UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Escola de Química

Ernesto Pires de Lima Neto

PERSPECTIVAS DE REESTRUTURAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DA QUÍMICA E DA ENERGIA: A VIA METANOL

Tese de doutorado

Volume 1

Rio de Janeiro, 2009

Ernesto Pires de Lima Neto

PERSPECTIVAS DE REESTRUTURAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DA QUÍMICA E DA ENERGIA: A VIA METANOL

Volume 1

Tese de doutorado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (TPQB) da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos parciais à obtenção de título de doutor em Ciências

Orientadores:
José Vitor Bomtempo, D.Sc.
Edmar Luiz Fagundes de Almeida, D.Sc.

Rio de Janeiro, 2009

Pires de Lima, Ernesto Neto

Perspectivas de Reestruturação das Indústrias da Química e da Energia: A via metanol/ Ernesto Pires de Lima Neto – 2009, 194p

Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química – EQ, 2009

Orientadores: José Vitor Bomtempo e Edmar Luiz Fagundes de Almeida

1. metanol 2. sistemas tecnológicos 3. inovação arquitetural I.BOMTEMPO José Vitor (orientador) II. ALMEIDA Edmar Luiz Fagundes de III. Título

Ernesto Pires de Lima Neto

PERSPECTIVAS DE REESTRUTURAÇÃO DAS INDÚSTRIAS
DA QUÍMICA E DA ENERGIA: A VIA METANOL

Tese de doutorado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (TPQB) da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos parciais à obtenção de título de doutor em Ciências

Aprovada em: 15 de maio 2009

_____
José Vitor Bomtempo, D.Sc. (EQ/UFRJ)

_____
Edmar Luiz Fagundes de Almeida, D.Sc. (IE/UFRJ)

_____
Alexandre Salem Szklo, D.Sc. (COPPE/UFRJ)

_____
Carlos René Klotz Rabello, D.Sc. (PETROBRAS)

_____
Ronaldo Goulart Bicalho, D.Sc. (IE/UFRJ)

_____
Flávia Chaves Alves, D.Sc. (EQ/UFRJ)

_____
Maria Leticia Murta Valle, D.Sc. (EQ/UFRJ)

DEDICATÓRIA

À minha eterna namorada Cláudia, por toda sua paciência, compreensão, dedicação e companheirismo ao longo desses anos.

À minha querida família, em especial à minha mãe, Helena, a maior torcedora. Ao meu pai Antonio Ennes (em memória), que deve estar por aí pulando de alegria. Às minhas irmãs, Beatriz, por me mostrar uma luz no fim do túnel, Débora, minha grande colaboradora e aos meus irmãos Antonio Ennes e Carlos Octávio, pelo carinho e contribuições diversas.

Ao meu amigo Luis Carlos da Vila (em memória), pela força transmitida pessoalmente e através dos versos da sua famosa canção:
“Nós iremos até Paris
Arrasar no Olímpia
O show tem que continuar“

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores José Vitor Bomtempo e Edmar Fagundes Almeida, pela sua amizade, compreensão e dedicação, assim como pelas inúmeras observações e colaborações imprescindíveis para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos e médicos Kátia Barcha e Paschoal Chrispim e aos meus protetores espirituais, que me permitiram concluir essa tese.

Aos professores, funcionários e colegas da Escola de Química e do Grupo de Economia da Energia do Instituto de Economia, que com disposição e empenho me forneceram os subsídios materiais e conhecimentos necessários.

À direção e colegas do IFET-RJ (ex-CEFET Química), que não se furtaram em conceder benefício temporário de redução de carga horária para possibilitar a execução deste trabalho.

Aos amigos, que durante esses anos acompanharam os acontecimentos, torceram, se preocuparam e demonstraram as mais diversas formas de carinho e apoio, partilhando momentos de insegurança, ansiedade e angústia. Sendo também pacientes e compreensivos com as minhas ausências em inúmeros encontros programados. À querida Gracinha (Graça Ramos), pelo carinho e competência na revisão.

RESUMO

PIRES DE LIMA, Ernesto Neto - Perspectivas de Reestruturação das Indústrias da Química e da Energia: A via metanol, 2009. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Esta tese apresenta um estudo que testa a viabilidade de amenizar as incertezas atualmente presentes nas indústrias da química e da energia, através de um sistema tecnológico que possua o metanol como elemento reestruturante. Esse estudo se justifica devido ao atual ambiente socioeconômico apresentar inúmeras incertezas em aspectos determinantes para a previsão da evolução dessas indústrias. É muito difícil apontar qual matéria-prima ou combustível será predominante no futuro. Tais incertezas podem ser amenizadas através de um sistema tecnológico que contenha grande flexibilidade e que seja capaz de acomodar as possíveis mudanças futuras. Nesse estudo parte-se da hipótese de que esse sistema tecnológico poderia ser composto pelo metanol, por suas matérias-primas e por suas aplicações. O metanol funciona como um *gateway* ou ponto focal, para onde convergem as matérias-primas (todas as fontes carbônicas fósseis e renováveis) e divergem as diversas aplicações nas indústrias da química e da energia. O estudo identifica as tecnologias componentes do sistema tecnológico. Utilizando uma análise qualitativa através do critério de pontos, a flexibilidade do sistema é analisada em seus três elementos estruturais: as matérias primas, a produção de metanol e as aplicações. A análise evidencia a flexibilidade presente em matérias-primas e aplicações. Isso sugere que o sistema centrado no metanol pode funcionar de forma segura em termos de suprimento de matérias primas e de mercado final para o metanol. No que se refere à produção de metanol, verifica-se uma capacidade peculiar de adaptação das tecnologias disponíveis que abrem a possibilidade de uso de diferentes escalas. Isso se traduz numa capacidade de adaptação aos mercados de grande volume (megaplantas) e aos mercados de nicho (plantas adaptadas às condições particulares de oferta de matéria prima e de consumo do metanol). A tese

conclui que o sistema baseado no metanol como gateway tem condições de responder aos desafios atuais das indústrias de química e de energia e poderia ser uma opção para reestruturar essas indústrias.

Palavras-chave: metanol, sistemas tecnológicos, inovação arquitetural

ABSTRACT

PIRES DE LIMA, Ernesto Neto: Energy and Chemical Industries Perspectives of Restructuration: by methanol. 2009. Thesis (Doctor in Science) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro

This thesis tests the feasibility of minimize the current uncertainties in the energy and chemical industries by applying a technological system having methanol as the restructuring element. This study is justified due to the fact that the current economic environment shows several uncertainties in key aspects concerning the evolution of these industries. It is very difficult to point out the raw material or fuel that will be the dominant in the future. Such uncertainties can be minimized through a technological system highly flexible and that is able to adapt to a changing environment. This study considers the hypothesis that this technological system could be composed by methanol, by its raw materials and its applications. The methanol works as a gateway or focal point, to where the raw materials converge (all the renewable and fossil carbonic sources) and from where the several energy and chemical applications diverge. The study identifies the technologies involved as components of the technological system. Using a score criteria analysis, the flexibility of the system is analyzed taking in consideration its three structural elements: raw materials, methanol production and final applications. The analysis gives some evidence to the level of flexibility in raw materials and applications. This suggests that the methanol based system could work in some level of security in terms of raw material supply and methanol final markets. Regarding the methanol production, it can be verified a peculiar adaptation capacity of the available technologies which open the possibility of economic operation at different scales. The methanol system seems to be well adapted to the volume markets (the so called megaplants) and as well to the niche markets (plants suitable to particular conditions of raw material availability and/or methanol consumption). The thesis supports a conclusion that the methanol based system presents some conditions to respond to the current

challenges faced by the chemical and energy industries and it could be an option to restructure these industries

Key words: methanol, technological systems, architectural innovation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Matérias-primas e aplicações do metanol

Figura 2.1: Diagrama de inovação

Figura 3.1: Fluxograma das etapas da metodologia empregada

Figura 4.1: Fluxograma do processo de produção de metanol

Figura 5.1: Diagrama simplificado das fontes de carbono disponíveis para a produção de metanol

Figura 5.2: Tecnologia mais provável de utilização de GN em função de sua escala de produção

Figura 5.3: Fontes, processos de conversão e produtos da biomassa

Figura 6.1: Aplicações do metanol

Figura 6.2: Comparação entre SAPO-34 e ZSM-5 quanto a tamanho dos poros e produtividade para MTO

Figura 6.3: Fluxograma simplificado do processo MTO

Figura 6.4: Fluxograma simplificado da integração MTO/OC

Figura 6.5: Diagrama simplificado da produção de DME pela rota convencional

Figura 6.6: Fluxograma simplificado de produção de biodiesel

Figura 6.7: Esquema simplificado de uma célula a combustível

Figura 6.8: Funcionamento esquemático de DMFC

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Curva custo de produção X quantidade produzida

Gráfico 2.2: Curva mista U + L - Custo de produção X quantidade produzida

Gráfico 4.1: Evolução da demanda global de metanol (2007)

Gráfico 4.2: Demanda de metanol por região em 2006

Gráfico 4.3: Oferta de metanol por região em 2006

Gráfico 4.4: Principais fabricantes de metanol e suas participações no mercado mundial em 2007

Gráfico 4.5: Evolução histórica do preço internacional do metanol

Gráfico 4.6: Evolução dos preços dos contratos praticados pela Methanex na Ásia

Gráfico 5.1: Produção anual de carvão por regiões geográficas em 2007

Gráfico 5.2: Evolução dos preços1990-2007 de petróleo, GN e carvão

Gráfico 5.3: Preço comparativo do petróleo GN e carvão em US$/MMBTU

Gráfico 5.4: Reservas provadas de carvão por área geográfica

Gráfico 5.5: Tempo de atendimento da demanda de carvão, petróleo e gás natural considerando reservas provadas e produção de 2007

Gráfico 5.6: Participação das aplicações do carvão mineral no Brasil em 2006

Gráfico 5.7: Variação da disponibilidade em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas

Gráfico 5.8: Variação da disponibilidade em função da facilidade de produção das fontes carbônicas

Gráfico 5.9: Variação da facilidade da produção em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas

Gráfico 5.10: Variação do efeito ambiental positivo em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas

Gráfico 5.11: Variação da disponibilidade em função do efeito ambiental positivo das fontes carbônicas

Gráfico 5.12: Variação do efeito ambiental positivo em função da facilidade de produção das fontes carbônicas

