partir do uso do método de aproximação da média amostral (*sample average approximation* - SAA). A incerteza dos parâmetros considerados nesta parte inclui o rendimento do processo, das matérias-primas, os preços e menor demanda de mercado do produto.

O problema de integração introduzido nas primeiras partes é novamente abordado. Desta vez, para considerar as diferentes fontes de incertezas nos parâmetros do modelo. A incerteza considerada inclui o preço do petróleo bruto importado, o preço do produto de refinaria, o preço do produto petroquímico, as demandas de mercado da refinaria e da petroquímica. O método de aproximação da média amostral (SAA) está dentro de um esquema iterativo para gerar os cenários necessários e proporcionar a qualidade de solução por medição da folga da solução final (Al-Qahtani e Elkamel, 2010).

Devido às expectativas em torno das reservas do pré-sal, a indústria petroquímica brasileira tem sido objeto de estudos recentes, principalmente no que se refere à integração refino-petroquímica, como abordam os trabalhos de Moreira (2008), Pereira (2010) e Gomes (2011). Além disso, a construção do complexo petroquímico COMPERJ, no Rio de Janeiro, tem sido também um grande estímulo às pesquisas nos setores de óleo e gás e petroquímico. Entretanto, embora diversos trabalhos sobre o setor sejam encontrados na literatura, não há nenhum estudo de planejamento a partir de modelagem matemática.

No trabalho de Moreira (2008) as principais inovações tecnológicas do processo de Craqueamento Catalítico Fluido foram apresentadas. Estas novas tecnologias que influenciam diretamente no rendimento da refinaria e portanto na integração refino-petroquímica, seriam a alternativa ao crescimento da demanda por petroquímicos. Neste trabalho, ainda houve a necessidade de se realizar uma projeção de oferta e demanda dos petroquímicos básicos, reiterando a grande necessidade de investimentos na área, além de uma melhor disposição e organização dos dados deste setor, como informações de preço, demanda, fornecimento das matérias-primas e custos dos processos.

Pereira (2010) fizeram um levantamento dos processos previstos no projeto inicial do COMPERJ, mostrando sua evolução. Na expectativa de implantação do FCC petroquímico, permitindo a integração refino-petroquímica no COMPERJ, a importância estratégica deste processo no atendimento das indústrias envolvidas nesta integração, óleo e gás e petroquímica, também foi ressaltada neste trabalho. Enquanto proporciona maior valor agregado às correntes produzidas para a refinaria, para a petroquímica, fornece as matérias-primas que possuem déficit no que diz respeito ao fornecimento dentro do mercado nacional.

O estudo de Gomes (2011) analisou qualitativa e quantitativamente a integração refino-petroquímica sob os aspectos econômicos, mercadológicos, tecnológicos, ambientais e financeiros. Enquanto a análise qualitativa apresenta um amplo suporte à integração refino-petroquímica, na análise quantitativa, uma comparação entre a rentabilidade de uma refinaria hipotética, que produziria somente combustíveis, e outra integrada à petroquímica é realizada através de uma simulação e otimização das diferentes configurações de refinarias. Os resultados foram analisados, principalmente, sob o ponto de vista da viabilidade tecnológica (aspectos tecnológicos), rentabilidade (aspectos econômicos), investimentos necessários (aspectos financeiros) e emissões de CO₂ (aspectos ambientais).

Embora haja diversos estudos sobre a indústria petroquímica brasileira, cada um com sua importância para o desenvolvimento do setor, este segmento da indústria ainda é rico em possibilidades. Ainda carece de estudos como o desenvolvimento de um modelo de suporte ao planejamento a médio e longo prazo como proposto na presente pesquisa, bem como a criação de um modelo mais voltado ao planejamento intrafirma, de modo a se obter uma ferramenta comercial com grande aplicabilidade para empresas do setor químico e petroquímico.

CAPÍTULO III – METODOLOGIA

Neste capítulo, tópicos como a seleção do modelo utilizado no presente trabalho, dentre os modelos apresentados por Rudd *et al.* (1981), bem como uma avaliação do software utilizado (GAMS) serão discutidos. Outro ponto crítico também será avaliado: a estimação dos parâmetros constituintes das equações do modelo. A saber, este ponto se torna crítico, principalmente devido à indisponibilidade da grande maioria das informações pertinentes.

III.1 – Seleção do modelo

Conforme já discutido no capítulo anterior, embora haja diversos estudos sobre a indústria petroquímica brasileira, o setor ainda carece de estudos de modelagem matemática para suporte ao processo de tomada de decisão e planejamento futuro. Assim, a seleção do modelo não seguiu critérios mais rebuscados, foi baseada na evolução dos estudos de modelagem, partindo de uma modelagem mais simples.

De acordo com a revisão bibliográfica, a modelagem que representa a indústria petroquímica de forma mais simplificada é explicada por Rudd *et al.* (1981) no livro *Petrochemical Technology Assessment*. A maioria dos outros estudos se basearam em modelos semelhantes aos deste trabalho, com alguns incrementos de acordo com a peculiaridade de cada estudo de caso ou motivação.

Outro ponto crítico levado em consideração no processo de escolha do modelo a ser adotado foi a disponibilidade dos dados na literatura. Vários dados de demanda, oferta, produção, preços e coeficientes de processo podem ser apresentados em formatos não adequados para esta análise. Por exemplo, no caso da indústria brasileira, os dados disponibilizados pela ABIQUIM com relação aos ftalatos dibutila (DBP), diisobutila (DIBP), diisodecila (DIDP) e dioctila (DOP) são apresentados conjuntamente, para um grupo cuja denominação genérica é simplesmente ftalatos. Assim, a análise destes dados para o presente trabalho fica prejudicada, pois não há um processo de produção de ftalatos em geral: cada ftalato tem suas características e coeficientes de processo. Além disso, o preço de cada um não é o mesmo. Porém, a estimação do preço com base nos

dados do anuário permite que se estime um preço médio ao conjunto denominado ftalatos.

Diante da necessidade e da responsabilidade de se iniciarem os estudos de modelagem matemática na indústria petroquímica brasileira, a escolha foi pelo modelo mais tradicional, a base dos outros modelos. Assim, a escolha se resume aos dois modelos apresentados por Rudd *et al.* (1981), que apresentam como diferença fundamental a maneira de se tratar o excesso de produção. Enquanto o modelo I trata o excesso de produção através de uma correção com o preço de queima (que representa na verdade o que se deixa de lucrar), no modelo II considera-se que todo o excesso deve ser queimado para geração de energia e abatimento nos custos do setor.

Logo, o primeiro modelo, apresentado na Equação II.1, foi escolhido por sua maior similaridade com a indústria real. Para garantir a funcionalidade do modelo e verificar a utilização do software GAMS para este propósito, foi realizado um pequeno estudo de caso a partir de uma indústria petroquímica fictícia, cuja estrutura é apresentada na Figura III.1.

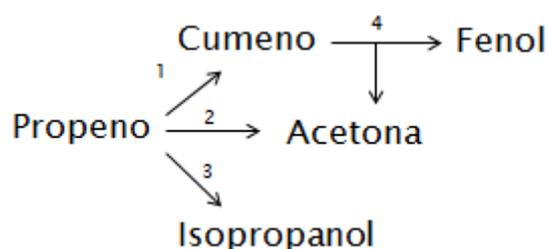


Figura III.1 – Estrutura genérica do estudo de caso.

Na indústria idealizada, o propeno é a única matéria-prima, sendo a base desta indústria petroquímica. Os dados utilizados foram retirados de RUDD *et al* (1981) com base no ano de 1977, são cinco petroquímicos ($i = 5$) e quatro processos de produção ($j = 4$), como mostra a Figura III.1. Os parâmetros utilizados na simulação serão apresentados nas tabelas seguintes, bem como suas unidades.

É importante ressaltar que, embora se tenham disponíveis todos os dados do estudo de caso, a simulação foi realizada nas mesmas condições do trabalho, forçando a demanda pelas matérias-primas a ser nula, garantindo que aquele produto poderá ser totalmente

utilizado na geração de produtos com maior valor agregado na indústria petroquímica. O fornecimento dos produtos petroquímicos finais e intermediários também foi considerado nulo, para garantir que toda a demanda seja produzida na indústria petroquímica local analisada.

As tabelas a seguir apresentam os parâmetros utilizados na simulação do estudo de caso, os valores apresentados são referentes a indústria petroquímica norte americana de 1975 (Rudd *et al.*, 1981).

Tabela III.1 – Dados de demanda (D_i) do estudo de caso.

Petroquímico (i)	D_i (Milhões de libras/ano)
Acetona (1)	990
Cumeno (2)	105
Fenol (3)	1400
Isopropanol (4)	885
Propeno (5)	0

Tabela III.2 – Dados de fornecimento (S_i) do estudo de caso.

Petroquímico (i)	S_i (Milhões de libras/ano)
Acetona (1)	0
Cumeno (2)	0
Fenol (3)	0
Isopropanol (4)	0
Propeno (5)	4150

Tabela III.3 – Dados de preço de venda (P_i) e queima (H_i) do estudo de caso.

Petroquímico (i)	P_i (¢/lb)	H_i (¢/lb)
Acetona (1)	14.50	2.65
Cumeno (2)	13.00	3.74
Fenol (3)	23.00	2.79
Isopropanol (4)	13.00	2.84
Propeno (5)	8.50	3.16

Tabela III.4 – Dados de restrição de capacidade instalada (B_j) dos processos de produção do estudo de caso.

Processo de produção (j)	B_j (Milhões de libras/ano)
Cumeno via reação entre benzeno e propeno (1)	4735
Acetona via oxidação do propeno (2)	970
Isopropanol via hidratação do propeno (3)	2320
Fenol via oxidação do cumeno (4)	2810

Tabela III.5 – Dados de custo (C_j) de produção dos processos do estudo de caso.

Processo de produção (j)	C_j (c/lb)
Cumeno via reação entre benzeno e propeno (1)	15.56
Acetona via oxidação do propeno (2)	29.54
Isopropanol via hidratação do propeno (3)	18.46
Fenol via oxidação do cumeno (4)	32.53

Tabela III.6 – Coeficientes de processo (a_{ij}) do estudo de caso.

a_{ij}	Cumeno via reação entre benzeno e propeno (1)	Acetona via oxidação do propeno (2)	Isopropanol via hidratação do propeno (3)	Fenol via oxidação do cumeno (4)
Acetona (1)	0.00	1.00	0.00	0.61
Cumeno (2)	1.00	0.00	0.00	-1.35
Fenol (3)	0.00	0.00	0.00	1.00
Isopropanol (4)	0.00	0.00	1.00	0.00
Propeno (5)	-0.38	-0.85	-0.83	0.00

Com base nestes dados, a aplicação do modelo e do procedimento de otimização conforme mostra a Figura III.2 (RUDD *et al.*, 1981), resulta em valores de X_j , quantidade produzida pelo processo j , Q_i , quantidade produzida do petroquímico i e F_i , quantidade comprada de fora da rede para atender a superestrutura montada. Neste estudo de caso, todas estas variáveis estão em milhões de libras-massa por ano, e o custo de produção total do setor petroquímico, em milhões de centavos de dólar por ano. Antes de qualquer análise, foi preciso converter o custo para dólares, de modo a evitar erros de arredondamento por operações com diferentes ordens de grandeza.

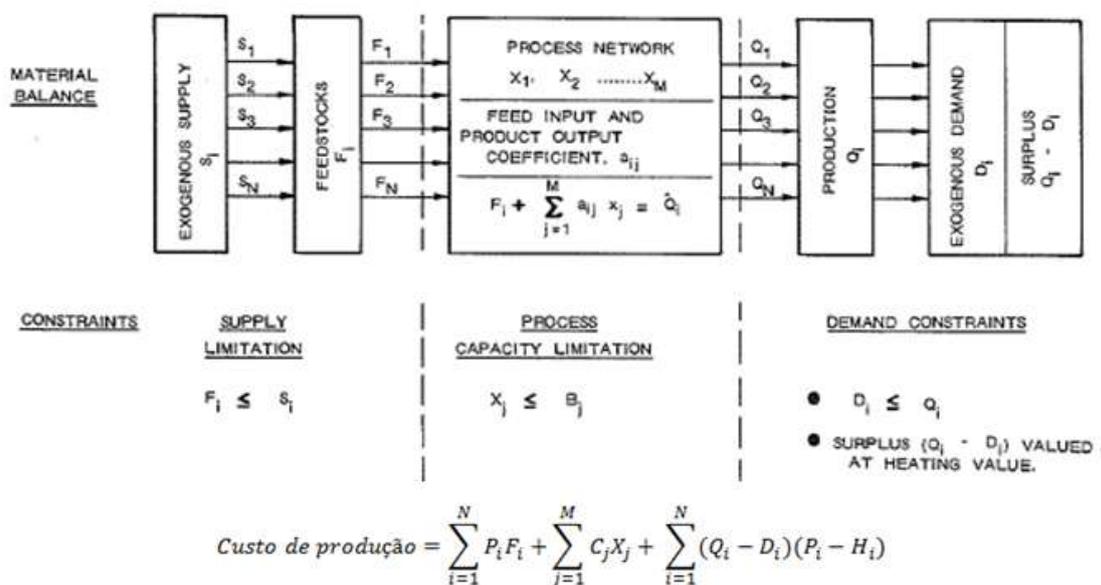


Figura III.2 – Representação esquemática do modelo escolhido (RUDD *et al.*, 1981).