Gráfico 6.1: Demanda mundial de metanol por derivados

Gráfico 6.2: Distribuição das principais aplicações dos derivados do formaldeído

Gráfico 6.3: Distribuição do consumo mundial de formaldeído por região

Gráfico 6.4: Distribuição percentual das aplicações de ácido acético

Gráfico 6.5: Distribuição do consumo mundial de ácido acético por região

Gráfico 6.6: Evolução mundial da demanda de metanol para produção de combustíveis

Gráfico 6.7: Evolução da participação das novas aplicações na demanda global de metanol

Gráfico 6.8: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento tecnológico em função do grau de desenvolvimento de mercado

Gráfico 6.9: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento de mercado em função do potencial de mercado

Gráfico 6.10: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento tecnológico em função do potencial de mercado

Gráfico 6.11: Previsão da demanda de metanol por aplicação em 2007, 2012+ (cenário otimista) e 2012- (cenário pessimista)

Gráfico 6.12: Previsão da demanda de metanol por aplicação em 2007, 2020+ (cenário otimista) e 2020- (cenário pessimista)

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Dimensões da flexibilidade

Quadro 4.1: Participação das aplicações de metanol no mercado brasileiro

Quadro 4.2: Participação das diferentes tecnologias na produção de metanol em fase gasosa

Quadro 4.3: As 20 maiores plantas de metanol no mundo

Quadro 4.4: Classificação das unidades de metanol existentes no mundo em função das suas capacidades instaladas

Quadro 4.5: Classificação dos novos projetos de metanol existentes no mundo em função da suas capacidades instaladas

Quadro 4.6: Estatísticas básicas das plantas e projetos de construção de unidades de metanol no mundo

Quadro 4.7: Principais diferenças entre os sistemas de produção de metanol em mega e pequena escala

Quadro 5.1: Principais características econômicas do petróleo e GN

Quadro 5.2: Composição típica do gás natural

Quadro 5.3: Graus auferidos dos indicadores de incerteza para as fontes carbônicas

Quadro 5.4: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento tecnológico na apuração comparativa de incertezas para matérias-primas

Quadro 5.5: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de facilidade de produção na apuração de incertezas para matérias-primas

Quadro 5.6: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de preservação ambiental na apuração comparativa de incertezas para matérias-primas

Quadro 5.7: Recursos previstos das fontes fósseis, em equivalente energético

Quadro 5.8: Grau de incerteza das matérias-primas

Quadro 6.1: Composição típica dos produtos de FCC operados nos modos de alto rendimento de eteno ou de propeno

Quadro 6.2: Demanda de metanol para projetos de MTO e MTP previstos e em construção na China

Quadro 6.3: Propriedades físico-químicas de alguns combustíveis

Quadro 6.4: Capacidade mundial instalada de produção de DME em 2006

Quadro 6.5: Projetos anunciados para a produção de DME no mundo

Quadro 6.6: Demanda mundial de metanol por aplicação em 2007 e sua previsão para 2012 e 2020

Quadro 6.7: Graus dos indicadores de incerteza por aplicação de metanol

Quadro 6.8: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento tecnológico na apuração comparativa de incertezas para aplicações

Quadro 6.9: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento do mercado na apuração comparativa de incertezas para aplicações

Quadro 6.10: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de potencial do mercado na apuração comparativa de incertezas para aplicações

Quadro 6.11: Equivalência entre os graus de desenvolvimento e incerteza

Quadro 6.12: Previsão dos cenários otimista (limite superior) e pessimista (limite inferior) da demanda de metanol, por aplicação, em 2012

Quadro 6.13: Previsão dos cenários otimista (limite superior) e pessimista (limite inferior) da demanda de metanol, por aplicação, em 2020

LISTA DE SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

ATR - Autothermal Reforming

BP - British Petroleum

BTL – Biomass to Liquid

BTU - British Thermal Unit

CCS - CO2 Capture and Storage

C/H – Razão Carbono/Hidrogênio

CMAI - Chemical Market Associates, Inc.

CTL - Coal to Liquid

DME - Dimetil éter

DMFC - Direct methanol fuel cells

EPA - Environmental Protection Agency

ETBE – Éter etil terc-butilico

EUA – Estados Unidos da América

FCC - Fluid Catalytic Cracking

FDA - Food Drug Administration

FPSO - Floating Production, Storage and Offloading

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GN – Gás Natural

GNL – Gás Natural Liquido

GTL - Gas to Liquids

GTO – Gas to Olefins

HAc - Ácido Acético

HC – Hidrocarboneto

HDTA - Hexametilenotetramina

ICI - Imperial Chemical Industries

IGCC - Integrated Gasification Combined Cycle

IPCC - Iran Petrochemical Commercial Company

KW – Kilo watt

MDI - Di-p-fenileno isocianato

MF - Melamina-formaldeído

MGC - Mitsubishi Gas Chemical

MHTL - Methanol Holdings Trinidad Limited

MJ – Ministério da Justiça

MMBTU – Milhões de BTU

MMSA - Methanol Market Service Asia

MMTA – Milhões de toneladas por ano

MMSCFD - Milhões Standard Cubic Feet per Day

MT – mil toneladas

MTA – Um mil toneladas por ano

MTB - Ministério do Trabalho e Emprego

MTBE – Éter metil terc-butílico

MTG – Methanol to gasoline

MTO - Methanol to olefins

MTP - Methanol to Propylene

NPG - Neopentil glicol

NOx – Óxidos de Nitrogênio

OC - Olefin cracking

OPEP - Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cells

PF - fenol-formaldeído

POM - Poliacetal polioximetilênico

PVC – Cloreto de polivinila

ROM - Run off Mine

R/P – Razão Reservas/Produção

SABIC - Saudi Basic Industries Corporation

SAPO - Silico-alumino-fosfato

SBR - Styrene Butadiene Rubber

SCO - Synthetic Crude Oil

SEF – Specialized Engineering Firms

SMR - Steam Methane Reforming

T – Toneladas

TA – Toneladas/ano

TD – Toneladas/dia

TME - Trimetiloletano

TMP - Trimetilolpropano

UF - Ureia-formaldeído

US$ - Dólar dos EUA

UOP - Universal Oil Products

VOC – Volatility Organic Compounds

Wh – Watt/hora

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....22
CAPITULO 2 - SISTEMAS TECNOLÓGICOS, ESCALAS DE PRODUÇÃO E FLEXIBILIDADE: REVISÃO DA LITERATURA.....31
2.1) Introdução.....31
2.2) Sistemas tecnológicos.....31
2.2.1) Definição.....31
2.2.2) Características de um sistema tecnológico.....33
2.2.2.1) Módulos, interfaces e suas compatibilidades.....33
2.2.2.2) A complexidade e suas consequências.....35
2.2.3) O processo de inovação num sistema tecnológico.....36
2.2.3.1) Tipos de inovação.....36
2.2.3.2) Dinâmica das inovações em sistemas tecnológicos.....37
2.2.4) O sistema modular na indústria química.....38
2.3) O papel da escala de produção.....39
2.3.1) Conceito de economia de escala.....39
2.3.2) Fontes de economias de escala.....41
2.3.3) Fontes de deseconomias de escala.....42
2.3.4) As curvas de volume de produção por custo de produção para a indústria....43
2.3.5) Influência da economia de escala na indústria química.....44
2.3.6) A contribuição das pequenas escalas.....45
2.4) Incertezas e flexibilidade.....47
2.4.1) As incertezas presentes no ambiente atual.....47
2.4.2) Conceito de flexibilidade.....48
2.4.3) Avaliação das flexibilidades inerentes ao sistema tecnológico.....51
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIAS.....53
3.1) Metodologia utilizada na identificação do sistema tecnológico.....53
3.2) Metodologia utilizada na avaliação do sistema tecnológico.....55
CAPÍTULO 4 – ASPECTOS TÉCNICO-ECONÔMICOS DA INDÚSTRIA DO METANOL.....61
4.1) Características gerais do metanol.....61
4.1.1) Propriedades e periculosidade.....61
4.1.2) Marcos regulatórios e seus impactos na indústria do metanol.....62

4.1.3) Cuidados no uso do metanol como combustível.....64
4.2) Panorama econômico do metanol.....65
4.2.1) Evolução mundial da demanda e produção.....65
4.2.2) Evolução dos preços internacionais do metanol.....67
4.2.3) A indústria do metanol no Brasil.....69
4.3) A produção de metanol.....70
4.3.1) A importância do gás de síntese.....70
4.3.2) Tecnologias para produção de metanol.....70
4.3.3) Detentores das tecnologias atuais para produção de metanol.....72
4.4) A importância da escala na economia do metanol.....72
4.4.1) Avaliação das plantas atuais de metanol.....72
4.4.2) Classificação das plantas de metanol instaladas por capacidade de produção.....73
4.4.3) Os novos projetos de produção de metanol e suas escalas.....75
4.4.4) Análise estatística da evolução das escalas produtivas.....76
4.4.5) O aumento da comoditização do metanol.....77
4.4.6) A importância da pequena escala na indústria do metanol.....78
4.5) A produção competitiva de metanol em diferentes escalas.....80
4.5.1) Características e diferenças entre os sistemas com diferentes tamanhos de escala.....80
4.5.2) O desafio de integrar escalas diferentes em uma mesma indústria.....81
4.6) Análise da flexibilidade presente na produção de metanol.....82
4.7) Resumo e conclusões do capítulo.....83
CAPÍTULO 5 – FONTES PARA PRODUÇÃO DE METANOL.....85
5.1) A importância da matéria-prima na indústria da química orgânica.....85
5.2) Características das matérias-primas.....87
5.3) Matérias-primas carbonáceas disponíveis atualmente.....88
5.3.1) Fontes de uso tradicional com crescimento histórico.....89
5.3.2) Fonte de uso tradicional com grande crescimento.....93
5.3.2.1) Economia do carvão.....94
5.3.2.2) Gaseificação do carvão……..98
5.3.2.3) Impactos ambientais do carvão……99
5.3.3) Fontes em desenvolvimento……..100
5.3.3.1) Biomassa……104

5.3.3.1.1) Características gerais da biomassa……...104
5.3.3.1.2) Aspectos econômicos da biomassa……...107
5.3.3.1.3) Impactos ambientais da biomassa……109
5.4) Comparação entre as matérias-primas……110
5.5) A flexibilidade de matéria-prima na produção de metanol……119
5.6) Resumo e conclusões do capítulo……122
CAPÍTULO 6 – APLICAÇÕES DO METANOL.....124
6.1) Aplicações com crescimento vegetativo.....125
6.1.1) Formaldeído.....126
6.1.2) Ácido Acético.....128
6.2) Aplicações com crescimento decrescente.....129
6.2.1) M100.....130
6.2.2) MTBE.....130
6.3) Aplicações com grande potencial de crescimento.....132
6.3.1) Produção de eteno e propeno.....132
6.3.1.1) Tecnologia MTO.....133
6.3.1.2) Tecnologia MTP.....136
6.3.2) DME.....138
6.3.3) Misturas M15/M100.....143
6.3.4) Biodiesel.....144
6.3.5) Produção de hidrocarbonetos combustíveis.....147
6.3.5.1) MTG.....147
6.3.5.2) MtSynfuels – Lurgi.....148
6.3.6) Célula a combustível.....149
6.4) China, a propulsora das aplicações de metanol.....154
6.5) Consolidação das aplicações.....155
6.6) Síntese e conclusões do capítulo.....168
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES.....171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....181

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O contexto socioeconômico mundial atual apresenta fatos que repercutem diretamente nas indústrias da química e da energia[1]. A segurança de abastecimento é intensamente valorizada devido à geopolítica e a evolução imprevisível dos preços das matérias-primas como petróleo e gás natural (GN). Observa-se, por exemplo, que o petróleo teve seu preço duplicado em 2007 e que, em 2008, variou do pico US$ 150, em julho, ao mínimo US$ 40, em dezembro, caracterizando-se o que poderia ser visto como o terceiro choque. Por outro lado, o efeito estufa, que provoca o aquecimento global, bem como a deterioração da camada de ozônio, vem levando ao endurecimento das restrições ambientais. Em decorrência disso, existem inúmeras dúvidas quanto às formas de organização atual da indústria da energia e de outras indústrias fortemente baseadas em recursos fósseis, como a indústria petroquímica. Vislumbra-se uma perspectiva de mudanças e de exploração de alternativas, que poderiam emergir futuramente como novas formas estruturais. Esse conjunto de fatos demonstra que os setores da energia e da química passam atualmente por um período que apresenta grande tendência de mudanças. Há ainda o desconhecimento quanto à direção dessas mudanças. Qual será a melhor tecnologia de geração de energia no futuro? Que combustível utilizará? Esse combustível será obtido por síntese química ou será apenas uma fração separada de uma fonte? Essa fonte será renovável ou fóssil? Tais fatores indicam um alto grau de incerteza quanto ao futuro destas indústrias.

Portanto, atualmente os esforços devem ser direcionados para reorganização, busca de novos produtos e quebra de paradigmas tecnológicos e estruturais, que busquem minimizar essas incertezas.

A futura organização das indústrias poderá seguir um de dois caminhos principais, que não são mutuamente exclusivos. Um primeiro constituído por rotas diretas de transformação de matérias-primas em produtos finais. Um segundo composto por um sistema tecnológico[2], que possua um produto focal capaz de reestruturar as cadeias produtivas atualmente existentes, incorporando também as

---

[1] A indústria da energia para esse trabalho é composta pelas diferentes aplicações dos combustíveis tradicionais GLP, gasolina e diesel e seus possíveis novos substitutos metanol e DME.. Compreende ainda o metanol utilizado em células a combustível para geração de energia elétrica.

[2] Entende-se como sistema tecnológico um conjunto de tecnologias que se interligam para formarem uma configuração produtiva. Será pormenorizado no Capítulo 2.

novas tecnologias emergentes. A tendência natural em qualquer indústria é a busca por uma rota direta de transformação da matéria-prima em produto. O objetivo é a diminuição do número de etapas ou operações do processo produtivo, que leve à minimização do custo de produção. A engenharia química se empenha em reduzir o número de etapas, e em transformar todo o processo num sistema capaz de funcionar de forma contínua, numa planta de grande escala, e obter efeitos importantes de redução de custo. Entretanto, o ambiente econômico atual apresenta inúmeras incertezas, e um arranjo que possua maior flexibilidade terá maior chance de amenizá-las. Por exemplo, a tecnologia atualmente em desenvolvimento, onde se converte diretamente metano em combustíveis líquidos (como gasolina ou diesel) sem passar por um intermediário (DUNHAM *et alii*, 2002). Observa-se que por mais que essa rota fosse otimizada, poucas fontes de matéria-prima (metano) produziriam poucos produtos finais (gasolina ou diesel), combustíveis, usados num único tipo de aplicação, a combustão. Isso mostra a baixa flexibilidade desse sistema, pois haveria poucas fontes de matéria-prima produzindo poucos produtos para uma aplicação específica. Quando diversas matérias-primas podem produzir um intermediário, e esse possui muitas aplicações, há um considerável aumento na flexibilidade da arquitetura.

A indústria química tem experiência em trabalhar com produtos focais, aqueles que podem ser obtidos pelo maior número possível de matérias-primas e que tenham ampla diversidade de aplicações. O eteno, por exemplo, é chamado de *building block* pela indústria petroquímica, pois é uma unidade que se repete na produção de polímeros, como nos diferentes tipos de polietileno. Esse alceno pode ser também ponto de partida para a produção de inúmeros importantes produtos químicos como: estireno, óxido de eteno, etanol (em países que não possuem sua produção pela via fermentativa), clorados, acetatos de vinila, entre outros. Observa-se, ainda, que o eteno pode ser obtido a partir de diferentes fontes como: petróleo, GN, carvão e biomassa. A indústria da energia também possui essa característica na energia elétrica, que pode ser obtida através de inúmeras fontes e possui um grande número de aplicações.

Num ambiente de incerteza, a busca por flexibilidade é a manutenção de um portfólio de opções, que forneça o máximo de repostas possíveis, em face às variações do meio. Os sistemas tecnológicos estão em constante mutação. Essas mudanças envolvem elementos de conhecida certeza e outros elementos de

incerteza. Os elementos conhecidos fazem o sistema operar em condição ótima. Porém, os elementos de incerteza tendem a desestabilizar esta situação e afetar o desempenho. Flexibilidade, então, seria definida como a capacidade necessária em fornecer respostas às mudanças no ambiente, de maneira a evitar as perdas de desempenho (SILVA, 2008).

Em vista do cenário apresentado, esse trabalho será construído baseado nas seguintes hipóteses:

- Existe a necessidade da busca de novas configurações que respondam aos desafios colocados pelas indústrias da química e da energia, para consequente atenuação do nível de incertezas.

- Essa nova estrutura será um sistema tecnológico que contenha um determinado produto focal, no qual convergirão as possíveis matérias-primas para sua obtenção e suas aplicações.

- A última hipótese é decorrente das anteriores, e baseia-se na afirmação de que um sistema que contenha um intermediário conferirá maior flexibilidade e consequentemente diminuirá o grau de incertezas.

A partir das hipóteses apresentadas serão formuladas perguntas de pesquisa, que facilitem a orientação das reflexões e discussões a serem produzidas. Tais perguntas poderão, se necessário, ser reescritas futuramente de formas mais precisas ou mais respondíveis. São elas:

- Existe alguma nova configuração que possa funcionar como reestruturante nas cadeias produtivas da química e da energia?

- Quais produtos químicos podem agir como pontos focais nessa nova estrutura?

- Qual a contribuição que poderá ser obtida através das flexibilidades existentes?

As investigações preliminares levam à construção de um sistema que pode ter como elemento estruturante duas alternativas: gás de síntese[3] e metanol. À primeira vista, o gás de síntese se apresenta como um melhor intermediário. Comparado-o com o metanol é fácil notar que ele possui flexibilidades similares quanto a matérias-primas e escalas de produção. Entretanto, possui uma flexibilidade muito superior

[3] É a mistura de CO (monóxido de carbono) e hidrogênio em diferentes proporções, cujo valor da relação é função da tecnologia utilizada. Recebe o nome de gás de síntese, pois é insumo para a produção de importantes produtos como hidrocarbonetos líquidos, amônia e metanol.

em aplicações, já que o próprio metanol é produto dele. É também ponto de partida para tecnologias como *Gás to Liquid* (GTL), *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC) e produção de hidrogênio, de grandes capacidades de crescimento de demanda, que não necessitam do metanol como matéria-prima. Mas o gás de síntese não se estoca nem se comercializa diretamente, devido ao seu alto custo de transporte. A exigência de razões distintas de H2/CO, como matéria-prima para os diferentes processos, não confere, também, ao gás de síntese a flexibilidade encontrada no metanol, que pode ser utilizado como tal em inúmeras aplicações.

Os produtos químicos podem ser destinados ao uso cativo ou â comercialização. O gás de síntese é exclusivamente de uso cativo. A fração de eteno, visto anteriormente como exemplo de ponto focal para a petroquímica, comprada ou vendida, é pequena. Entretanto, observa-se que a fração de metanol em comércio tem aumentado vertiginosamente, em função da construção das megaplantas que o produzem preferencialmente para a comercialização. Conforme será mostrado no Capítulo 3, essa atividade comercial é exercida pelos três maiores produtores mundiais: Methanex, MHTL (Methanol Holdings Trinidad Limited) e Sabic (Saudi Basic Industries Corporation), que detêm aproximadamente 35% do mercado global, e que tiveram suas plantas de maiores capacidades produtivas construídas nos últimos 10 anos. É previsto que esse aumento contínuo provoque a tendência do metanol a se comoditizar, uma das condições que o facilitaria para ser elemento estruturante de um sistema tecnológico. A comoditização tem como principal característica a padronização, como a cotação internacional de preço, e será aprofundada na seção 4.5.

A viabilidade da utilização do metanol nas indústrias da energia e da química já vem sendo discutida. Olah *et alii* (2006) em seu livro The Methanol Economy propõem o metanol como novo elemento estruturante, apoiado principalmente nos aspectos ligados à indústria de energia e às questões ambientais. Esse trabalho mostra as vantagens do metanol como melhor combustível futuro, comparando-o, principalmente, com o hidrogênio, seu atual principal concorrente. Mapeia também a sua possibilidade de ser obtido a partir de praticamente todas as matérias-primas, carbônicas fósseis e renováveis, e sua ampla gama de aplicações. Entretanto, não propõe uma nova arquitetura nas indústrias da química e da energia, diretamente envolvidas em sua abordagem, que coloque o metanol na posição de elemento focal. É importante também acrescentar que a mudança de paradigma, observada

no aumento das escalas de produção de metanol, com a construção de megaplantas, e consequente diminuição do custo de produção, é outro argumento que reforça a sua candidatura. Daí, surge a última pergunta:

- Até que ponto o metanol pode responder as condições exigidas para ser um elemento estruturante das indústrias da energia e da química?