O simples fato de o modelo apresentar uma solução viável, mesmo após as modificações no que diz respeito aos parâmetros de demanda (D_i) e fornecimento (S_i), mostra que o modelo proposto foi bem formulado e pode ser aplicado quando na presença de dados confiáveis.

Tabela III.7 – Resultados de compra de petroquímicos (F_i) de fora da rede proposta no estudo de caso.

Petroquímico (i)	F_i (Milhões de libras/ano)
Acetona (1)	0.00
Cumeno (2)	0.00
Fenol (3)	0.00
Isopropanol (4)	0.00

Propeno (5)	1608.25
-------------	---------

Tabela III.8 – Resultados de quantidade produzida de petroquímicos (Q_i) no estudo de caso.

Petroquímico (i)	Q_i (Milhões de libras/ano)
Acetona (1)	990.00
Cumeno (2)	105.00
Fenol (3)	1400.00
Isopropanol (4)	885.00
Propeno (5)	0.00

Tabela III.9 – Resultados de quantidade produzida pelos processos j (X_j) no estudo de caso.

Processo de produção (j)	X_j (Milhões de libras/ano)
Cumeno via reação entre benzeno e propeno (1)	1995.00
Acetona via oxidação do propeno (2)	136.00
Isopropanol via hidratação do propeno (3)	885.00
Fenol via oxidação do cumeno (4)	1400.00

Neste estudo de caso, o custo anual mínimo da indústria foi calculado em US\$ 1,1061 x 10⁹, ou seja, para esta indústria hipotética, o custo foi mais de 1 bilhão de dólares. Logo, para estruturas maiores, esperamos valores bem mais expressivos e, conseqüentemente, o planejamento vai se tornando cada vez mais necessário e importante na redução destes valores bilionários, reiterando a importância destes estudos.

Conforme visto na Tabela III.9, o processo de produção de acetona, $j = 2$, sozinho, não atingiria a demanda por este petroquímico. Contudo, a amônia é um subproduto da produção de fenol pelo processo 4; assim, de acordo com os valores percebe-se que os investimentos no processo de produção de acetona, nesta indústria hipotética, dependerão sobretudo da demanda por fenol. Caso a demanda cresça muito, podemos alcançar um cenário onde toda a acetona seja produzida como subproduto do fenol.

Dessa forma, os investimentos na produção de acetona devem ser acompanhados de um estudo sobre a demanda por fenol, pois pode ser mais lucrativo para um investidor alocar recursos financeiros na otimização do processo de produção de fenol, com o

objetivo de produzir mais fenol e acetona a um menor custo, atendendo à demanda por estes dois importantes petroquímicos.

III.2 – Busca e estimação de parâmetros

Após a seleção do modelo matemático a ser utilizado, houve a necessidade de um intenso levantamento de dados. Com base no anuário da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) de 2012 (ABIQUIM, 2012), foi traçado um perfil dos produtos que deveriam compor a indústria petroquímica nacional. Desta forma, os produtos apresentados na Tabela III.10 foram incluídos como parte deste segmento da indústria química. Os produtos marcados em amarelo são as matérias-primas da rede petroquímica estando, portanto, sujeitas à anulação dos valores de demanda, visando a garantir que sejam utilizadas para produção dos petroquímicos intermediários e finais.

Tabela III.10 – Produtos que compõem a superestrutura da rede petroquímica brasileira (ABIQUIM, 2012).

i	Produtos	i	Produtos
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)
2	2 Etil-Hexanol	32	Metacrilato de Etila
3	Acetona	33	Metacrilato de Metila
4	Ácido Adípico	34	Metanol
5	Ácido Nítrico	35	m-Xileno
6	Ácido Sulfúrico	36	Nafta
7	Ácido Tereftálico (TPA)	37	n-Butano
8	Acrilonitrila	38	n-Butanol
9	Amônia	39	Nitrato de Amônio
10	Anidrido Ftálico	40	Óxido de Eteno
11	Anidrido Maleico	41	Óxido de Propeno
12	Benzeno	42	o-Xileno
13	Bisfenol A	43	Polibutadieno (PB)
14	Butadieno	44	Policarbonato (PC)
15	Caprolactama	45	Policloreto de Vinila (PVC)
16	Cloreto de Vinila (MVC)	46	Poliestireno (PS)
17	Cloro	47	Polietileno (HDPE e LDPE)
18	Cumeno	48	Polietilenoglicol
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	49	Polietilenotereftalato (PET)
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno)	50	Polipropileno (PP)

	Monômero)		
21	Estireno	51	Polipropilenoglicol
22	Etano	52	Propano
23	Etanolaminas	53	Propeno
24	Eteno	54	Propilenoglicol
25	Etilbenzeno	55	p-Xileno
26	Etilenoglicol	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)
27	Fenol	57	Soda
28	Formaldeído	58	Sulfato de Amônio
29	Ftalatos	59	Tolueno
30	Gás Natural	60	Uréia

De posse das informações sobre os produtos da indústria petroquímica nacional, o trabalho de levantamento de dados começou de forma a atender todos os parâmetros do modelo (D_i , S_i , P_i , H_i , B_j , C_j e a_{ij}).

III.2.1 – Estimação da demanda (D_i)

Os dados sobre demanda não se encontram explícitos na literatura. Como não houve nenhum trabalho do gênero, não existem referências além do anuário da ABIQUIM (ABIQUIM, 2012). De forma a contornar estes imprevistos, diversas maneiras de calcular os valores deste parâmetro com os dados disponíveis foram estudadas. Assim, concluiu-se que o consumo aparente (CA) pode representar a demanda de maneira inequívoca, já que representa o que foi consumido de determinado produto no país, ou seja, de maneira mais simplificada: $CA = \text{Produção} + \text{Importação} - \text{Exportação}$.

Tabela III.11 – Demanda dos produtos da indústria petroquímica brasileira.

I	Produtos	D_i (t/ano)	I	Produtos	D_i (t/ano)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	400025.60	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	6514.00
2	2 Etil-Hexanol	100742.70	32	Metacrilato de Etila	29567.90
3	Acetona	112883.80	33	Metacrilato de Metila	22605.90
4	Ácido Adípico	37619.20	34	Metanol	884029.70
5	Ácido Nítrico	491561.30	35	m-Xileno	22020.00
6	Ácido Sulfúrico	7286292.70	36	Nafta	0.00
7	Ácido Tereftálico (TPA)	592457.20	37	n-Butano	0.00
8	Acrilonitrila	23947.90	38	n-Butanol	123202.70

9	Amônia	1671744.80	39	Nitrato de Amônio	1942778.30
10	Anidrido Ftálico	97384.10	40	Óxido de Eteno	261133.83
11	Anidrido Maleico	33430.80	41	Óxido de Propeno	131964.30
12	Benzeno	646049.60	42	o-Xileno	76307.60
13	Bisfenol A	18447.50	43	Polibutadieno (PB)	63642.10
14	Butadieno	256942.60	44	Policarbonato (PC)	47191.20
15	Caprolactama	63626.30	45	Policloreto de Vinila (PVC)	942539.51
16	Cloreto de Vinila (MVC)	700218.60	46	Poliestireno (PS)	373396.20
17	Cloro	1231081.60	47	Polietileno (HDPE e LDPE)	2133090.00
18	Cumeno	160000.00	48	Polietilenoglicol	6500.82
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	169986.62	49	Polietilenotereftalato (PET)	522174.20
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	22029.40	50	Polipropileno (PP)	1391746.70
21	Estireno	633180.40	51	Polipropilenoglicol	6637.10
22	Etano	0.00	52	Propano	0.00
23	Etanolaminas	83702.47	53	Propeno	2042160.90
24	Eteno	3111429.80	54	Propilenoglicol	34615.20
25	Etilbenzeno	540139.80	55	p-Xileno	19597.50
26	Etilenoglicol	445882.09	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	61800.70
27	Fenol	97462.40	57	Soda	2505270.80
28	Formaldeído	480697.90	58	Sulfato de Amônio	2327113.90
29	Ftalatos	71785.20	59	Tolueno	0.00
30	Gás Natural	0.00	60	Uréia	4513596.30

A Tabela III.11 representa os valores calculados para o consumo aparente de cada produto com base nos valores de importação, exportação e produção do anuário da ABIQUIM. Porém, como algumas empresas do ramo não declararam a produção, admitiu-se que a demanda é igual a um percentual da capacidade instalada (75-85%) para estimar as produções não declaradas, apesar do erro associado a este procedimento.

III.2.2 – Estimação do fornecimento (S_i)

Os limites de fornecimento (S_i) representam um importante parâmetro, pois delimitam o quanto de matéria-prima poderá ser utilizada dentro da superestrutura. As estimativas

foram baseadas nos dados de produção das matérias-primas da indústria petroquímica nacional. Como os dados de produção não são aplicados diretamente no modelo, pois uma das variáveis de resposta corresponde exatamente à produção dos petroquímicos (Q_i), os dados de produção da ABIQUIM podem representar bem a quantidade de matéria-prima disponível no mercado.

A Tabela III.12 apresenta os valores retirados do anuário da ABIQUIM de 2012 (ABIQUIM, 2012). Ressalta-se que alguns valores não apresentados (como os dados referentes a propano, etano e gás natural, por exemplo), foram retirados diretamente dos relatórios da principal empresa do setor, a Petrobras (PETROBRAS, 2012; PETROBRAS, 2013). Assim, com bases nestes relatórios, foi possível completar as informações do anuário para montar a tabela III.12.

Tabela III.12 – Limites de fornecimento aos produtos da indústria petroquímica brasileira.

I	Produtos	Si (t/ano)	I	Produtos	Si (t/ano)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	0.00	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	0.00
2	2 Etil-Hexanol	0.00	32	Metacrilato de Etila	0.00
3	Acetona	0.00	33	Metacrilato de Metila	0.00
4	Ácido Adípico	0.00	34	Metanol	0.00
5	Ácido Nítrico	0.00	35	m-Xileno	113525.10
6	Ácido Sulfúrico	0.00	36	Nafta	6740000.00
7	Ácido Tereftálico (TPA)	0.00	37	n-Butano	500000.00
8	Acrilonitrila	0.00	38	n-Butanol	0.00
9	Amônia	0.00	39	Nitrato de Amônio	0.00
10	Anidrido Ftálico	0.00	40	Óxido de Eteno	0.00
11	Anidrido Maleico	0.00	41	Óxido de Propeno	0.00
12	Benzeno	0.00	42	o-Xileno	0.00
13	Bisfenol A	0.00	43	Polibutadieno (PB)	0.00
14	Butadieno	0.00	44	Policarbonato (PC)	0.00
15	Caprolactama	0.00	45	Policloreto de Vinila (PVC)	0.00
16	Cloreto de Vinila (MVC)	0.00	46	Poliestireno (PS)	0.00
17	Cloro	0.00	47	Poliétileno (HDPE e LDPE)	0.00
18	Cumeno	0.00	48	Poliétilenoglicol	0.00
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	0.00	49	Poliétilenotereftalato (PET)	0.00

20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	0.00	50	Polipropileno (PP)	0.00
21	Estireno	0.00	51	Polipropilenoglicol	0.00
22	Etano	1790000.00	52	Propano	21000000.00
23	Etanolaminas	0.00	53	Propeno	0.00
24	Eteno	0.00	54	Propilenoglicol	0.00
25	Etilbenzeno	0.00	55	p-Xileno	0.00
26	Etilenoglicol	0.00	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	0.00
27	Fenol	0.00	57	Soda	1353071.00
28	Formaldeído	0.00	58	Sulfato de Amônio	0.00
29	Ftalatos	0.00	59	Tolueno	204949.90
30	Gás Natural	13800000.00	60	Uréia	0.00

III.2.3 – Estimação do preço dos petroquímicos (P_i)

Diante da indisponibilidade destes valores na literatura e da falta de resposta das empresas produtoras, este parâmetro se tornou um dos maiores problemas do levantamento de dados, juntamente com os custos dos processos de produção. Após diversas tentativas para a estimação dos preços, decidiu-se utilizar os valores FOB (*Free on Board*) de importação e exportação para estimá-los, ponderando-os pelos volumes de importação e exportação.