As discussões das respostas às perguntas apresentadas serão desenvolvidas no decorrer do trabalho através da avaliação de indicadores qualitativos tais como:

- Flexibilidade nas escalas de metanol;
- Flexibilidade nas fontes do metanol;
- Flexibilidade dos usos do metanol com multiplicação de seus usos em química e energia;

A função de um elemento estruturante é a mesma noção de *gateway*, inicialmente desenvolvida por David (1988) para explicar a estruturação do setor elétrico. É entendida aqui como o ponto de convergência de uma ou mais indústrias num só produto, que absorve as sinergias envolvidas e concentra suas potencialidades. Esse produto torna-se então o ponto focal de estruturação de um conjunto expressivo de cadeias produtivas.

Desde o início da civilização, os processos químicos participam da indústria da energia, como na simples combustão usada em cocção, aquecimento residencial e iluminação pública. Na indústria do petróleo, que produz prioritariamente insumos para a indústria da energia, também estão presentes processos químicos de conversão, como: o craqueamento e reforma catalítica, utilizados nas refinarias. Apesar de o objetivo primordial ser a separação através de processos físicos, como a destilação. Uma característica que já se vem desenhando, e será uma constatação futura, é a maior interferência da síntese química na indústria de energia, ou seja, a maior utilização de processos químicos para a produção de insumos energéticos. A grande maioria das inovações em combustíveis líquidos está em produtos e tecnologias baseados na síntese química, como metanol, biodiesel, células a combustível e a tecnologia GTL, que produz a partir do gás natural, hidrocarbonetos líquidos, como o diesel, preferencialmente. A química vem se tornando muito mais importante para a indústria da energia. Até então, a química era coadjuvante na indústria do petróleo, que se resumia em retirar o produto da jazida e, basicamente, separá-lo em frações através do refino. A necessidade de otimização desta operação levou à introdução do craqueamento nos esquemas de

refino. Essas tecnologias baseadas em catálise foram algumas das poucas áreas em que a química realmente atuava, além dos processos auxiliares, para tratamento de produtos finais, como a hidrogenação. É importante lembrar que os desenvolvimentos em equipamentos e processos estão no âmbito da engenharia química. Esta constatação pode ser feita a partir de inúmeras referências cujo tema central é o refino do petróleo como Szklo e Uller (2008), Leprince (2001) e Leffler (2000).

A indústria química possui características estruturais, organizacionais, comportamentais e estratégicas, como por exemplo, as escalas produtivas, diferentes da indústria da energia. Outra grande diferença está na complexidade das sínteses de produtos, que é muito maior na indústria química. Além disso, também possuem historicamente dinâmicas e atores distintos. Portanto, a aproximação destas diferentes indústrias deverá causar mudanças e adaptações em todas as suas interfaces, para que o conjunto se comporte competitivamente.

O estudo do metanol como estruturante das indústrias de químicos e energéticos é um novo arranjo das inúmeras rotas tecnológicas disponíveis ou em desenvolvimento nesses setores, como pode ser visto na Figura 1.1.

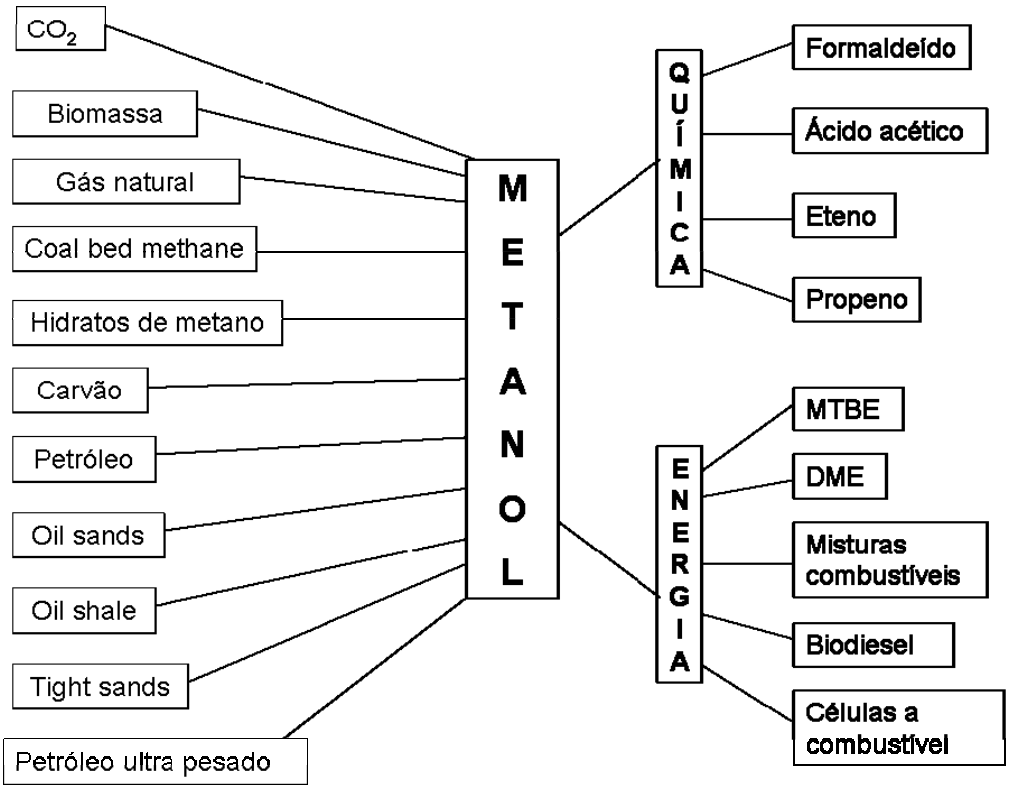


Figura 1.1: Matérias-primas e aplicações do metanol - Fonte: Elaboração própria

A primeira impressão da visualização da Figura 1.1 indica que esse arranjo possui grande flexibilidade, já que o metanol, que é seu elemento central, pode ser obtido a partir de todas as fontes carbonáceas existentes, fósseis ou renováveis. Tem também a vantagem de poder ser utilizado em aplicações com grande potencial de desenvolvimento, como as células a combustível[4] e o dimetil éter (DME), por exemplo.

Esse arranjo, com todas as rotas que o compõem, constitui um sistema tecnológico. Os sistemas tecnológicos são constituídos por módulos e interfaces. Cada tecnologia é um módulo, que é conectado a um ou mais módulos diferentes, através de interfaces. Essas interfaces precisam ser muito bem coordenadas, de modo que todo o sistema flua com a dinâmica necessária, para que juntas possam suprir os produtos desejados, com a melhor performance. Portanto, um sistema tecnológico não depende apenas das tecnologias envolvidas isoladamente (os módulos), mas também da compatibilidade e relação entre elas (as interfaces).

Henderson e Clark, 1990, mostraram em seus estudos, que as noções de inovações incrementais e radicais, não eram suficientes para explicar os processos de inovação, em sistemas cada vez mais complexos e sofisticados. Os sistemas tecnológicos têm, como componentes, as tecnologias utilizadas e suas respectivas interfaces. Há ainda a arquitetura com que estas tecnologias se interligam para formar o sistema. Pode haver então inovações nos componentes e na arquitetura do sistema como um todo. Portanto, há caminhos distintos das inovações nos sistemas tecnológicos. Existe a inovação no componente que pode ser incremental ou radical e a inovação no sistema, que age na forma como o sistema se estrutura, e é chamada de inovação arquitetural.

Esse trabalho visa estudar as inovações radicais e incrementais nas tecnologias novas e tradicionais que compõem o sistema. Discutirá também a inovação arquitetural presente, já que esse novo arranjo, baseado no metanol como *gateway*, provocará uma reordenação em tecnologias já existentes e em desenvolvimento, da qual surgirá um novo sistema de produção de químicos orgânicos e energia.

---

[4] As células a combustível são uma tecnologia, entretanto para esse trabalho entende-se como a aplicação do metanol como combustível dessa célula.

O potencial do metanol se tornar um elemento estruturante das indústrias da química e de energia será apoiada na análise de três fatores críticos inter-relacionados: matérias-primas, produção competitiva de metanol em diferentes escalas e aplicações atuais e potenciais, como ilustrado na Figura 1.1.

As matérias-primas sempre desempenharam papel determinante na evolução da indústria química e, em particular, no surgimento e desenvolvimento da petroquímica (SPITZ, 1988). As questões que se apresentam hoje para a indústria, tanto em termos de alternativas fósseis como da introdução de matérias-primas renováveis, serão avaliadas na perspectiva de produção de metanol.

O segundo ponto crítico é o da tecnologia de produção do metanol. Nessa dimensão, as inovações de processo têm permitido grandes aumentos nas escalas produtivas das plantas, que devem ser entendidas como fator crucial para o alcance de capacidades superiores às atuais megaplantas, de 10.000 toneladas/dia de metanol (METHANOL, 2008a). Essa trajetória de aumento proporcionará reduções de custo, fundamentais para viabilizar as aplicações potenciais nas indústrias da química e da energia, vislumbradas para o metanol. Ao mesmo tempo ainda existem projetos de construções de plantas de menores escalas para o aproveitamento de fontes de baixo custo de oportunidade e mercados de menor demanda.

No que se refere às aplicações, será estudada a dinâmica tecnológica de desenvolvimento de inovações em usos novos e tradicionais, assim como avaliado o seu potencial mercadológico.

A análise da hipótese apresentada nessa tese, tendo o metanol como elemento estruturante das indústrias da química e da energia, será desenvolvida através de análise qualitativa, pelo método do critério de pontos. Tal metodologia foi escolhida, dentre as atualmente disponíveis, pois é a que melhor responde à necessidade exigida nesse trabalho, que é a de comparar uma lista de matérias-primas e aplicações do metanol, com relação a dimensões técnicas e econômicas. Essas dimensões foram definidas de forma a poder indicar o grau de incerteza de cada fonte ou uso do metanol, com relação a cada uma delas. São então atribuídos graus individuais. A análise comparativa é então realizada, a partir da ordenação desses graus de incerteza individuais auferidos.

O ambiente futuro provavelmente não contará com apenas uma alternativa para a geração de energia e produção de produtos químicos, haverá diversos sistemas tecnológicos que se complementarão. Esse estudo pretende avaliar se o sistema baseado em metanol apresenta-se como uma opção potencial de modelo, a ser utilizado no atual ambiente de incerteza, para estruturar as indústrias da química e da energia. É notório que ele apresenta qualidades que podem minimizar a catástrofe no atual ambiente de incertezas, especialmente com as flexibilidades em matérias-primas, escalas e aplicações. Contudo, é importante salientar que existem fatores que podem inibir ou enfraquecer o desenvolvimento desse sistema, como a ocorrência de possíveis rupturas tecnológicas.

Além desta introdução, este trabalho possui mais seis capítulos. No Capítulo 2 serão revisados os conceitos teóricos de arquitetura de sistema tecnológico e seus tipos de inovação, a contribuição das economias de escala na indústria e a relação incerteza/flexibilidade.

O Capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas na identificação do sistema tecnológico baseado em metanol, e na escolha de um método de análise, capaz de comparar as diferentes alternativas de matérias-primas e aplicações.

O Capítulo 4 mostra o panorama da economia do metanol no mundo e no Brasil, mapeia as tecnologias existentes para sua obtenção, discute a interferência do tamanho da escala produtiva na indústria do metanol e avalia a flexibilidade existente.

No Capítulo 5 são vistas as matérias-primas fósseis e renováveis que podem produzir o metanol. Posteriormente, discute-se sua diversidade e disponibilidade, assim como a perspectiva de utilização de cada uma delas. Finalmente, avalia-se a flexibilidade conferida.

No Capítulo 6 apresenta-se e discute-se técnica e economicamente a dinâmica das aplicações tradicionais e o potencial dos novos usos do metanol, na indústria química e da energia. Estuda-se a flexibilidade presente, como parte da análise da viabilidade do sistema tecnológico baseado em metanol. Finalmente, no Capítulo 7 são discutidas as conclusões obtidas.

CAPITULO 2: SISTEMAS TECNOLÓGICOS, ESCALAS DE PRODUÇÃO E FLEXIBILIDADE: REVISÃO DA LITERATURA

2.1) Introdução

O objetivo deste capítulo é rever, à luz dos conhecimentos teóricos existentes, o conceito e a arquitetura dos sistemas tecnológicos, sua aplicabilidade na indústria da química e da energia e os tipos de inovação neles desenvolvidas. Nestes setores observa-se a importante contribuição das economias de escala. Os sistemas tecnológicos são modulares e essas economias, em cada módulo, interferem na economia de todo o sistema. Será também mostrada uma revisão teórica, visando ancorar a importância destas economias de escala na indústria. O ambiente atual conta com muitas incertezas, que podem ser minimizadas através das flexibilidades existentes. Portanto, é também objetivo desse capítulo discutir as noções de flexibilidade de forma a identificar a sua aplicabilidade nos sistemas tecnológicos. O capítulo está dividido em três partes. Na primeira são enfocados os sistemas, na segunda, as economias de escala e na terceira, as flexibilidades.

A abordagem sobre os sistemas tecnológicos será feita através do estudo da sua definição e suas características, dos diferentes tipos de processos de inovação, assim como da sua aplicabilidade na indústria química.

O papel da escala será discutido com base na sua importância nos processos industriais através das suas fontes de economias e deseconomias. Posteriormente, será estudado o seu papel no desenvolvimento da indústria química assim como a sua diversidade.

Por último, serão revistos os conceitos de flexibilidade, assim como sua aplicação na amenização das incertezas presentes no ambiente atual.

2.2) Sistemas tecnológicos

2.2.1) Definição

O termo tecnologia expressa uma idéia familiar no dia a dia, entretanto sua definição precisa não se revela tão evidente. Sua fronteira com a ciência nem sempre é clara, e sua definição tem mudado com o tempo. Esse termo apresenta

pelo menos três significados importantes (MACKENZIE E WAJCMAN, 1985). No nível mais básico, tecnologia se refere aos *objetos físicos*, como carros, televisões, construções civis, computadores, satélites ou metanol. Entretanto todos estes objetos só existem porque fazem parte de um conjunto de *atividades humanas*. Tecnologia se refere, então, às atividades de produção e utilização destes objetos. Estas atividades sociais que as pessoas realizam diariamente só são possíveis porque elas têm *conhecimento* sobre a produção e utilização daqueles objetos. Objetos tecnológicos não têm sentido sem o conhecimento sobre como usá-los, consertá-los, projetá-los e produzi-los. Na prática, a tecnologia é a reunião desses três aspectos e geralmente não há sensibilidade para separá-los (HUGES *et alii* 1987).

Um sistema tecnológico é definido como uma dinâmica rede entre um grupo de componentes, que interagem numa área econômico-industrial específica, através de uma particular infraestrutura institucional, com o objetivo de gerar, difundir e utilizar produtos. São constituídos fundamentalmente por três elementos: atores (e suas competência), a rede de relacionamentos e as instituições regulatórias (CARLSSON E STANKIEWICZ, 1991).

Os atores (e suas competências) podem ser firmas como fornecedores, clientes, investidores ou outras organizações. A rede de relacionamentos constitui o canal de transferência do conhecimento tácito e explícito. Essas redes podem ser construídas baseadas em mercados, assim como para identificação de problemas e desenvolvimento de novas soluções técnicas. São fortemente integradas, o que aumenta a base de recursos dos atores individuais em termos de ganho de informação e conhecimento dos outros atores. A rede também influencia na percepção do que é desejável e possível, isto é, formata os atores imaginando o futuro, guiando decisões específicas das firmas e outras organizações. As instituições estipulam as normas e regras regulando a interação entre os atores. As regras das instituições variam: umas influenciam na conectividade do sistema e outras na sua estrutura como um todo. Instituições são importantes não somente num estágio específico da tecnologia como também na construção de novos arranjos produtivos locais (JACOBSSON E BERGEK, 2003).

Os aspectos centrais dos sistemas tecnológicos são a competência econômica (habilidade de desenvolver e explorar novas oportunidades de negócio), o agrupamento de recursos e a infraestrutura institucional. Na presença de um

empreendedor e massa crítica, redes de relacionamento podem ser transformadas num sinérgico conglomerado de firmas e tecnologias que proporcionarão aumento das novas oportunidades de negócio (JACOBSSON E JOHNSON, 2000).

Vários conceitos são similares ao de sistemas tecnológicos. Em particular poderiam ser mencionados: arranjos produtivos locais (PORTER, 1998), configurações tecno-sociais (GEELS, 2002) e no conceito da construção social da tecnologia (GARUD E KARNOE, 2001). Um outro conceito atualmente muito utilizado na indústria química é o de plataforma química. Usado para identificar um produto químico que pode servir de base para a construção de uma árvore de produtos. Na química, a partir de biomassa, essa expressão aparece com frequência (CHECKBIOTECH, 2009). Entretanto esse modelo é menos abrangente, pois não trata da flexibilidade na matéria-prima, enfoca apenas a diversidade das aplicações.

O estudo do metanol como um elemento de reorganização das indústrias da química e da energia baseia-se em uma nova arquitetura. Os conceitos anteriores mostram que essa nova arquitetura é um sistema tecnológico composto pelas inúmeras rotas tecnológicas, disponíveis ou em desenvolvimento, nestes setores, como pode ser visto na Figura 1.1. Fazem parte também desse sistema tecnológico o mercado, que é decorrente de cada componente e do sistema como um todo, assim como todas as interfaces que compõem a rede de relacionamentos intrassistêmica.

2.2.2) Características de um sistema tecnológico

2.2.2.1) Módulos, interfaces e suas compatibilidades

Os sistemas tecnológicos podem ser caracterizados como modulares. Cada tecnologia, por exemplo, é um módulo, com características próprias, que é conectado a um ou mais outros módulos, através de interfaces. Os módulos e as interfaces precisam ser coordenados de modo que todo o sistema flua com a dinâmica necessária, para que juntos possam suprir os produtos desejados com satisfatório desempenho. Não depende somente das tecnologias envolvidas isoladamente em cada módulo, mas também da compatibilidade e agilidade entre elas (SANCHES 2002).

Compatibilidade é um atributo das relações, que definem as regras dos acertos e interações, entre os componentes do sistema. O conjunto destas relações e acertos é chamado de arquitetura do sistema. O grau de compatibilidade entre os componentes define três características básicas de um sistema tecnológico: integridade, modularidade e capacidade de desenvolvimento (CHOO e BONTIS, 2002).

- Integridade representa a consistência entre as partes, se elas fluem bem, se os componentes trabalham em sinergia, se o *layout* do módulo maximiza a área disponível e se a logística entre os componentes é a melhor possível. Os componentes individualmente podem ter alto desempenho, mas se a relação entre eles não estiver azeitada, ou seja, com alta integração, a performance do sistema estará submaximizada (CLARK, 1990).

- Modularidade é a individualidade e independência das partes. Ela permite que os componentes sejam produzidos separadamente e usados em diferentes configurações, sem comprometer a integridade de cada sistema em que participa. O metanol, por exemplo, pode ser produzido a partir de várias matérias-primas e pode ser utilizado na produção de diversos produtos químicos e energéticos, ver Figura 1.1. Terá maior intensidade da modularidade o sistema mais integro, ou seja, o sistema que, apesar de constituído por módulos que participam de outros sistemas, tenha interfaces claramente padronizadas, que não sofram interferência da participação do módulo nos outros sistemas. Portanto, quanto menos ruído houver dos módulos nas relações interfaciais pré-estabelecidas e, quanto mais padronizadas forem estas relações, maior a modularidade (GARUD e KUMARASWAMY, 1995).

Capacidade de desenvolvimento é a existência de graus de liberdade no sistema que possibilitem o desenvolvimento das competências existentes e da introdução de novas. É a capacidade do sistema de aumentar sua produtividade absorvendo as inovações. Por exemplo: se numa planta qualquer há um gargalo de produção e ocorre uma inovação, que pode ser rapidamente incorporada, e permite eliminar esse gargalo. A maior capacidade de desenvolvimento se dá quanto mais rápida for a absorção da nova tecnologia (HUGHES, 1987).