O valor FOB considera o valor da mercadoria acrescido das despesas com o transporte até o porto de partida da mercadoria. Assim, o valor FOB de exportação, geralmente expresso em dólar, representa bem o valor de determinado petroquímico em território nacional. Porém, quando trabalhamos com os valores FOB de importação, o valor da mercadoria não considera a chegada no porto de destino, ou seja, não representa o custo do produto em território brasileiro.

O valor CIF (*Cost, Insurance and Freight*) considera os encargos da mercadoria até o porto de destino. Logo, se no FOB a responsabilidade do exportador acaba quando a mercadoria entra no navio, no CIF ela só termina quando a carga chega ao seu destino. Porém, como o anuário só apresenta os valores em US\$1000 FOB, os encargos com

seguro da mercadoria e tarifas internacionais foram desprezados, devido à indisponibilidade de seus valores, aumentando o erro associado a este parâmetro, principalmente para os produtos com maior volume de importação.

O preço foi calculado a partir de uma média entre os valores FOB (I_{FOB} e E_{FOB}) e os volumes de importação e exportação (I e E, respectivamente). A fórmula pode ser expressa da seguinte maneira: $P = (I_{FOB} + E_{FOB}) / (I + E)$. O valor final de P é expresso em milhares de dólares por tonelada. Para converter estes valores para moeda brasileira, foi necessário converter os valores para real através da cotação média de 2011 para o dólar, pois os dados do anuário correspondem ao ano de 2011. Segundo o site da ACINH (Associação, Comercial, Industrial e de Serviços de Novo Hamburgo), a cotação média em 2011 foi R\$ 1,67 para cada dólar.

A Tabela III.13 apresenta os valores de P_i já calculados e corrigidos monetariamente a partir dos dados retirados do anuário da ABIQUIM de 2012. Outra possibilidade para obter os preços dos produtos seria a correção dos valores apresentados por RUDD *et al* (1981) com relação a inflação e à moeda. Mas esta opção poderia acarretar erros grosseiros, pois os preços apresentados nesta referência refletem um momento diferente da economia dos Estados Unidos. Com esta metodologia, a petroquímica americana em 1977 estaria sendo comparada à petroquímica brasileira em 2011, ano base dos dados da ABIQUIM.

Tabela III.13 – Preço de venda (P_i) dos petroquímicos da indústria nacional, estimados através do valor FOB (ABIQUIM, 2012).

i	Produtos	P_i (R\$/t)	i	Produtos	P_i (R\$/t)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	5656.55	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	25272.67
2	2 Etil-Hexanol	3339.81	32	Metacrilato de Etila	7570.28
3	Acetona	1759.70	33	Metacrilato de Metila	4285.22
4	Ácido Adípico	3598.22	34	Metanol	614.46
5	Ácido Nítrico	1142.40	35	m-Xileno	1786.83
6	Ácido Sulfúrico	159.95	36	Nafta	1541.15
7	Ácido Tereftálico (TPA)	2223.21	37	n-Butano	835.00

8	Acrilonitrila	3835.36	38	n-Butanol	2464.35
9	Amônia	916.09	39	Nitrato de Amônio	568.14
10	Anidrido Ftálico	2324.04	40	Óxido de Eteno	3198.04
11	Anidrido Maleico	2690.81	41	Óxido de Propeno	3420.70
12	Benzeno	1809.47	42	o-Xileno	1950.72
13	Bisfenol A	3256.72	43	Polibutadieno (PB)	6532.86
14	Butadieno	4484.88	44	Policarbonato (PC)	4587.12
15	Caprolactama	5248.94	45	Policloreto de Vinila (PVC)	2049.59
16	Cloreto de Vinila (MVC)	13041.90	46	Poliestireno (PS)	3370.22
17	Cloro	255.85	47	Polietileno (HDPE e LDPE)	2552.69
18	Cumeno	2100.00	48	Polietilenoglicol	3076.83
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	3198.14	49	Polietilenotereftalato (PET)	2922.69
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	5924.20	50	Polipropileno (PP)	2864.72
21	Estireno	2358.00	51	Polipropilenoglicol	5767.76
22	Etano	525.00	52	Propano	600.00
23	Etanolaminas	2575.45	53	Propeno	2318.13
24	Eteno	2137.64	54	Propilenoglicol	2752.52
25	Etilbenzeno	2424.37	55	p-Xileno	2576.95
26	Etilenoglicol	1882.31	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	3653.73
27	Fenol	2756.43	57	Soda	567.30
28	Formaldeído	1279.56	58	Sulfato de Amônio	391.76
29	Ftalatos	3708.03	59	Tolueno	1663.82
30	Gás Natural	605.43	60	Uréia	726.03

III.2.4 – Estimação do preço de queima (H_i)

Os preços de queima também poderiam ser corrigidos, assim como os preços de venda dos petroquímicos, pois o livro de Rudd *et al.* (1981) apresentava todos estes valores referentes à petroquímica americana de 1975 e 1977. Porém, conforme explicado na seção anterior, os erros associados seriam grosseiros. Assim, a estimação do preço de queima foi desta vez baseada na sua própria definição.

O cálculo dos valores de H_i foi feito com base na entalpia de combustão de cada composto petroquímico da estrutura analisada. De posse deste valor em MBTU/kg e do preço da energia no Brasil, consegue-se encontrar o H_i em R\$/t. O preço da energia elétrica no Brasil foi obtido através de reportagens que indicam que o valor pago no país é um dos mais caros do mundo. O valor divulgado pelo site G1, de 292,70 R\$/MWh ou 85,78 R\$/MBTU para o ano de 2013 foi multiplicado pela entalpia de combustão de cada petroquímico, apresentada na Tabela III.14, para gerar os valores de H_i apresentados na Tabela III.15. O ano base foi modificado devido à grande flutuação do preço da energia elétrica no país nos últimos anos. Em 2013 o valor apresentado se aproxima muito da média do valor nos últimos anos.

Tabela III.14 – Entalpia de combustão dos petroquímicos da indústria nacional.

i	Produtos	Entalpia (MBTU/Kg)	i	Produtos	Entalpia (MBTU/Kg)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	0.01096	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	0.00000
2	2 Etil-Hexanol	0.03876	32	Metacrilato de Etila	0.01782
3	Acetona	0.02947	33	Metacrilato de Metila	0.02222
4	Ácido Adípico	0.01829	34	Metanol	0.02169
5	Ácido Nítrico	0.00000	35	m-Xileno	0.04100
6	Ácido Sulfúrico	0.00000	36	Nafta	0.04556
7	Ácido Tereftálico (TPA)	0.01856	37	n-Butano	0.04731
8	Acrilonitrila	0.01913	38	n-Butanol	0.03451
9	Amônia	0.01596	39	Nitrato de Amônio	0.00000
10	Anidrido Ftálico	0.02120	40	Óxido de Eteno	0.02742
11	Anidrido Maleico	0.01356	41	Óxido de Propeno	0.03193
12	Benzeno	0.04000	42	o-Xileno	0.04111
13	Bisfenol A	0.03062	43	Polibutadieno (PB)	0.00000
14	Butadieno	0.04493	44	Policarbonato (PC)	0.00000
15	Caprolactama	0.02778	45	Policloreto de Vinila (PVC)	0.00000
16	Cloreto de Vinila (MVC)	0.01818	46	Poliestireno (PS)	0.00000
17	Cloro	0.00000	47	Polietileno (HDPE e LDPE)	0.00000
18	Cumeno	0.04151	48	Polietilenoglicol	0.00000

19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	0.03111	49	Polietilenotereftalato (PET)	0.00000
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	0.00000	50	Polipropileno (PP)	0.00000
21	Estireno	0.04022	51	Polipropilenoglicol	0.00000
22	Etano	0.04956	52	Propano	0.04811
23	Etanolaminas	0.00000	53	Propeno	0.04676
24	Eteno	0.04809	54	Propilenoglicol	0.02269
25	Etilbenzeno	0.04111	55	p-Xileno	0.04104
26	Etilenoglicol	0.01818	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	0.00000
27	Fenol	0.03100	57	Soda	0.00000
28	Formaldeído	0.01818	58	Sulfato de Amônio	0.00000
29	Ftalatos	0.00000	59	Tolueno	0.04056
30	Gás Natural	0.11111	60	Uréia	0.01004

Tabela III.15 – Preço de queima (H_i) dos petroquímicos da indústria nacional.

i	Produtos	H _i (R\$/t)	i	Produtos	H _i (R\$/t)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	939.80	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	0.00
2	2 Etil-Hexanol	3324.57	32	Metacrilato de Etila	1529.00
3	Acetona	2527.74	33	Metacrilato de Metila	1906.29
4	Ácido Adípico	1568.87	34	Metanol	1860.54
5	Ácido Nítrico	0.00	35	m-Xileno	3517.10
6	Ácido Sulfúrico	0.00	36	Nafta	3907.89
7	Ácido Tereftálico (TPA)	1591.75	37	n-Butano	4058.49
8	Acrilonitrila	1641.31	38	n-Butanol	2960.46
9	Amônia	1368.71	39	Nitrato de Amônio	0.00
10	Anidrido Ftálico	1818.60	40	Óxido de Eteno	2456.75
11	Anidrido Maleico	1162.84	41	Óxido de Propeno	2739.34
12	Benzeno	3431.32	42	o-Xileno	3526.63
13	Bisfenol A	2626.86	43	Polibutadieno (PB)	0.00
14	Butadieno	3854.51	44	Policarbonato (PC)	0.00

15	Caprolactama	2382.86	45	Policloreto de Vinila (PVC)	0.00
16	Cloreto de Vinila (MVC)	1559.34	46	Poliestireno (PS)	0.00
17	Cloro	0.00	47	Polietileno (HDPE e LDPE)	0.00
18	Cumeno	3560.95	48	Polietilenoglicol	0.00
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	2668.80	49	Polietilenotereftalato (PET)	0.00
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	0.00	50	Polipropileno (PP)	0.00
21	Estireno	3450.38	51	Polipropilenoglicol	0.00
22	Etano	4251.02	52	Propano	4127.11
23	Etanolaminas	0.00	53	Propeno	4010.83
24	Eteno	4125.21	54	Propilenoglicol	1946.32
25	Etilbenzeno	3526.63	55	p-Xileno	3520.91
26	Etilenoglicol	1559.34	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	0.00
27	Fenol	2659.27	57	Soda	0.00
28	Formaldeído	1559.34	58	Sulfato de Amônio	0.00
29	Ftalatos	0.00	59	Tolueno	3478.98
30	Gás Natural	9531.44	60	Uréia	861.64

III.2.5 – Estimação da restrição de capacidade (B_j)

Como ressaltado em diversos pontos do trabalho, a dificuldade de acesso à maioria dos dados necessários é uma característica marcante da indústria química brasileira. Logo, não é possível ter acesso a todos os processos de produção das empresas do ramo. Foi feito um levantamento junto ao trabalho de Rudd *et al.* (1981) para saber quais tecnologias caíram em desuso, pois na falta de dados de processo, a base para montar os processos da petroquímica brasileira foi a lista de processos apresentada no livro *Petrochemical Technology Assessment* (RUDD *et al.*, 1981).

Outro fator relevante na seleção dos processos foi a presença do reagente principal na lista de processos da indústria petroquímica brasileira. Se o reagente principal não fazia

parte dos produtos listados como parte deste setor, o processo era eliminado da listagem imediatamente. Após estes critérios de seleção, a listagem final contemplou 86 processos. Destes 86 processos, vale ressaltar que 4 processos foram inclusos com base em dados externos à listagem de Rudd *et al.* (1981).

Dois processos foram adicionados aos listados na referência anterior: a produção de nitrato de amônio (via reação entre amônia e ácido nítrico) e a produção de LAB/LAS, (em diversas etapas partindo da alquilação do benzeno). Porém, como estas duas reações são de conhecimento geral, não houve dificuldade no cálculo dos coeficientes técnicos.

Os outros dois processos se referem à produção das etanolaminas e dos ftalatos, dois grupos de produtos químicos listados na estrutura petroquímica proposta como um único produto (os dados apresentados pela ABIQUIM agrupam estes produtos). Assim, para facilitar, as reações para a produção de etanolaminas, mostradas na Figura III.3, foram condensadas em uma reação única. Esta reação única considera a reação entre óxido de eteno e amônia gerando etanolaminas, considerando excesso de óxido de eteno, ou seja, uma reação genérica que considera a formação de uma mistura de etanolaminas.

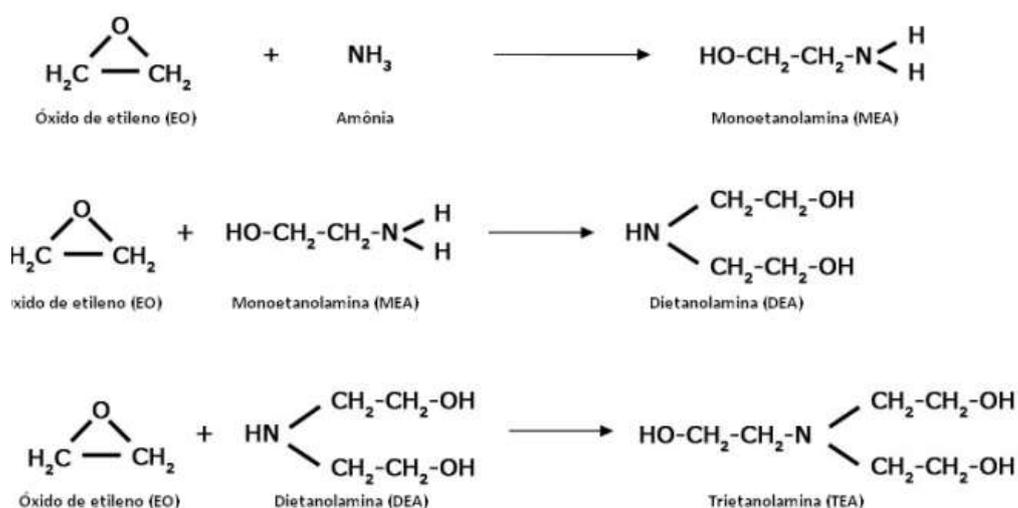


Figura III.3 – Reações de formação das etanolaminas (OXITENO, 2014).

No caso das reações de produção de ftalatos, diante da indisponibilidade de dados, a solução foi buscar no site da Elekeiroz, empresa responsável pela produção deste grupo

de petroquímicos no Brasil, as reações de formação e selecionar uma delas para representar estes produtos conforme a classificação da ABIQUIM . Segundo o manual completo da Elekeiroz, a reação de formação do dibutil-ftalato (DBP) foi escolhida para representar os ftalatos de maneira genérica.

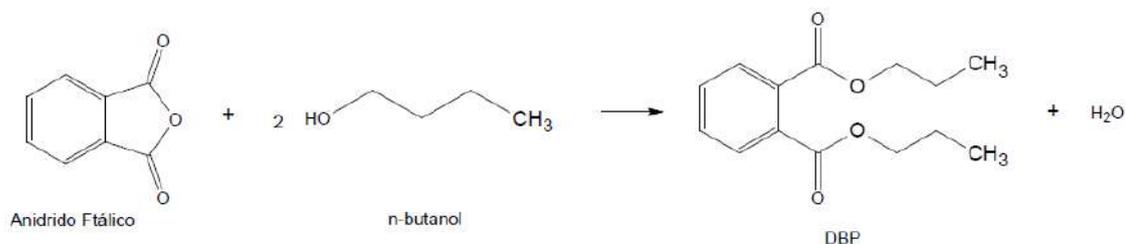


Figura III.4 – Reação de formação do DBP (ELEKEIROZ, 2014).

Assim, após a delimitação dos processo, as restrições de capacidade instalada (B_j) foram facilmente encontradas no anuário da ABIQUIM (ABIQUIM, 2012). Porém, uma ressalva importante deve ser feita para os produtos com mais de uma rota de produção. Não foi possível saber a parte da capacidade total instalada fornecida pela ABIQUIM correspondente a cada rota de produção. Assim, a capacidade total fornecida pela ABIQUIM foi utilizada como limite em todas as rotas.

O erro associado pode suprimir informações de rotas tecnológicas diferentes que são utilizadas na produção de determinados petroquímicos, por questões particulares de cada empresa, como proximidade das matérias-primas, por exemplo. O resultado gerado pode indicar que um destes processos não é utilizado, pois o limite superior é o limite total, de todos os processos, fornecidos no anuário. Assim, a busca pela melhor rota vai ser baseada quase que inteiramente no custo do processo. A Tabela III.16 mostra os dados de capacidade instalada, limite máximo de produção, e a lista dos processos admitidos na petroquímica brasileira.

Tabela III.16 – Restrição de limite de produção dos processos (B_j).

Processo de produção	J	B_j (t/ano)	Processo de produção	j	B_j (t/ano)
1,2-Dicloroetano via cloração de eteno	1	1080000.00	Óxido de eteno via oxidação de eteno (oxigênio)	44	500000.00

2 – Etilhexanol via processo OXO	2	150000.00	Óxido de propeno via oxidação de propeno	45	235000.00
Acetona via oxidação do propeno	3	119000.00	Propilenoglicol via hidratação de óxido de propeno	46	86000.00
Ácido adípico via oxidação do ciclohexanol com ácido nítrico	4	87000.00	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-Isolene)	47	203000.00
Ácido nítrico, 95%, via amônia	5	661660.00	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	48	203000.00
Ácido sulfúrico via processo de absorção dupla	6	8213054.00	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-Isolene)	49	126000.00
Ácido tereftálico, cru, via p-xileno	7	250000.00	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	50	126000.00
Acrilonitrila via amoxidação do propeno	8	100000.00	Uréia via processo de reciclo total	51	1782000.00
Amônia via reforma do gás natural	9	1588010.00	Uréia via amônia e dióxido de carbono	52	1782000.00
Amônia via reforma de nafta	10	1588010.00	Produção de LAB/LAS	53	10000.00
Anidrido ftálico a partir de o-xileno	11	152000.00	SBR via polimerização por emulsão a frio	54	107700.00
Anidrido maléico via oxidação de benzeno	12	30000.00	SBR via polimerização por solução	55	107700.00
Benzeno via desproporcionação do tolueno	13	999076.00	SBR via polimerização por emulsão a quente	56	107700.00
Benzeno via hidrodealquilação do tolueno	14	999076.00	EPDM via polimerização por solução	57	42000.00
Bisfenol A via reação de fenol e acetona	15	28000.00	EPDM via polimerização por suspensão	58	42000.00
Butadieno via desidrogenação do n-butano	16	466000.00	PB via catalisador de cobalto	59	14250.00
Caprolactama via fenol	17	56000.00	PB via catalisador iodo-ziegler	60	14250.00
Cumeno via benzeno e propeno	18	320000.00	PB via catalisador de níquel	61	14250.00
Cloreto de vinila a partir de eteno	19	843100.00	PC via solução contínua	62	15000.00
Cloreto de vinila via 1,2-Dicloroetano	20	843100.00	PC via fosgenação interfacial	63	15000.00
Cloro via eletrólise de cloreto de sódio	21	1520949.00	PC via bath solution	64	15000.00
Diisocianato de Difenilmetano (MDI) via	22	190000.00	PVC via polimerização bulk	65	728500.00

anilina e foscênio					
Estireno via etilbenzeno (desidrogenação)	23	540000.00	PVC via polimerização por suspensão	66	728500.00
Estireno via etilbenzeno (processo hidroperóxido)	24	540000.00	PVC via polimerização por emulsão	67	728500.00
Eteno via craqueamento de etano-propano (50-50 %m)	25	3952000.00	PVC via polimerização por emulsão (bath process)	68	728500.00
Eteno via craqueamento de nafta (alta severidade)	26	3952000.00	PS via polimerização bulk	69	585500.00
Eteno via pirólise de etano	27	3952000.00	PS via polimerização por suspensão	70	585500.00
Eteno via pirólise de propano	28	3952000.00	PS via polimerização bulk/suspensão	71	585500.00
Etilbenzeno via alquilação do benzeno	29	770000.00	PE HD via tecnologia Union Carbide	72	3035000.00
Etilenoglicol via hidratação de óxido de eteno	30	500000.00	PE HD via tecnologia HOECHST	73	3035000.00
Etilenoglicol via oxidação de eteno	31	500000.00	PE HD via tecnologia Stamicarbom	74	3035000.00
Fenol via oxidação do cumeno	32	196400.00	PE HD via tecnologia Montedison	75	3035000.00
Fenol via sulfonação do benzeno	33	196400.00	PE LD via reação em autoclave	76	3035000.00
Formaldeído via oxidação do metanol	34	787600.00	PE LD via reação em autoclave de mistura	77	3035000.00
Metacrilato de metila a partir de acetona	35	100000.00	PE LD em reator tubular	78	3035000.00
Metacrilato de etila a partir de acetona	36	50000.00	Polietilenoglicol a partir de óxido de eteno	79	10000.00
Produção de Etanolaminas	37	142857.14	PET a partir de DMT e etilenoglicol	80	585000.00
Ftalatos a partir de n-butanol	38	266000.00	PET a partir de ácido tereftálico e etilenoglicol	81	585000.00
Nitrato de amônio via ácido nítrico e amônia	39	573002.00	Polipropilenoglicol a partir de óxido de propeno	82	10000.00
Metanol via gás natural (metano)	40	309500.00	PP via processo em fase líquida	83	1965000.00
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de cobalto-fosfina	41	150000.00	PP via processo em fase vapor	84	1965000.00
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de ródio	42	150000.00	PP via processo em lama	85	1965000.00
Óxido de eteno via oxidação de eteno (ar)	43	500000.00	PP via processo em solução	86	1965000.00

III.2.6 – Estimação dos custos de processo (C_j)

Os custos referentes aos processos de produção são baseados em quatro parcelas que se referem ao custo fixo I_j , mão-de-obra L_j , custo com catalisadores e aditivos M_j e utilidades U_j . Porém, como mostra a Figura III.5, Rudd *et al.* (1981) calculam este custo sem explicitar estas variáveis. Na verdade, os autores consideram três parcelas no cálculo, a primeira (A), que se refere aos gastos com matérias-primas, catalisadores e aditivos, a segunda (B) aos gastos com utilidades, calculados a partir do preço da energia elétrica (já que os dados são apresentados em toneladas de óleo combustível equivalente), e a terceira (C) aos gastos com mão-de-obra e manutenção da unidade, que representa os gastos com reparos e outras atividades visando o bom funcionamento da planta (RUDD *et al.*, 1981). Estas parcelas englobam os quatro subcustos apresentados: I_j , L_j , M_j e U_j .

I. Input/Output Data—Feedstocks, Products, and By-Products (lb/lb of Phenol)					
1. Phenol	1.00		5. Hydrogen		-0.001
2. Cumene	-1.35		6. Sodium carbonate		-0.003
3. Caustic soda	-0.0099		7. Carbon dioxide		-0.002
4. Sulfuric acid	-0.01		8. Acetone		0.61

II. Process Cost Data (1977 Basis)						
A. Feedstocks and Chemicals Costs Less By-Product Credits						
	¢/lb	¢/lb of Phenol		¢/lb	¢/lb of Phenol	
1. Cumene	13	17.55	5. Sodium Carbonate	4.8	0.015	
2. Caustic soda	7.5	0.074	6. Carbon dioxide	0.30	0.000	
3. Sulfuric acid	2.25	0.023	7. Acetone	14.5	-8.845	
4. Hydrogen	25	0.025	8. Fuel		-0.09	
		Total = 8.75			¢/lb of phenol	
B. Utilities Costs						
	Requirement ¹	Unit Cost, ¢	¢/lb of Phenol	Requirement ¹	Unit Cost, ¢	¢/lb of Phenol
1. Electricity, KWH	0.139	1.7	0.236	4. Water-Process/Cooling		0.057
2. Steam, lbs	5.05	0.22	1.111	5. Inert gas, SCF	0.04	0.0016
3. Fuel, MBTU	0.0002	200	0.04			
			Total = 1.45			¢/lb of phenol
C. Fixed Costs						
			1. Labor-related costs ² = 1.42		¢/lb of phenol	
			2. Investment-related costs ³ = 9.89		¢/lb of phenol	
			Total production cost (A + B + C) = 21.51 ¢/lb of phenol			

¹ Requirement = consumption per pound of phenol.

² Labor-related costs = Operating labor, maintenance labor, control laboratory, and plant overhead.

³ Investment-related costs = ROI, maintenance materials, operating supplies, taxes, insurance, and depreciation.

Figura III.5 – Cálculo dos custos referentes aos processos de produção (C_j) (RUDD *et al.*, 1981)

Para o cálculo dos custos apresentados na Tabela III.17, foi seguida a metodologia apresentada na Figura III.5, baseada em três custos (A, B e C). Para o cálculo do custo A, a metodologia foi seguida à risca, se baseando nos coeficientes a_{ij} e nos preços P_i . Porém, o cálculo dos custos B e C foi feito com algumas adaptações.

O custo B foi calculado a partir dos dados fornecidos por RUDD *et al.* (1981) sobre o gasto com utilidades e energia em cada processo, apresentados em FOET (toneladas de óleo combustível equivalentes). Sabendo que 1 FOET corresponde a 4,54 MWh, admitindo 39% de eficiência na conversão, segundo a World Energy Council, foi possível calcular o custo B a partir do preço da energia elétrica no Brasil (R\$ 292,70), conforme apresentado pelo site G1.

O custo C, referente aos custos com mão-de-obra e manutenção, foi calculado com base nos dados de custo unitário de mão-de-obra da ABIQUIM. Os custos com o pagamento dos funcionários, em geral, são maiores do que os custos com manutenção, devido aos encargos pagos pelas empresas, e pelo simples fato de que os gastos com manutenção são inconstantes, ou seja, nem sempre são gastos programados e certos.