2.2.2.2) A complexidade e suas consequências

Uma outra característica importante é a alta complexidade apresentada pelos sistemas tecnológicos. Isso se deve não só à infinidade de competências tecnológicas envolvidas, como também às diferentes possibilidades de elas se conectarem para a execução de uma tarefa, assim como na forma com que todas elas são coordenadas e geridas.

Existe então uma grande quantidade de redes que envolvem muitos atores, variáveis, especificações e critérios. Essas redes exigem que suas relações sejam as mais transparentes possíveis, com definições claras das responsabilidades de cada componente para cada ação. Por mais que os administradores busquem essa transparência nas relações, suas variáveis e critérios vão sofrendo interferências, chegando ao consequente surgimento de dúvidas de quem decide o quê, e em que base. Os meios de produção também diminuem cada vez mais em equipamentos e aumentam em informação e tecnologias especializadas, comprovando a evolução permanente da complexidade (BRUSONI, 2003).

Inevitavelmente, nesses sistemas complexos surgem ruídos econômicos, tecnológicos e estratégicos que, se não minimizados ou resolvidos, bloqueiam ou criam dificuldades para a fluidez do sistema como um todo. A busca por inovações, assim como sua implementação, ocorre em diferentes dinâmicas em cada um dos módulos, o que pode provocar desequilíbrios no sistema, portanto há necessidade de coordená-las. É preciso ainda evitar a obstrução causada pela alta formalidade das rotinas e regras da burocracia e pelo elevado número de níveis da hierarquia, que regem desde as relações interpessoais até as modulares (UTTERBACK E ABERNATHY, 1978). A grande burocracia presente faz com que idéias que ameacem a estabilidade do sistema em funcionamento sejam desencorajadas, e as que prolonguem a vida de seus produtos e tecnologias sejam incentivadas (UTTERBACK, 1994).

2.2.3) O processo de inovação num sistema tecnológico

2.2.3.1) Tipos de inovação

As inovações são tradicionalmente classificadas em radicais e incrementais. A inovação incremental é construída com base no conhecimento pré-existente e provoca modestas mudanças tecnológicas, enquanto a inovação radical se dá sobre novos conhecimentos e provoca mudanças tecnológicas profundas (PAVITT *et alii*, 1997). Entretanto, Henderson e Clark, em 1990, constataram que os conceitos de inovações incrementais e radicais eram incompletos para explicar os processos de inovação, que ocorriam em sistemas cada vez mais complexos e sofisticados. Como visto anteriormente, um sistema tecnológico é de grande complexidade e composto por módulos e pelas suas interfaces. A forma com que eles se interligam para compor o sistema determina a sua arquitetura. Observa-se que existem diferenças entre as características dos componentes e as do sistema como um todo, o que leva a consequentes caminhos distintos para as inovações, em cada um deles.

Tem-se a inovação nos componentes, a modular, e a inovação na estruturação do sistema que é chamada de inovação arquitetural. A primeira trata das inovações nas competências inerentes aos componentes, e a segunda cobrirá as inovações que ocorrem na arquitetura do sistema.

Henderson e Clark, 1990, consideram então 4 tipos de inovação presentes em sistemas complexos: radical, incremental, modular e arquitetural. Na figura 2.1 esses 4 tipos estão distribuídos ao longo de duas dimensões: a horizontal que mostra o impacto das inovações nos componentes e a vertical que mostra o impacto na arquitetura.

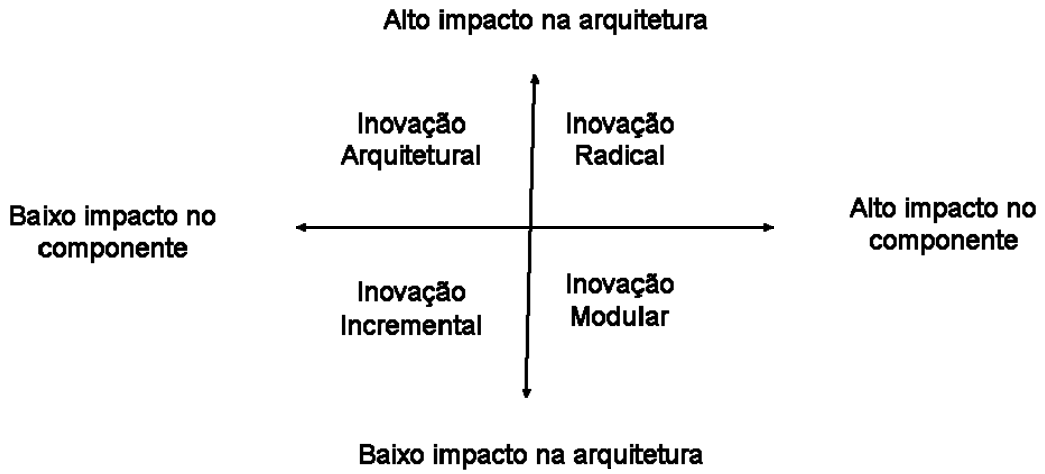


Figura 2.1: Diagrama de inovação - Fonte: Adaptado de Henderson e Clark, 1990

Inovação radical e incremental são pontos extremos das duas dimensões e não possuem participação exclusiva, pois podem possuir contribuições complementares e distintas em cada situação. A inovação radical estabelece uma nova arquitetura e novas competências para os componentes. Já a inovação incremental possui um menor impacto individual, pois refina o desenho estabelecido e proporciona melhorias no componente, modificando muito pouco suas competências e as ligações entre eles. Há também aquela de alto impacto nos componentes, a inovação modular, que atua intensamente, podendo provocar alterações nas interfaces. Já a de alto impacto na arquitetura, a inovação arquitetural, age principalmente na reorganização das relações entre os módulos.

2.2.3.2) Dinâmica das inovações em sistemas tecnológicos

Considerando-se um novo sistema tecnológico, onde seus componentes, as tecnologias tradicionais e emergentes, foram interligados de uma nova forma, com o objetivo de amenizar as incertezas ambientais presentes, por exemplo, observa-se que esse novo sistema apresentará inovações radicais na arquitetura. Essas inovações terão alto impacto na estrutura, visto que provocarão uma reorganização das tecnologias envolvidas, desde as matérias-primas até as aplicações. Entretanto, um novo modelo de reator, menor, mais barato ou com maior conversão, será uma inovação radical e modular, e terá alto impacto no módulo. Possuirá também um impacto, sendo que menor, na arquitetura, já que os módulos são interligados.

A essência da inovação arquitetural é a reconfiguração de um sistema pré-estabelecido, através da produção de novas interligações entre os componentes existentes. Isto não quer dizer que os componentes são intocáveis, pois uma inovação arquitetural pode começar com uma mudança no componente como capacidade de produção, ou outro qualquer parâmetro que poderá provocar uma nova relação entre os componentes (Henderson e Clark, 1990).

Em sistemas de alta complexidade há ainda uma fonte importante de aprendizado que brota da experiência real com o uso do produto ou processo. As grandes inovações radicais são seguidas de inúmeras pequenas inovações incrementais, que determinam a taxa de crescimento da inovação principal (ROSENBERG, 2006). Essas inovações incrementais, tanto nos módulos como nas interfaces, implementadas ao longo de todo o sistema, poderão ter alta interferência na sua arquitetura, levando inevitavelmente ao surgimento de inovações arquiteturais.

2.2.4) O sistema modular na indústria química

A indústria química usa sistemas modulares desde o seu início. O arranjo de reatores, torres, vasos, bombas e outros equipamentos se dão de inúmeras maneiras, de acordo com o processo produtivo a ser utilizado. Uma cadeia produtiva da indústria química, como o próprio nome diz, é constituída por elos autônomos interligados, o que caracteriza uma organização sistêmica.

A obtenção de polietileno a partir do petróleo envolve etapas como: refino do petróleo para produção de nafta, pirólise da nafta para produção de eteno e polimerização do eteno nos diferentes polietilenos, como os de alta e baixa densidades. Este conjunto de processos pode ser executado em uma empresa verticalizada, onde se realizam todas as etapas dentro de uma única firma. Outro arranjo possível é a partição deste sistema, onde a execução de cada etapa ou grupo de etapas é realizada por empresas diferentes. Em ambos os casos, observam-se organizações sistêmicas, com módulos distintos, que executam cada função necessária, independente de estarem numa única ou em várias arquiteturas.

Até a segunda guerra mundial as inovações em processos e equipamentos na indústria química eram idealizadas e executadas dentro das empresas fabricantes de produtos químicos. O refino do petróleo e a petroquímica seguiram um novo

modelo, onde as inovações foram produzidas por empresas de engenharia especializadas (SEF – *Specialized Engineering Firms*). A presença destas firmas se tornou tão forte que, nos anos 1960, três quartos das empresas químicas eram projetadas e construídas por elas. Atualmente as SEFs preferem licenciar suas tecnologias de processo e engenharia sem construir as plantas (ROSENBERG, 1994).

Várias vantagens resultam na utilização das SEF no desenho e desenvolvimento dos processos químicos. Durante os anos 1920-30, a indústria química tinha seu foco nas inovações de produto[5]. Já as SEF buscavam o desenvolvimento de novos processos, o que fez com que estas empresas se tornassem mais habilitadas que as empresas químicas nessa área. Foram beneficiadas com suas experiências no refino do petróleo, onde adquiriram competências, como a produção em larga escala característica deste setor. Outra importante fonte de vantagem das SEF veio da sua oportunidade de absorver conhecimento e explorar as economias de especialização, e a competência de *learning by doing*. As inovações foram desenvolvidas para muitos clientes, que necessitavam de novas tecnologias ou aumento de escala. Isto possibilitou o acúmulo de diferentes informações, relacionadas aos mais variados processos (sistemas) que utilizavam uma mesma tecnologia, assim como das dificuldades de construção e operação (ROSEMBERG, 1994 e SPITZ, 1988). Portanto, as SEF têm fundamental importância no sistema tecnológico da indústria química, visto que interferem profundamente na introdução e desenvolvimento de tecnologia, podendo ser fornecedora de um ou mais módulos.

2.3) O papel da escala de produção

2.3.1) Conceito de economia de escala

Além do aspecto sistêmico, outras dimensões têm interferências fundamentais na evolução da indústria da química e da energia. A economia de escala é uma delas e atua nos módulos dos sistemas tecnológicos. Será abordada em seus aspectos teóricos e na sua aplicação no setor químico, neste capítulo.