O valor apresentado no anuário da ABIQUIM sugere que o custo unitário com mão-de-obra gira em torno de US\$ 41,49 por hora (ABIQUIM, 2012), cerca de R\$ 412.244,64 por ano (considerando uma jornada diária de 12 horas de trabalho). Este valor fornecido contempla todos os gastos da empresa com o funcionário, desde o salário propriamente dito até os mais diversos benefícios e auxílios, passando também pelos encargos fiscais.

Para obter o custo C, ainda é necessário multiplicar este valor pelo número de funcionários e dividir pela quantidade produzida do produto principal, dado fornecido pela ABIQUIM obtendo o custo C em R\$/t. O número de funcionários foi estimado comparando a produção e a capacidade instalada dos produtos e com base nos dados sobre a complexidade dos processos de produção (RUDD *et al.*, 1981). A Tabela III. 17 apresenta os valores dos custos dos procesos (C_j).

Tabela III.17 – Custo de produção dos processos da indústria petroquímica (C_j).

Processo de produção	j	C _j (R\$/t)	Processo de produção	j	C _j (R\$/t)
1,2-Dicloroetano via cloração de eteno	1	2437.29	Óxido de eteno via oxidação de eteno (oxigênio)	44	5683.89
2 – Etilhexanol via processo OXO	2	5784.47	Óxido de propeno via oxidação de propeno	45	3642.19
Acetona via oxidação do propeno	3	4010.23	Propilenoglicol via hidratação de óxido de propeno	46	4609.50
Ácido adípico via oxidação do ciclohexanol com ácido nítrico	4	4736.79	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-Isolene)	47	4766.16
Ácido nítrico, 95%, via amônia	5	2143.33	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	48	3798.79
Ácido sulfúrico via processo de absorção dupla	6	654.29	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-Isolene)	49	3436.76
Ácido tereftálico, cru, via p-xileno	7	9297.64	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	50	3407.79
Acrilonitrila via amoxidação do propeno	8	5169.93	Uréia via processo de reciclo total	51	2271.97
Amônia via reforma do gás natural	9	2998.59	Uréia via amônia e dióxido de carbono	52	1984.22
Amônia via reforma de nafta	10	3181.58	Produção de LAB/LAS	53	16159.91
Anidrido ftálico a partir de o-xileno	11	5796.62	SBR via polimerização por emulsão a frio	54	6098.17
Anidrido maléico via oxidação de benzeno	12	8433.53	SBR via polimerização por solução	55	7082.77
Benzeno via desproporcionamento do tolueno	13	3071.88	SBR via polimerização por emulsão a quente	56	5974.31
Benzeno via hidrodealquilação do tolueno	14	5045.51	EPDM via polimerização por solução	57	6776.59
Bisfenol A via reação de fenol e acetona	15	6178.51	EPDM via polimerização por suspensão	58	5733.82
Butadieno via desidrogenação do n-butano	16	7974.84	PB via catalisador de cobalto	59	10469.95
Caprolactama via fenol	17	11658.87	PB via catalisador iodo-ziegler	60	10550.10
Cumeno via benzeno e propeno	18	2918.13	PB via catalisador de níquel	61	9293.79
Cloreto de vinila a partir de eteno	19	7352.50	PC via solução contínua	62	13268.03
Cloreto de vinila via 1,2-Dicloroetano	20	10239.51	PC via fosgenação interfacial	63	12299.82
Cloro via eletrólise de cloreto de sódio	21	844.64	PC via bath solution	64	12989.83
Diisocianato de Difenilmetano (MDI) via anilina e fosgênio	22	7404.99	PVC via polimerização bulk	65	12778.89
Estireno via etilbenzeno	23	4411.03	PVC via polimerização por	66	13839.95

(desidrogenação)			suspensão		
Estireno via etilbenzeno (processo hidroperóxido)	24	6464.81	PVC via polimerização por emulsão	67	14650.05
Eteno via craqueamento de etano-propano (50-50 %m)	25	3407.31	PVC via polimerização por emulsão (bath process)	68	15538.36
Eteno via craqueamento de nafta (alta severidade)	26	3452.93	PS via polimerização bulk	69	4758.44
Eteno via pirólise de etano	27	3431.95	PS via polimerização por suspensão	70	5633.44
Eteno via pirólise de propano	28	4888.15	PS via polimerização bulk/suspensão	71	5881.66
Etilbenzeno via alquilação do benzeno	29	2811.78	PE HD via tecnologia Union Carbide	72	5053.28
Etilenoglicol via hidratação de óxido de eteno	30	4061.52	PE HD via tecnologia HOECHST	73	5055.42
Etilenoglicol via oxidação de eteno	31	4518.27	PE HD via tecnologia Stamicarbom	74	5122.61
Fenol via oxidação do cumeno	32	5383.97	PE HD via tecnologia Montedison	75	6082.14
Fenol via sulfonação do benzeno	33	5558.17	PE LD via reação em autoclave	76	7228.61
Formaldeído via oxidação do metanol	34	2771.53	PE LD via reação em autoclave de mistura	77	6952.61
Metacrilato de metila a partir de acetona	35	7516.33	PE LD em reator tubular	78	7314.81
Metacrilato de etila a partir de acetona	36	7763.93	Polietilenoglicol a partir de óxido de eteno	79	4146.89
Produção de Etanolaminas	37	3022.21	PET a partir de DMT e etilenoglicol	80	5717.75
Ftalatos a partir de n-butanol	38	3514.73	PET a partir de ácido tereftálico e etilenoglicol	81	6424.50
Nitrato de amônio via ácido nítrico e amônia	39	2594.33	Polipropilenoglicol a partir de óxido de propeno	82	5622.00
Metanol via gás natural (metano)	40	2090.94	PP via processo em fase líquida	83	7622.75
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de cobalto-fosfina	41	3594.95	PP via processo em fase vapor	84	6275.41
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de ródio	42	3636.06	PP via processo em lama	85	8530.82
Óxido de eteno via oxidação de eteno (ar)	43	5555.18	PP via processo em solução	86	8838.62

III.2.7 – Coeficientes técnicos de processo (a_{ij})

Os coeficientes técnicos de processo a_{ij} são fatores importantes nas restrições de balanço de massa, já que são eles os responsáveis por indicar o consumo ou produção do produto i em determinado processo j . Estes coeficientes são calculados levando em conta a reação principal do processo e o rendimento do processo.

À exceção dos quatro processos inseridos na lista, todos os outros 82 processos listados por Rudd *et al.* (1981) possuíam seus coeficientes técnicos listados no livro *Petrochemical Technology Assessment*. Para os outros quatro processos, os coeficientes foram calculados com base na reação principal, considerando um rendimento para o processo de 97 %. Os dados referentes aos coeficientes técnicos da indústria petroquímica brasileira são apresentados a seguir nas Tabelas III.18, III.19, III.20, III.21, III.22 e III.23, ressaltando que as células vazias representam a_{ij} igual a 0.

Tabela III.18 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 1-6.

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.00														
2		1.00													
3			1.00												- 0.28
4				1.00											
5				- 0.73	1.00										
6						1.00									
7							1.00								
8								1.00							
9					- 0.28			- 0.43	1.00	1.00					
10											1.00				
11												1.00			
12												- 1.19	1.00	1.00	- 0.02
13															1.00
14															
15															
16															
17	- 0.70														
18															
19															
20															
21															

22															
23						-									
24	-					0.45									
25	0.36														
26															
27														-	0.89
28															
29															
30						-		-							
31						1.35		0.70							
32															
33															
34															
35															
36								-							
37								1.02							
38	0.11														
39															
40															
41															
42								-							
43								0.97							
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
53	-	-						-							
54	1.04	0.85						1.20							
55								-							
56								0.68							
57		-												-	0.01
58		0.01													
59													-	-	

5									- 0.80					
6				- 1.63	- 1.63									
7														
8														
9							- 0.17		- 0.22					
10								- 0.56						
11														
12			- 0.94											
13														
14														
15														
16														
17														
18		- 1.35												
19														
20														
21														
22														
23							1.00							
24														
25	- 0.51													
26	1.00													
27		1.00	1.00											
28				1.00										
29								1.00						
30	- 0.12									- 0.92	- 0.62	- 0.51		
31														
32					1.00									
33				1.00										
34			- 1.18	- 0.37					1.00					
35														
36														
37														
38								- 0.28			1.00	1.00		
39									1.00					
40							- 0.43						1.00	1.00

41														
42														
43														
44														
45														
46														
47														
48														
49														
50														
51														
52														
53											-	-	-	-
54											0.74	0.69	0.96	0.88
55														
56														
57		-	-											
58		0.01	1.64											
59														
60														

Tabela III.21 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 4-6.

a _{ij}	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
1														
2														
3														
4														
5														
6									-	-				
7									1.20	0.02				
8														
9							-	-						
10							0.57	0.57						
11														
12									-					
13									2.25					
14										-	-	-		
15										0.73	0.76	0.56		

16													
17													
18													
19													
20											1.00	1.00	
21									-	-	-		
									0.22	0.25	0.46		
22													
23								-					
								2.00					
24												-	-
												0.44	0.52
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31								1.00					
32													
33													
34													
35			-	-	-	-							
			1.15	1.25	1.15	1.25							
36													
37													
38													
39													
40													
41	1.00	-											
		0.89											
42				1.00	1.00								
43													
44													
45													
46													
47													
48													
49													
50													
51													
52													
53	-											-	-
	0.78											0.52	0.44
54		1.00											
55			1.00	1.00									

56										1.00	1.00	1.00		
57													- 0.01	- 0.01
58														
59														- 0.01
60							1.00	1.00						

Tabela III.22 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 5-6.

a _{ij}	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12	- 0.04													
13				- 0.91	- 0.91	- 0.91								
14	- 1.02	- 1.04	- 1.03											
15														
16							- 1.03	- 1.03	- 1.03	- 1.03				
17														
18														
19														
20														
21											- 1.02	- 0.98	- 0.97	
22														
23														
24														- 1.02
25														
26														
27														
28														
29														

30														
31														
32														
33														
34														
35														
36														
37														
38														
39														
40														
41														
42														
43	1.00	1.00	1.00									-	-	
44				1.00	1.00	1.00						0.05	0.05	
45							1.00	1.00	1.00	1.00				
46											1.00	1.00	1.00	
47														1.00
48														
49														
50														
51														
52														
53														
54														
55														
56														
57				-	-	-								
58				0.54	0.39	0.54								
59		-	-											
60		0.05	0.02											

Tabela III.23 – Coeficientes técnicos (a_{ij}) parte 6-6.

a _{ij}	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
1														
2														
3														
4														
5														
6										-				
										0.01				

7									-					
8									0.86					
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24	-	-	-	-	-	-								
25	1.04	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03								
26									-	-				
27									0.36	0.36				
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34									0.34					
35														
36														
37						-								
38						0.01								
39														
40								-						
41								0.75						
42										-				
43										0.98				
44														
45														
46														

47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00								
48							1.00							
49								1.00	1.00					
50											1.00	1.00	1.00	1.00
51										1.00				
52														
53		-	-								-	-	-	-
		0.02	0.02								1.04	1.02	1.12	1.12
54										-				
										0.06				
55														
56														
57							-				-		-	
							0.02				0.01		0.01	
58														
59														
60														

III.3 – Escolha do software

A escolha do *software* a ser utilizado teve como possíveis candidatos GAMS e MATLAB. Enquanto o MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos, o GAMS é um pacote matemático voltado à otimização. Quanto aos métodos utilizados na resolução dos problemas de programação linear, também há algumas diferenças, embora o GAMS seja mais completo, permitindo acesso a uma maior gama de métodos.

O GAMS utiliza como ferramenta padrão na resolução de problemas de PL o método simplex. O MATLAB possui como padrão, um método de pontos interiores. Este, ao contrário do algoritmo simplex, o qual apenas evolui na fronteira da região de busca, pode buscar soluções no interior da região (AURICH, 2004).

Porém, a escolha não foi baseada no método, já que para aplicações em problemas de programação linear, a implementação dos dois métodos é igualmente eficiente. A escolha foi baseada no relatório gerado após a otimização. Durante a otimização do estudo de caso, para testar a eficiência do modelo matemático, foi observado que os relatórios gerados pelo GAMS são mais completos, indicando inclusive em qual ou quais equações as restrições foram violadas no caso da solução indicar pontos inviáveis

(*infeasible points*). Logo, optou-se pela implementação do modelo no pacote GAMS em vez do MATLAB.

III.4 – Otimização da estrutura da indústria petroquímica

A otimização utilizando o modelo tem por objetivo a tomada de decisões, como a escolha de novas unidades de processo, o aumento de capacidade ou a desativação das unidades existentes, a inserção de novos produtos no setor, a escolha de novas tecnologias e os estudos de variação na oferta das principais matérias-primas. Este trabalho tem seu foco na avaliação da variação na oferta de matérias-primas, que provavelmente deve aumentar significativamente nos próximos anos a partir da exploração das reservas do pré-sal.

Os cenários avaliados incluem a variação nas ofertas das principais matérias-primas da indústria petroquímica: gás natural e nafta. Quando zeradas as ofertas, podemos observar, através do custo total ou mesmo da presença de pontos inviáveis, se a indústria suporta a ausência deste produto, mesmo acarretando um alto custo anual. E, através da comparação entre os dois resultados, a qual destas matérias-primas a indústria petroquímica brasileira é mais sensível.

Os estudos referentes às variações nas ofertas de nafta e gás natural poderão ter grande valor no planejamento petroquímico brasileiro. A análise deste cenário poderá indicar se é viável integrar o refino e processamento à exploração, ou se é mais vantajoso vender estes produtos como matérias-primas, caso semelhante ao estudado por Mikkelsen e Rudd (1979).

Os resultados destas simulações permitirão que decisões difíceis no planejamento do setor sejam tomadas, principalmente sobre como utilizar os recursos do pré-sal. Neste ponto, este trabalho se aproxima muito do estudo realizado sobre as reservas do Mar do Norte (MIKKELSEN e RUDD, 1979). A verificação da consistência dos dados levantados também será um resultado natural deste trabalho.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS

A solução do problema de programação linear final, referente à superestrutura da indústria petroquímica brasileira, apresentou alguns pontos inviáveis, assim como no estudo de caso. Porém, a interpretação destas irregularidades pode ajudar a entender a indústria petroquímica nacional. O código para o procedimento de otimização escrito no software GAMS encontra-se no Apêndice 1 deste trabalho.

A existência de pontos inviáveis se refere à extrapolação de uma ou mais restrições, ou seja, o *software* não foi capaz de encontrar uma solução dentro da região de busca formada pelas restrições. Neste caso, as restrições podem estar em conflito, não apresentando uma região de busca viável. Os resultados apresentados nas tabelas IV. 1 a IV.3 indicam quais variáveis violaram alguma restrição, cujos valores estão marcados em amarelo.

Tabela IV.1 – Resultados de compra de petroquímicos (F_i) de fora da rede petroquímica.

I	Produtos	Fi (t/ano)	i	Produtos	Fi (t/ano)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	0.00	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	0.00
2	2 Etil-Hexanol	0.00	32	Metacrilato de Etila	0.00
3	Acetona	0.00	33	Metacrilato de Metila	0.00
4	Ácido Adípico	0.00	34	Metanol	0.00
5	Ácido Nítrico	0.00	35	m-Xileno	113530.00
6	Ácido Sulfúrico	0.00	36	Nafta	67400000.00
7	Ácido Tereftálico (TPA)	0.00	37	n-Butano	5000000.00
8	Acrilonitrila	0.00	38	n-Butanol	0.00
9	Amônia	0.00	39	Nitrato de Amônio	1764500.00
10	Anidrido Ftálico	0.00	40	Óxido de Eteno	873570.00
11	Anidrido Maleico	0.00	41	Óxido de Propeno	0.00
12	Benzeno	0.00	42	o-Xileno	0.00
13	Bisfenol A	0.00	43	Polibutadieno (PB)	0.00
14	Butadieno	0.00	44	Policarbonato (PC)	0.00
15	Caprolactama	0.00	45	Policloreto de Vinila (PVC)	0.00
16	Cloreto de Vinila (MVC)	0.00	46	Poliestireno (PS)	0.00

17	Cloro	0.00	47	Polietileno (HDPE e LDPE)	0.00
18	Cumeno	0.00	48	Polietilenoglicol	0.00
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	0.00	49	Polietilenotereftalato (PET)	0.00
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	0.00	50	Polipropileno (PP)	0.00
21	Estireno	0.00	51	Polipropilenoglicol	0.00
22	Etano	17900000.00	52	Propano	210000000.00
23	Etanolaminas	0.00	53	Propeno	0.00
24	Eteno	0.00	54	Propilenoglicol	0.00
25	Etilbenzeno	0.00	55	p-Xileno	0.00
26	Etilenoglicol	0.00	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	0.00
27	Fenol	115770.00	57	Soda	1211200.00
28	Formaldeído	0.00	58	Sulfato de Amônio	0.00
29	Ftalatos	0.00	59	Tolueno	204950.00
30	Gás Natural	138000000.00	60	Uréia	0.00

Analisando apenas os resultados da variável F_i , é possível observar que, a partir das matérias-primas mais básicas, a petroquímica brasileira não consegue se sustentar. Ainda seria necessário fornecer fenol, nitrato de amônio e óxido de eteno para complementar a entrada de matérias-primas na superestrutura petroquímica.

Tabela IV.2 – Resultados de quantidade produzida de petroquímicos (Q_i) na indústria brasileira.

I	Produtos	Q_i (t/ano)	i	Produtos	Q_i (t/ano)
1	1,2-Dicloroetano (DCE)	400030.00	31	LAB/LAS (Alquilbenzeno Linear)	0.00
2	2 Etil-Hexanol	100740.00	32	Metacrilato de Etila	0.00
3	Acetona	112880.00	33	Metacrilato de Metila	0.00
4	Ácido Adípico	37619.20	34	Metanol	454950.00
5	Ácido Nítrico	491560.00	35	m-Xileno	22020.00
6	Ácido Sulfúrico	7286300.00	36	Nafta	52936000.00
7	Ácido Tereftálico (TPA)	250000.00	37	n-Butano	4312100.00
8	Acrilonitrila	0.00	38	n-Butanol	123200.00

9	Amônia	1671700.00	39	Nitrato de Amônio	1942800.00
10	Anidrido Ftálico	97384.10	40	Óxido de Eteno	0.00
11	Anidrido Maleico	0.00	41	Óxido de Propeno	131960.00
12	Benzeno	265800.00	42	o-Xileno	59972.15
13	Bisfenol A	0.00	43	Polibutadieno (PB)	42750.00
14	Butadieno	256940.00	44	Policarbonato (PC)	27159.34
15	Caprolactama	528890.00	45	Policloreto de Vinila (PVC)	536410.00
16	Cloreto de Vinila (MVC)	700220.00	46	Poliestireno (PS)	0.00
17	Cloro	1006700.00	47	Poliétileno (HDPE e LDPE)	6070000.00
18	Cumeno	0.00	48	Poliétilenoglicol	6500.82
19	Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	169990.00	49	Poliétilenotereftalato (PET)	522170.00
20	EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)/EPM (Etileno-Propileno Monômero)	22029.40	50	Polipropileno (PP)	734000.00
21	Estireno	-13600.00	51	Polipropilenoglicol	6637.10
22	Etano	9126600.00	52	Propano	197040000.00
23	Etanolaminas	0.00	53	Propeno	2042200.00
24	Eteno	8781300.00	54	Propilenoglicol	34615.20
25	Etilbenzeno	0.00	55	p-Xileno	19597.50
26	Etilenoglicol	312020.00	56	SBR (Borracha de Butadieno Estireno)	61800.70
27	Fenol	0.00	57	Soda	2505300.00
28	Formaldeído	0.00	58	Sulfato de Amônio	2327100.00
29	Ftalatos	71785.20	59	Tolueno	0.00
30	Gás Natural	124680000.00	60	Uréia	4513600.00

Tabela IV.3 – Resultados de quantidade produzida pelos processos j (X_j) na rede petroquímica.

Processo de produção	J	B _j (t/ano)	Processo de produção	j	B _j (t/ano)
1,2-Dicloroetano via cloração de eteno	1	1080000.00	Óxido de eteno via oxidação de eteno (oxigênio)	44	500000.00
2 – Etilhexanol via processo OXO	2	100740.00	Óxido de propeno via oxidação de propeno	45	169630.00
Acetona via oxidação do propeno	3	0.00	Propilenoglicol via hidratação de óxido de propeno	46	35013.43
Ácido adípico via oxidação do ciclohexanol com ácido	4	37619.20	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-	47	19597.50

nítrico			Isolene)		
Ácido nítrico, 95%, via amônia	5	661660.00	p - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	48	0.00
Ácido sulfúrico via processo de absorção dupla	6	7409300.00	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Aromax-Isolene)	49	59972.15
Ácido tereftálico, cru, via p-xileno	7	250000.00	o - Xileno via isomerização de m-xileno (Parex-Isomar)	50	0.00
Acrilonitrila via amoxidação do propeno	8	0.00	Uréia via processo de reciclo total	51	2731600.00
Amônia via reforma do gás natural	9	4230500.00	Uréia via amônia e dióxido de carbono	52	1782000.00
Amônia via reforma de nafta	10	1588000.00	Produção de LAB/LAS	53	0.00
Anidrido ftálico a partir de o-xileno	11	137580.00	SBR via polimerização por emulsão a frio	54	61800.70
Anidrido maléico via oxidação de benzeno	12	0.00	SBR via polimerização por solução	55	0.00
Benzeno via desproporção do tolueno	13	-369900.00	SBR via polimerização por emulsão a quente	56	0.00
Benzeno via hidrodealquilação do tolueno	14	999100.00	EPDM via polimerização por solução	57	0.00
Bisfenol A via reação de fenol e acetona	15	24715.00	EPDM via polimerização por suspensão	58	22029.40
Butadieno via desidrogenação do n-butano	16	346090.00	PB via catalisador de cobalto	59	14250.00
Caprolactama via fenol	17	528890.00	PB via catalisador iodo-ziegler	60	14250.00
Cumeno via benzeno e propeno	18	265140.00	PB via catalisador de níquel	61	14250.00
Cloreto de vinila a partir de eteno	19	843100.00	PC via solução contínua	62	12159.34
Cloreto de vinila via 1,2-Dicloroetano	20	409620.00	PC via fosgenação interfacial	63	0.00
Cloro via eletrólise de cloreto de sódio	21	1520900.00	PC via bath solution	64	15000.00
Diisocianato de Difenilmetano (MDI) via anilina e fosgênio	22	169990.00	PVC via polimerização bulk	65	536410.00
Estireno via etilbenzeno (desidrogenação)	23	0.00	PVC via polimerização por suspensão	66	0.00
Estireno via etilbenzeno (processo hidroperóxido)	24	0.00	PVC via polimerização por emulsão	67	0.00
Eteno via craqueamento de etano-propano (50-50 %m)	25	3952000.00	PVC via polimerização por emulsão (bath process)	68	0.00
Eteno via craqueamento de nafta (alta severidade)	26	3952000.00	PS via polimerização bulk	69	0.00

Eteno via pirólise de etano	27	3952000.00	PS via polimerização por suspensão	70	0.00
Eteno via pirólise de propano	28	3952000.00	PS via polimerização bulk/suspensão	71	0.00
Etilbenzeno via alquilação do benzeno	29	0.00	PE HD via tecnologia Union Carbide	72	3035000.00
Etilenoglicol via hidratação de óxido de eteno	30	500000.00	PE HD via tecnologia HOECHST	73	0.00
Etilenoglicol via oxidação de eteno	31	0.00	PE HD via tecnologia Stamicarbom	74	0.00
Fenol via oxidação do cumeno	32	196400.00	PE HD via tecnologia Montedison	75	0.00
Fenol via sulfonação do benzeno	33	196400.00	PE LD via reação em autoclave	76	0.00
Formaldeído via oxidação do metanol	34	27197.86	PE LD via reação em autoclave de mistura	77	0.00
Metacrilato de metila a partir de acetona	35	0.00	PE LD em reator tubular	78	3035000.00
Metacrilato de etila a partir de acetona	36	0.00	Polietilenoglicol a partir de óxido de eteno	79	6500.82
Produção de Etanolaminas	37	3334200.00	PET a partir de DMT e etilenoglicol	80	522170.00
Ftalatos a partir de n-butanol	38	71785.20	PET a partir de ácido tereftálico e etilenoglicol	81	0.00
Nitrato de amônio via ácido nítrico e amônia	39	178300.00	Polipropilenoglicol a partir de óxido de propeno	82	6637.10
Metanol via gás natural (metano)	40	309500.00	PP via processo em fase líquida	83	0.00
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de cobalto-fosfina	41	0.00	PP via processo em fase vapor	84	734000.00
1-Butanol via propeno utilizando catalisador de ródio	42	132220.00	PP via processo em lama	85	0.00
Óxido de eteno via oxidação de eteno (ar)	43	500000.00	PP via processo em solução	86	0.00

Os resultados apresentados nas Tabelas IV.2 e IV.3 referentes às quantidades produzidas de cada petroquímico (Q_i) e às quantidades produzidas por processos (X_j), respectivamente, indicaram a presença de algumas irregularidades. Quanto à variável Q_i , além da produção negativa de estireno, alguns produtos apresentaram Q_i nulo, indicando a não produção destes petroquímicos.