[5] As inovações podem ser de produto e de processo, em função de sua aplicação no desenvolvimento de novos produtos ou em processos, respectivamente.

Posteriormente, no Capítulo 4, será discutida sua contribuição na economia do metanol, mais especificamente.

Desde os anos 1960, a indústria vem se tornando cada vez mais competitiva. Seus mercados são regulados principalmente pelo preço, que é função da oferta, procura e custos de produção, e pela qualidade dos produtos.

Na classificação Kline de produtos químicos o metanol é considerado uma *commodity* (KLINE, 1976). Tem seus principais usos na especificação química, ou seja, não está em competição direta com outros produtos químicos nesses usos. Isso reduz enormemente o espaço para diferenciação (BARNEY, 1996). A competição é baseada em custo. Alguns usos potenciais do metanol, como os energéticos, têm como referência os preços dos combustíveis, o que reforça a dimensão custo na competitividade. Isso leva a duas tendências fortes na indústria: a utilização de fontes de baixo valor (custo de oportunidade baixo)[6], e o aumento de escala das plantas.

As empresas possuem determinados custos que variam com a quantidade produzida e outros que são fixos. O custo fixo é o gasto, independentemente do nível de produção, com aluguéis, equipamentos, manutenção, seguro, entre outros. E há os custos variáveis que são proporcionais à quantidade de produto obtida como matéria-prima e energia. Na medida em que os custos variáveis mudam com o aumento do nível de produção, eles são considerados como uma função da quantidade produzida. O custo de produção é a soma de todos os custos, variáveis e fixos. Quando a quantidade produzida cresce, a elevação do custo de produção corresponde somente ao aumento do custo variável necessário para produzir a maior quantidade do produto. Os custos fixos ficam praticamente constantes, portanto há uma diminuição do custo de produção de cada unidade produzida, uma vez que a quantidade aumentou (LOOTTY E SZAPIRO, 2002).

Quando se aumenta a capacidade de uma planta produtiva, poderá ocorrer diminuição do custo de produção de cada unidade produzida, ou seja, os retornos de escala são crescentes, portanto há economia de escala. Entretanto poderá haver também aumento no custo de produção, nesse caso os retornos de escala são decrescentes e estarão presentes as deseconomias de escala. Não havendo alteração no custo de produção, os retornos de escala são constantes, e não

[6] ver Capítulo 4

existem economias ou deseconomias de escala. Consideradas essas três alternativas, é possível construir o Gráfico 2.1, que tem um formato em U, onde de “A” a “q” têm-se as economias de escala e de “q” a “B” as deseconomias.

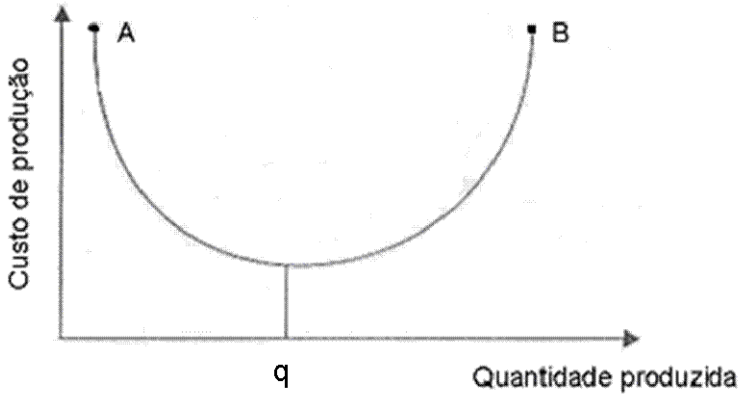


Gráfico 2.1: Curva custo de produção X quantidade produzida - Fonte: Adaptado de Lootty e Szapiro, 2002

Quando a quantidade produzida aumenta até chegar ao mínimo da curva, ponto q, o custo decresce e estão presentes as economias de escala. Após o ponto q, o aumento da quantidade produzida provoca aumento do custo de produção, e encontram-se as deseconomias de escala. No ponto q tem-se o volume de produção ótimo da planta, onde todas as economias de escala são aproveitadas e não há presença das deseconomias. A seguir, serão apresentadas as principais fontes das economias e deseconomias de escala.

2.3.2) Fontes de economias de escala

As economias de escala possuem duas fontes principais, as reais e as pecuniárias. Nas reais há uma redução na quantidade de fatores produtivos utilizados quando há um aumento da produção. Na redução do preço pago por insumos, como matérias-primas, diz-se que a economia de escala é pecuniária, pois o custo de produção diminui, mas não em função das mudanças reais no método de produção.

As principais fontes de economia de escala são (BARNEY, 1996):

- *Ganhos de especialização*: Com uma maior quantidade de produto, maior poderá ser a divisão do trabalho, e mais os trabalhadores e máquinas poderão se especializar. Os trabalhadores adquirirão, portanto, maior habilidade em suas

funções e, com máquinas especializadas, maior será a sua produtividade (SMITH, 1776).

- *Indivisibilidade técnica:* Nem sempre é possível comprar equipamentos com um tamanho exato para produzir a quantidade de produto exatamente necessária, possíveis subutilizações do equipamento podem servir para uma futura expansão produtiva. Desta forma, haveria então uma expansão produtiva a taxas constantes, ocasionando, portanto, custos decrescentes. Neste sentido, para cada tamanho de equipamento industrial é provável encontrar retornos crescentes decorrentes da maior utilização deste equipamento até o esgotamento da sua capacidade.

- *Economias geométricas*: Altos volumes de produção levam à construção de plantas grandes. Em muitas indústrias, como na química, o custo de construção de uma planta grande é menor que o custo de produção de uma planta pequena, por unidade produzida (SCHERER, 1990).

- *Economia relacionada à lei dos grandes números*: A aplicação da lei em uma planta industrial mostra que quanto maior for o tamanho da planta produtiva, maior será o número de máquinas utilizadas e menores serão o staff de manutenção e o número de peças de reposição necessárias (SHEPERED, 1996).

- *Economia das despesas de suporte*: O aumento do volume de produção faz com que o custo das funções de suporte, como as administrativas, contábeis e orçamentárias (custos de *overhead*), seja dividido por uma quantidade maior, diminuindo-o (BARNEY, 1996).

2.3.3) Fontes de deseconomias de escala

As principais fontes de deseconomias de escala são:

- *Limites físicos para o tamanho eficiente:* Há limites físicos inerentes a qualquer processo produtivo sendo imperceptível em pequenas plantas mas significativos nas grandes, que provocarão aumento de custos (PERROW, 1984).

- *Deseconomias gerenciais*: O aumento na capacidade produtiva provoca aumento da complexidade e, por conseguinte, limita a capacidade gerencial de controlar e operar. Essa ineficiência causa aumento nos custos.

- *Motivação dos funcionários*: Conforme foi descrito em 2.3.2, o aumento da capacidade produtiva aumenta a especialização dos funcionários. Teorias da psicologia empresarial sugerem que esta elevada especialização leva a um

distanciamento da compreensão do todo que está sendo produzido, e isto provoca desmotivação, o que diminui a produtividade e eleva os custos (HACKMAN e OLDHAM, 1980).

- *Distância dos clientes e fornecedores*: As grandes escalas exigem um grande custo para o transporte de insumos e produtos finais. Todas as fontes de suprimento não estarão próximas da unidade produtora, assim como, devido às enormes escalas, dificilmente haverá demanda local para absorver toda a produção. Portanto, o aumento da capacidade produtiva, acima da quantidade ideal q (Gráfico 2.1), vai aumentar o custo do transporte. As curvas de volume de produção sofrem ação das economias e deseconomias de escala e serão avaliadas a seguir.

2.3.4) As curvas de volume de produção por custo de produção para a indústria

A curva em U, mostrada anteriormente, é uma curva teórica, que não vem sendo verificada frequentemente na prática. Uma das alternativas apresentadas para corrigi-la é a curva em L. Argumenta-se que as deseconomias de escala geradas pelas ineficiências gerenciais poderiam ser evitadas com a implantação de modernos métodos de ação, e que, mesmo que persistissem, as deseconomias remanescentes seriam insignificantes perto das economias de escala presentes. Aceitando-se a forma da curva em L, é importante notar que existe uma faixa de escala mínima eficiente ao invés de um único tamanho ótimo, como na curva em U.

A existência das curvas em U e em L permitiu que surgisse uma terceira possibilidade que é uma mistura das duas anteriores, e é mostrada no Gráfico 2.2. Neste caso, existiriam economias e deseconomias de escala, respectivamente nas fases de A a q1 e B a q2 . No segmento de reta que une q1 a q2, as economias e deseconomias de escala praticamente se igualam, criando uma faixa de custos constantes por unidade produzida. Esta faixa de custos constantes confere flexibilidade, já que permite às empresas trabalharem com pequena oscilação da capacidade produtiva sem alterar o custo de produção.

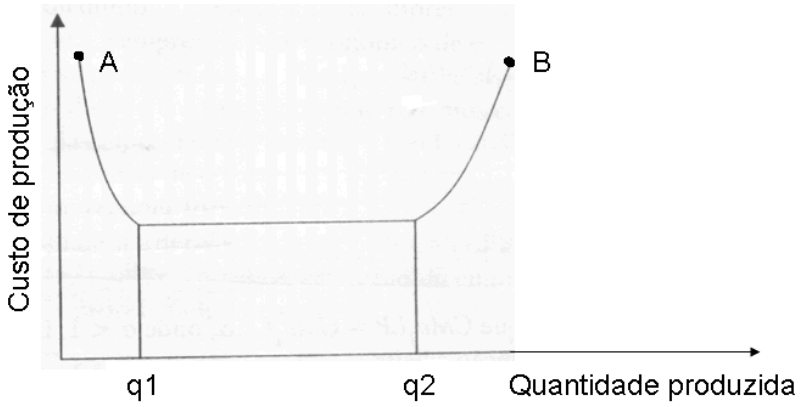


Gráfico 2.2: Curva mista U + L - Custo de produção X quantidade produzida - Fonte: Adaptado de Lootty e Szapiro, 2002

2.3.5) Influência da economia de escala na indústria química

Os EUA optaram por petróleo como matéria-prima principal para a obtenção de químicos orgânicos, o que possibilitou a construção e operação de megaunidades, com alta produção para atender à demanda crescente da II Guerra mundial e do grande crescimento do pós-guerra. A petroquímica foi instaurada e transformada, rapidamente, em rota dominante. A indústria do petróleo foi a primeira a trabalhar em grande escala com processos contínuos. O surgimento da petroquímica permitiu sua aproximação com a indústria química, que absorveu essa competência (SPITZ,1988). O crescimento da escala de produção propicia uma ruptura tecnológica importante, pois incorpora os conhecimentos da engenharia química ao *know-how* da indústria. Teve seu início na produção de eteno e amônia (BOMTEMPO, 1994).