Os valores zerados de Q_i estão relacionados aos valores nulos da variável X_j para alguns processos. Quanto aos valores de X_j , a produção de benzeno pelo processo de número 13 também apresenta produção negativa. Porém, o outro processo de produção compensa a demanda pela produção deste petroquímico. A partir deste exemplo do benzeno, é possível observar que as restrições apresentam alguma incoerência na delimitação da região viável de busca.

Embora o valor do custo anual não apresente um significado claro, devido aos pontos inviáveis, algumas observações podem ser feitas. A principal observação consiste na comparação do valor do custo encontrado na simulação da petroquímica brasileira, R\$ $1,5803 \times 10^7$, ao valor do estudo de caso, embora o estudo de caso esteja relacionado a base de dados de 1975 da indústria petroquímica norte americana presente em Rudd *et al.* (1981), US\$ $1,1061 \times 10^9$. É possível notar que, embora a indústria petroquímica brasileira seja muito mais complexa do que a do exemplo da indústria petroquímica simplificada, o custo é menor em ordem de grandeza, respeitando a diferença entre as moedas (o que não altera a ordem de grandeza dos valores).

Esta comparação pode ser interpretada em duas vertentes: uma delas mostra que a maior integração e o ganho com a venda dos produtos mais complexos torna a indústria menos custosa; além disso, o valor do custo da petroquímica brasileira não corresponde a um ótimo real, pois foi encontrado com a presença de pontos inviáveis na solução.

Após a verificação dos resultados incoerentes, diversas tentativas de simulação foram realizadas objetivando encontrar quais restrições estariam inviabilizando a solução ótima. Durante estas simulações, o modelo foi relaxado, algumas restrições foram retiradas, mas o problema com os pontos inviáveis persistiu.

As tentativas de resolução do problema dos pontos inviáveis indica que uma restrição está contendo outra, ou seja, que há uma dependência linear entre uma ou mais restrições de igualdade. Estes resultados também podem indicar que a indústria petroquímica, sem a inclusão das importações na modelagem, não é capaz de se sustentar, ou seja, de atender ao mercado (restrições de demanda).

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

As conclusões acerca da modelagem do setor petroquímico brasileiro foram prejudicadas pela presença dos 33 pontos inviáveis, ou seja, ao longo da simulação, 33 restrições foram desrespeitadas. As extrapolações referentes às variáveis F_i , Q_i e X_j , talvez possam ser explicadas pela grande dependência de tecnologias e produtos importados, já que nesta modelagem as importações foram consideradas apenas na estimação dos preços.

Outra possível fonte de erro é a estimativa dos coeficientes de processo das rotas tecnológicas não listadas em Rudd *et al.* (1981). Apesar das incertezas durante a delimitação de quais produtos e processos compõem a indústria petroquímica e a coleta de dados e otimização da superestrutura, conjectura-se que o setor petroquímico brasileiro apresenta dependência externa, mostrada pela necessidade de entrada de outros petroquímicos, além das matérias-primas básicas, no início da cadeia petroquímica.

Apesar de o custo anual calculado da indústria petroquímica como um todo não apresentar confiabilidade, a comparação com o valor encontrado no estudo de caso da indústria simplificada fictícia pode indicar que o quanto mais complexa e mais integrada for a indústria, mais lucrativa ela será, ou seja, menor será seu custo anual.

Diante dos imprevistos desta primeira tentativa de modelagem da indústria petroquímica brasileira (verificou-se que algumas restrições contêm as outras; assim, estas restrições entram em conflito), a continuação do trabalho contemplará a busca por uma metodologia para checar se a região de busca é fechada e convexa. Entretanto, considera-se que o trabalho cumpriu seu papel em iniciar os estudos de planejamento no setor e apresentar alternativas à estimação dos parâmetros em virtude da ausência de informações mais precisas.

CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se que este trabalho servirá como base para estudos futuros sobre modelos da indústria química brasileira, os quais podem incluir desde o planejamento para auxílio à tomada de decisões até a formulação de novos modelos, que descrevam melhor a indústria petroquímica do Brasil.

Dentre as diversas possibilidades a serem contempladas em trabalhos futuros, a primeira pode envolver um levantamento de dados mais preciso, visando à criação de um banco de dados para estudos mais profundos no setor. Além disso, com a base fornecida por este trabalho, pode-se otimizar outros parâmetros chave, como por exemplo os preços e comparar com os preços praticados na atualidade para se questionar se os preços estão em um nível ótimo para o desenvolvimento das empresas do setor.

Pelos diversos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, fica claro que este tipo de planejamento é mais voltado para países. Em países cuja indústria é praticamente dominada por uma empresa, este planejamento funciona muito bem no auxílio às decisões a serem tomadas pela empresa. Já em casos onde há uma menor concentração neste segmento da indústria química, estes resultados não podem ser totalmente incorporados pelas empresas. Logo, pode-se adaptar ou criar um modelo que seja voltado ao planejamento para cada uma das empresas do setor.

Ainda, esta modelagem poderia ser aplicada à indústria química como um todo. É claro que, para este trabalho, seria necessária a colaboração das empresas do setor, principalmente para listar os processos e novas rotas tecnológicas em pesquisa e os dados referentes à estes processos e tecnologias.

Pode-se também propor um corte mais preciso na indústria petroquímica brasileira, com a atualização dos valores dos coeficientes a_{ij} , já que à época estudada por RUDD *et al* (1981) os rendimentos das reações envolvidas nos processos químicos eram de 90-95%, e hoje, na faixa de 97-99%.

Além disto, pode-se incluir as rotas tecnológicas verdes para os processos químicos, tema de grande importância na indústria química nacional e que pode afetar a produção de alguns produtos da indústria petroquímica, como os polímeros verdes.

A inclusão de variáveis binárias referentes à construção de novas plantas também poderia ser o objeto de um interessante estudo de planejamento na indústria petroquímica local, que pode utilizar ferramentas de programação inteira mista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. **Anuário da Indústria Química Brasileira**. ABIQUIM- Associação Brasileira da Indústria Química, São Paulo, Dez. 2012.

ACINH. Disponível em: <<http://www.acinh.com.br/servicos/cotacao-dolar>> (Acessado em 19/05/2014 às 16:00h)

AL-FADLI, A.M.; SOLIMAN, M.A.; WAGIALLA, K.M.; AL-MUTAZ, I.S. **A Network Model for the Optimal Planning of the Saudi Petrochemical Industry**. J. Eng. Sci., King Saud Univ., v. 14, no. 2, p. 295 – 309, 1988.

AL-QAHTANI, K.; ELKAMEL, A.; PONNAMBALAM, K. **Robust Optimization for Petrochemical Network Design under Uncertainty**. Ind. Eng. Chem. Res., v. 47, p. 3912 – 3919, 2008.

AL-QAHTANI K. Y., ELKAMEL A., **Planning and Integration of Refinery and Petrochemical Operations**, 1° ed., Weinheim, Wiley-VCH, 2010.

AL-SHARRAH, G. K.; HANKINSON, G.; ELKAMEL, A. **Decision-Making for Petrochemical Planning Using Multiobjective and Strategic Tools**. Chem. Eng. Res. Des., v. 84, no. 11, p. 1019 – 1030, Nov. 2006.

AL-SHARRAH, G. K.; IMAD A.; ELKAMEL, A; ALPER E. **Planning an Integrated Petrochemical Industry with an Environmental Objective**. Ind. Eng. Chem. Res., no. 40, p. 2103– 2111, 2001.

AL-SHARRAH, G. K.; IMAD A.; ELKAMEL, A. **Planning an Integrated Petrochemical Business Portfolio for Long-Range Financial Stability**. Ind. Eng. Chem. Res., no. 41, p. 2798– 2804, 2002.

AL-SHARRAH, G. K.; IMAD A.; ELKAMEL, A. **Modeling and Identification of Economic Disturbances in the Planning of the Petrochemical Industry**. *Ind. Eng. Chem. Res.*, no. 42, p. 4678– 4688, 2003

ALVES, F. C., BOMTEMPO, J. V., COUTINHO P. L. A. **Competências para inovar na petroquímica brasileira**. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 4, no. 2, p. 301-327, 2005.

AURICH, M. R. C. **Um Modelo de fluxo de potência ótimo linear com reprogramação corretiva via Método de Pontos Interiores**. 126p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas. 2004.

CHÁVEZ, O. E., RUDD, D. F., JIMÉNEZ, A. (1990). **Structural simulation in the analysis of the petrochemical industry**. *Computers Chemical Engineering*, v.15, p. 375-384, 1991.

ELEKEIROZ. Disponível em:
<<http://www.elekeiroz.com.br/PT/produtos/Documents/Manual%20Completo.pdf>>
(Acessado em 31/08/2014 às 20:15h)

EY. **Perspectivas para a indústria de petróleo e gás no Brasil**. EY – Ernst & Young, Rio de Janeiro, Jan. 2014. (Disponível em
:[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Perspectivas_Oleo_Gas_Brasil/\\$FILE/LR%20Estudo%20Centro%20de%20energia%2010_02_2014.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Perspectivas_Oleo_Gas_Brasil/$FILE/LR%20Estudo%20Centro%20de%20energia%2010_02_2014.pdf) - Acessado em
06/01/2015 às 17:30h)

FATHI-AFSHAR, Saeed; YANG, Jing-Chang. **Designing the Optimal Structure of the Petrochemical Industry for Minimum Cost and Least Gross Toxicity of Chemical Production**. *Chem. Eng. Sci.*, v. 40, no. 5, p. 781 – 791, 1985.

FATHI-AFSHAR, Saeed; MAISEL, Daniel S.; RUDD, Dale F.; TREVINO, Andres A.; YUAN, William W. **Advances in Petrochemical Technology Assessment**. *Chem. Eng. Sci.*, v. 36, no. 9, p. 1487 –1511, 1981.

GOMES, Gabriel L. **Análise da Integração Refino-Petroquímica – Oportunidades Econômicas, Estratégicas e Ambientais**. Tese (Doutorado em Ciências) – Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

GURKAN, T., KARTAL, N., (1989). **Model for the development of the Turkish petrochemical industry**. *Engineering Cost and Production Economics*, v.18, p. 145-157, 1989.

HIMMELBLAU, D. M.; EDGAR, T. F. **Optimization of Chemical Processes**. New York. McGraw-Hill, 1988.

JIMÉNEZ, A., RUDD, D. F., MEYER, R. R., (1981). **A study of the development of a Mexican petrochemical industry using mixed-integer programming**. *Computers Chemical Engineering*, v.6, p. 219-229, 1982.

JIMÉNEZ, A. G.; RUDD, D. F. **Use of a Recursive Mixed-Integer Programming Model to Detect an Optimal Integration Sequence for the Mexican Petrochemical Industry**. *Comput. chem. Engng.*, v. 11, no. 3, p. 291 – 301, 1987.

MOREIRA, Fabrícia S. **A integração refino petroquímica como alternativa para o atendimento do crescente mercado de petroquímicos**. Tese (Mestrado em Ciências) – Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

MIKKELSEN, J. Kr., RUDD, D. F., (1979). **Development of a norwegian petrochemical industry**. *Engineering Cost and Production Economics*, v.5, p. 163-177, 1981.

O GLOBO. Disponível em <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2014/02/energia-industrial-no-brasil-e-11-mais-cara-entre-28-paises-diz-firjan.html>> (Acessado em 21/05/2014 às 11:20h)

OXITENO. Disponível em: <<http://www.oxiteno.com.br/cms/media/26695/etanolaminas-leather-pt.pdf>> (Acessado em 31/08/2014 às 20:00h)

PASSOS, E. J. P. F. **Programação Linear como instrumento da pesquisa operacional**. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

PEREIRA, R. A. **Análise dos Principais Processos Críticos para Produção de Insumos Petroquímicos e sua Evolução Tecnológica**. Tese (Mestrado em Ciências) – Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

PETROBRAS. **Análise Financeira e Demonstrações Contábeis 2011**. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Fev. 2012.

PETROBRAS. **Análise Financeira e Demonstrações Contábeis 2012**. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro, Mar. 2013.

RUDD, D. F., TREVIÑO, A. A., FATHI-AFSHAR, S., STADTHERR, M. A., **Petrochemical Technology Assessment**, 1º ed., New york, John Wiley & Sons, 1981.

SAHINIDIS, N.V.; GROSSMANN, I. E.; FORNARI, R.E.; CHATHRATHI, M. **Optimization Model for Long Range Planning in the Chemical Industry**. Computers chem. Engng, v. 13, no.9, p. 1049 –1063, 1989.

SANTIAGO, M.; IGLESIAS, O. A.; PANIAGUA, C.N. **Optimal Technology Path for Chemical Industry Production**. Computers & Chemical Engineering, v. 10, no.5, p. 421 – 431, 1986.

SILVA, J. C., SILVA, R. M., **Uma abordagem de modelagem matemática via programação linear**, In: IV SIMPÓSIO DE MATEMÁTICA E MATEMÁTICA INDUSTRIAL, 4, 2012 Catalão, Anais Catalão, Universidade Federal de Goiás 2012, p. 129-143.

STADTHERR, M. A., RUDD, D. F. (1975). **Systems study of the petrochemical industry**. Chemical Engineering ScienceI, v.31, p. 1019-1028, 1976.

TOLEDO, Carlos E. E.; ARANDA, Claudia G.; MARESCHAL, Bertrand.
Petrochemical Industry: Assessment and Planning Using Multicriteria Decision Aid Methods. Technology and Investment, v. 1, no.2, p. 118 –134, 2010.

VAN DEN HEEVER, Susara A.; GROSSMANN, Ignacio E. **Disjunctive Multiperiod Optimization Methods for Design and Planning of Chemical Process Systems.** Computers and Chemical Engineering, v.23, p. 1075 – 1095, 1999.

WEC. **Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation.** World Energy Council, London, Dez. 2007.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO GAMS PARA A PROGRAMAÇÃO LINEAR

Sets

i Produtos / 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 /

j Processos / 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86 /;

Parameters

D(i) demanda min de produto

/ 1 400025.60

2 100742.70

3 112883.80

4 37619.20

5 491561.30

6 7286292.70

7 592457.20

8 23947.90

9 1671744.80

10 97384.10

11 33430.80

12 646049.60

13 18447.50

14 256942.60

15 63626.30

16 700218.60

17 1231081.60

18 160000.00

19 169986.62
20 22029.40
21 633180.40
22 0.00
23 83702.47
24 3111429.80
25 540139.80
26 445882.09
27 97462.40
28 480697.90
29 71785.20
30 0.00
31 6514.00
32 29567.90
33 22605.90
34 884029.70
35 22020.00
36 0.00
37 0.00
38 123202.70
39 1942778.30
40 261133.83
41 131964.30
42 76307.60
43 63642.10
44 47191.20
45 942539.51
46 373396.20
47 2133090.00
48 6500.82
49 522174.20
50 1391746.70
51 6637.10
52 0.00

53 2042160.90
54 34615.20
55 19597.50
56 61800.70
57 2505270.80
58 2327113.90
59 0.00
60 4513596.30 /

S(i) Restricao de fornecimento de produtos

/ 1 0.00
2 0.00
3 0.00
4 0.00
5 0.00
6 0.00
7 0.00
8 0.00
9 0.00
10 0.00
11 0.00
12 0.00
13 0.00
14 0.00
15 0.00
16 0.00
17 0.00
18 0.00
19 0.00
20 0.00
21 0.00
22 17900000.0
23 0.00
24 0.00

25 0.00
26 0.00
27 0.00
28 0.00
29 0.00
30 138000000.0
31 0.00
32 0.00
33 0.00
34 0.00
35 113525.10
36 67400000.0
37 5000000.0
38 0.00
39 0.00
40 0.00
41 0.00
42 0.00
43 0.00
44 0.00
45 0.00
46 0.00
47 0.00
48 0.00
49 0.00
50 0.00
51 0.00
52 210000000.0
53 0.00
54 0.00
55 0.00
56 0.00
57 1353071.00
58 0.00

59 204949.90

60 0.00 /

P(i) Preço dos produtos

/ 1 5656.55

2 3339.81

3 1759.70

4 3598.22

5 1142.40

6 159.95

7 2223.21

8 3835.36

9 916.09

10 2324.04

11 2690.81

12 1809.47

13 3256.72

14 4484.88

15 5248.94

16 13041.90

17 255.85

18 2100.00

19 3198.14

20 5924.20

21 2358.00

22 525.00

23 2575.45

24 2137.64

25 2424.37

26 1882.31

27 2756.43

28 1279.56

29 3708.03

30 605.00

31 25272.67
32 7570.28
33 4285.22
34 614.46
35 1786.83
36 1541.15
37 835.00
38 2464.35
39 568.14
40 3198.04
41 3420.70
42 1950.72
43 6532.86
44 4587.12
45 2049.59
46 3370.22
47 2552.69
48 3076.83
49 2922.69
50 2864.72
51 5767.76
52 600.00
53 2318.13
54 2752.52
55 2576.95
56 3653.73
57 567.30
58 391.76
59 1663.82
60 726.03 /

P(i) Preço dos produtos

/ 1 5656.55
2 3339.81

3 1759.70
4 3598.22
5 1142.40
6 159.95
7 2223.21
8 3835.36
9 916.09
10 2324.04
11 2690.81
12 1809.47
13 3256.72
14 4484.88
15 5248.94
16 13041.90
17 255.85
18 2100.00
19 3198.14
20 5924.20
21 2358.00
22 525.00
23 2575.45
24 2137.64
25 2424.37
26 1882.31
27 2756.43
28 1279.56
29 3708.03
30 605.00
31 25272.67
32 7570.28
33 4285.22
34 614.46
35 1786.83
36 1541.15

37 835.00
38 2464.35
39 568.14
40 3198.04
41 3420.70
42 1950.72
43 6532.86
44 4587.12
45 2049.59
46 3370.22
47 2552.69
48 3076.83
49 2922.69
50 2864.72
51 5767.76
52 600.00
53 2318.13
54 2752.52
55 2576.95
56 3653.73
57 567.30
58 391.76
59 1663.82
60 726.03 /

H(i) Preço de queima

/ 1 939.80
2 3324.57
3 2527.74
4 1568.87
5 0.00
6 0.00
7 1591.75
8 1641.31

9 1368.71
10 1818.60
11 1162.84
12 3431.32
13 2626.86
14 3854.51
15 2382.86
16 1559.34
17 0.00
18 3560.95
19 2668.80
20 0.00
21 3450.38
22 4251.02
23 0.00
24 4125.21
25 3526.63
26 1559.34
27 2659.27
28 1559.34
29 0.00
30 9531.44
31 0.00
32 1529.00
33 1906.29
34 1860.54
35 3517.10
36 3907.89
37 4058.49
38 2960.46
39 0.00
40 2456.75
41 2739.34
42 3526.63

43 0.00
44 0.00
45 0.00
46 0.00
47 0.00
48 0.00
49 0.00
50 0.00
51 0.00
52 4127.11
53 4010.83
54 1946.32
55 3520.91
56 0.00
57 0.00
58 0.00
59 3478.98
60 861.64 /

B(j) Restricao de Capacidade instalada

/ 1 1080000.00
2 150000.00
3 119000.00
4 87000.00
5 661660.00
6 8213054.00
7 250000.00
8 100000.00
9 1588010.00
10 1588010.00
11 152000.00
12 30000.00
13 999076.00
14 999076.00

15 28000.00
16 466000.00
17 56000.00
18 320000.00
19 843100.00
20 843100.00
21 1520949.00
22 190000.00
23 540000.00
24 3952000.00
25 3952000.00
26 3952000.00
27 3952000.00
28 3952000.00
29 770000.00
30 500000.00
31 500000.00
32 196400.00
33 196400.00
34 787600.00
35 100000.00
36 50000.00
37 142857.14
38 266000.00
39 573002.00
40 309500.00
41 150000.00
42 150000.00
43 500000.00
44 500000.00
45 235000.00
46 86000.00
47 203000.00
48 203000.00

49 126000.00
50 126000.00
51 1782000.00
52 1782000.00
53 10000.00
54 107700.00
55 107700.00
56 107700.00
57 42000.00
58 42000.00
59 14250.00
60 14250.00
61 14250.00
62 15000.00
63 15000.00
64 15000.00
65 728500.00
66 728500.00
67 728500.00
68 728500.00
69 585500.00
70 585500.00
71 585500.00
72 3035000.00
73 3035000.00
74 3035000.00
75 3035000.00
76 3035000.00
77 3035000.00
78 3035000.00
79 10000.00
80 585000.00
81 585000.00
82 10000.00

83 1965000.00
84 1965000.00
85 1965000.00
86 1965000.00 /

C(j) Custo dos Processos de transformacao

/1 2454.98
2 4068.59
3 4090.64
4 2245.22
5 1821.01
6 362.76
7 3555.59
8 3688.65
9 1803.46
10 1950.75
11 3205.36
12 3931.53
13 2761.78
14 4871.59
15 4339.45
16 4800.56
17 6583.94
18 2889.09
19 6026.68
20 10084.90
21 833.76
22 4239.68
23 3898.21
24 4933.58
25 2579.04
26 3013.46
27 2109.15
28 3044.37

29 2571.60
30 3459.32
31 3011.54
32 3744.91
33 3694.64
34 1688.77
35 3809.53
36 4340.37
37 2974.76
38 3801.04
39 2563.45
40 1730.82
41 2868.85
42 2936.78
43 3041.59
44 3381.35
45 3440.77
46 4084.10
47 3338.09
48 2999.25
49 3268.65
50 3194.93
51 1175.47
52 1066.70
53 15334.20
54 5058.53
55 5699.87
56 4840.42
57 5096.62
58 4274.97
59 8436.30
60 8650.57
61 7919.38
62 6071.79

63 5025.38
 64 5871.79
 65 11241.21
 66 11601.10
 67 11788.24
 68 11975.38
 69 3508.41
 70 3945.60
 71 4115.62
 72 3483.38
 73 3485.51
 74 3636.52
 75 3881.03
 76 3812.60
 77 3674.85
 78 3893.19
 79 3722.44
 80 2404.80
 81 3945.92
 82 4261.20
 83 4167.61
 84 3626.21
 85 4920.88
 86 5073.88/;

Table

a(i,j) Coeficientes tecnicos dos processos

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	
62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	

74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85
86

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1.66	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.61	0	0	-0.68	-0.68	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	-0.73	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.80

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.08	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.63	-1.63	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1.20	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.01	0	0	0	0						
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.86	0	0	0	0	0						
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	-0.28	0	0	-0.43	1	1	0	0	0
0	0	0	-1.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.17	0	-0.22
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.57	-0.57
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.56	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.19	1
1	-0.02	0	0	-0.67	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0
0	0	-0.74	0	0	0	-0.94	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.25	0	0	0	0	0	-0.04	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.91	-0.91	-0.91	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.73	-0.76	-0.56	0	0	-1.02	-1.04	-1.03	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.03
-1.03	-1.03	-1.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.61	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1.35	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.22	-0.25	-0.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-1.02	-0.98	-0.97	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.92	0
-1.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
23	0	0	0	0	0	-0.45	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
24	-0.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.48	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	-0.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	-0.44	-0.52	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.02	-1.04	-1.02	-1.02	-1.03	-1.03		
-1.03	0	0	0	0	0	0	0	0					
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.15	-1.14	0	0	
0	0	0	0	-0.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.36	-0.36	0	0	0	0	0						
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.89	0	-0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.16	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
30	0	0	0	0	0	-1.35	0	0	-0.70	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.92	-0.62	-0.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0					
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	-1.18	-0.37	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.34	0	0	0	0	0	0					
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1.15	-1.25	-1.15	-1.15		0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0				
36	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.02	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3.25
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0				
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.01
0	0	0	0	0	0	0	0					
38	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.28	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0					

39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.87	0	0	0	0	0	0	0	-0.43	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.41	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	-0.89	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.97	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

0	0	0	0	-0.05	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0						
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0						
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0						
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1						
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0						
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.92	0
0	-2.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
53	0	-1.04	-0.85	0	0	0	0	-1.20	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.38	0	0	0	0	0	0	-0.33	0.14	
0.63	0.04	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	-0.74	-0.69	-0.96	-0.88	-0.78	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.52	-0.44	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.02	-0.02	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.04	-1.02	-1.12	-1.12				
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.06	0	0	0	0						
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0						
57	0	0	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.01	0	0	0	0	0	0	1.12	-0.18	0	-0.01	0	0
0	-0.01	0	0	0	0	-0.01	-1.64	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	-0.54	-0.39	-
0.54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.02	0	0	0	-0.01	0	-0.01	0				
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	4.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.69
-1.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.01	0	-0.05	-0.02	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0;					

Variables

F(i) Qtd de petroquimico i comprada no inicio da rede

X(j) Qtd produzida pelo processo j

Q(i) Qtd vendida

Z Custo

Positive variables

F(i)

X(j)

Q(i);

Equations

R1(i) Limite de fornecimento de petroquimicos basicos para a cadeia petroquimica

R3(i) Max limite de vendas

R4(j) Restricao de cap. instalada

Balanco(i) Restricao de BM

Custo Funcao a ser minimizada;

R1(i).. $F(i) = S(i)$;

R3(i).. $Q(i) = D(i)$;

R4(j).. $X(j) = B(j)$;

Balanco(i).. $Q(i) = F(i) + \sum(j, a(i,j)*X(j))$;

Custo.. $Z = \sum(i, P(i)*F(i)) + \sum(j, C(j)*X(j)) + \sum(i, (-H(i))*(Q(i)-D(i)))$;

Model Case /all/;

Solve Case using lp minimizing Z;