A economia de escala possui como uma de suas principais fontes os fatores geométricos. A capacidade dos equipamentos, como tanques e torres, utilizados numa planta produtiva, varia com o volume, que é o cubo da dimensão linear. Por outro lado, a variação da superfície necessária para acomodar esse volume, a área de terreno requerida, é o quadrado da dimensão linear, consequentemente o custo de investimento é proporcional à $(\text{Capacidade})^{2/3}$, conhecida como lei dos 2/3. Existem investimentos num processo químico, que não se alteram com a escala, dentre eles os sistemas de controle, daí se usar na petroquímica moderna a relação (WITTCOFF *et alii*, 2002):

$$\left(\frac{E_{maior}}{E_{menor}}\right)^{0,6} = \frac{I_{maior}}{I_{menor}}$$

(E) = escala

(I) = investimentos

Portanto, se uma planta para 100 tons custa 1000, uma de 200 tons custará por volta de 1500, que é 25% menor que os 2000, que seriam gastos se fossem construídas duas plantas de 100 tons.

O tamanho e a complexidade da indústria química atual exigem grandes investimentos, tornando-a cada vez mais intensiva em capital. Ao mesmo tempo, o custo de mão-de-obra vem diminuindo, pois também não é proporcional ao aumento da escala. Uma unidade em *single train,* de mesma tecnologia, é operada praticamente pelo mesmo número de funcionários, independente da capacidade produtiva (WITTCOFF *et alii*, 2002).

A busca pelo menor custo de produção é uma estratégia permanente de qualquer setor. Na indústria química têm-se ações com esse objetivo, principalmente quanto à capacidade de produção das plantas e a busca pela matéria-prima de menor preço. È necessário observar que uma das fontes de economia de escala é a especialização, que provocará uma complexidade ainda maior no sistema e, por conseguinte, maior dificuldade de coordenação dos módulos, causando possíveis deseconomias.

2.3.6) A contribuição das pequenas escalas

Nelson e Winter, 1977, propuseram o termo “trajetória natural” para definir os passos ou as etapas que o desenvolvimento tecnológico provavelmente seguirá, relativamente independente das mudanças nas condições de mercado. Identificaram, também, uma clara tendência das indústrias química, do refino e petroquímica em inovar explorando as economias de escala. Portanto, existe uma trajetória natural nas indústrias de processos químicos que se apoia nos ganhos de escala.

Entretanto, um dos mais consistentes e surpreendentes fenômenos empíricos da economia é a persistência da distribuição assimétrica do tamanho das plantas,

que compreendem um pequeno grupo de grandes capacidades e um grande número de pequenas plantas. Pode-se facilmente prever que os custos de produção devam ser maiores nas pequenas unidades, entretanto essas firmas tendem a construir um grupo estratégico na indústria. Esse grupo estratégico é de difícil formação entre os grandes oligopólios devido às barreiras de mobilidade existentes. A questão não é somente o porquê da existência dessas pequenas, mas também de como elas conseguem existir. A teoria de nichos estratégicos e a complementaridade dinâmica mostram que as pequenas empresas, que manejam as pequenas escalas, vão procurar mercados específicos onde elas tenham competência, evitando assim competir com as grandes firmas.

A teoria dos nichos (PORTER e CAVE, 1979 *appud* Nooteboon, 1994) mostra que, ocupando estrategicamente um nicho de mercado, a pequena firma pode evitar competir diretamente com as grandes. A principal função econômica das pequenas unidades é atender a mercados específicos, os chamados nichos. Por exemplo, tem-se grande reserva de carvão na Mongólia, na China. Porém essa região é distante da costa e dos maiores mercados consumidores, e dificilmente poderá utilizar seu carvão como rota competitiva para o fornecimento mundial de seus derivados. Essa região, entretanto, possui necessidade de combustível, que pode ser suprida, por exemplo, com a produção e utilização de metanol para esse fim. Dificilmente uma megaplanta de metanol na Nigéria ou em Trinidad e Tobago terá condições de fornecer esse metanol requerido na Mongólia, pela dificuldade logística e pela quantidade não econômica necessitada. Daí, surge a oportunidade de uma pequena planta, na própria Mongólia, abastecer esse mercado regional, isso é o aproveitamento de um nicho específico. Observe que a megaplanta perde as vantagens da economia de escala devido ao alto custo do transporte exigido nessa operação (SHERER e ROSS, 1990).

A teoria da complementaridade dinâmica teve base no estudo de Nooteboon, 1994, onde comparou qualitativa e quantitativamente as forças e as fraquezas das grandes e pequenas firmas. Detectou, também, que as mais importantes características da pequena firma são diversidade, personalidade e independência. Ele observou, ainda, que as pequenas firmas ganhavam em flexibilidade e interação com os clientes, mas perdiam em economia de escala, escopo e aprendizado. As pequenas empresas têm a ponte para a customização (o pequeno volume dos nichos de mercado) e inovação (monopólio temporário dos baixos volumes).

Novamente a pequena firma procura os pequenos mercados, onde tem vantagens e não compete diretamente com as grandes.

Essas considerações mostram que as pequenas plantas possuem funções econômicas diferentes das grandes, e que, portanto, não concorrem com elas e têm o seu espaço na economia (AUDRETSCH *et alii*, 1999). Partindo-se do princípio que escalas grandes e pequenas podem coexistir numa mesma indústria, pode-se então concluir que será possível a existência de qualquer tamanho de planta produtiva, desde que ela consiga explorar as vantagens econômicas das pequenas e ou das grandes capacidades produtivas.

Um bom exemplo da exploração das vantagens de diferentes escalas ocorre na Nigéria, que possui grandes e pequenas jazidas de GN. No estado de Delta, na Nigéria, operam-se mais de 250 pequenos poços de petróleo, cuja instalação de gasodutos para o transporte do gás natural associado produzido é de custo proibitivo. Está sendo avaliado o aproveitamento dessas pequenas jazidas, através da implantação de pequenas plantas de metanol (MESSIRI, 2006). Olhando-se agora para a megaescala, constata-se que a planta de maior escala produtiva de metanol no mundo, de 10.000 toneladas por dia, está atualmente em construção na própria Nigéria (ICIS, 2008a). Observa-se então que, num mesmo país, há possibilidade de aproveitamento competitivo de jazidas de GN, tanto pequenas como grandes, na produção de metanol. O exemplo demonstra a característica do sistema baseado em metanol poder contar com plantas de qualquer capacidade produtiva[7].

2.4) Incertezas e flexibilidade

2.4.1) As incertezas presentes no ambiente atual

O ambiente econômico atual apresenta uma série de indefinições quanto ao seu futuro, que podem impactar na escolha da matéria-prima a ser utilizada, na escala de maior competitividade e nos usos de maior desenvolvimento. Existem indefinições também quanto à evolução de preços, e de qual será a intensidade do

[7] No Capítulo 4 as faixas de escala estarão detalhadas

endurecimento das legislações ambientais em toda cadeia produtiva. Essas indefinições são chamadas de incertezas, que serão pormenorizadas a seguir.

É impossível prever qual será a matéria-prima com o melhor preço em 2010, vide as oscilações que vêm ocorrendo com todas elas nos últimos dois anos. Ao mesmo tempo grande parte das jazidas das fontes fósseis encontra-se distante dos maiores mercados consumidores, e o custo do transporte tem aumentado vertiginosamente. Fazem parte também dessa equação o tamanho eficiente das plantas e perguntas como: onde construir as novas unidades? Com que matéria-prima? Com que capacidade produtiva, pequena para atender o mercado regional ou mega para o mundial? Há ainda diversas tecnologias disponíveis, que contarão com a concorrência das inovações radicais, e que gerarão mais dúvidas.

Pergunta-se também: Qual será o modelo dominante utilizado nos veículos automotores daqui a alguns anos: gasolina, diesel, GN, etanol, metanol, DME, misturas combustíveis, hidrogênio, energia elétrica, energia solar, alguma nova alternativa ou um *mix* de todas elas? Que distribuição terá essa matriz?

Os marcos regulatórios ambientais, com certeza, serão mais restritivos que os atuais. Mas, existem dúvidas: Qual será sua evolução? Quais as intensidades de suas ações sobre cada um dos módulos do sistema? Qual será o custo necessário para atendê-los?

O grande número de incertezas, com qualidades e quantidades distintas, permite concluir que seu grau atualmente é muito alto nas indústrias da química e da energia. Sua amenização poderá ser conseguida através da busca de sistemas dotados com grande flexibilidade (EPPINK, 1978).

2.4.2) Conceito de flexibilidade

A flexibilidade é reconhecida como um conceito complexo, multidimensional e polimorfo e, portanto, com inúmeras definições. Genericamente, a flexibilidade é a capacidade de um sistema em lidar com mudanças no ambiente (situações de risco ou incerteza) de maneira efetiva e eficiente.

Carlsson, 1989 (*appud* GOLDEN E POWELL, 2000), observou que a noção de flexibilidade foi inicialmente introduzida por George Stigler em 1939, cujo modelo baseava-se na curva de custos. Tendo a curva da média do custo total de uma empresa o formato de U, quanto mais chata for a base da curva, e mais lentamente

aumentar os custos marginais, maior a flexibilidade desta firma. Então a flexibilidade varia inversamente com a curvatura do custo total. Essas noções iniciais continuam válidas e foram utilizadas como pilares na construção do arcabouço teórico da flexibilidade. Outro conceito de flexibilidade foi introduzido por Burton Klein em 1984, que a dividiu em dois tipos: as requeridas para as incertezas conhecidas (definida como riscos) e para as incertezas desconhecidas (definida como incertezas). Carlsson ainda observou que a flutuação da demanda era apenas um aspecto que exigia flexibilidade nas empresas, e que a flexibilidade começava no nível de equipamentos, passava pelos sistemas de produção, e chegava aos níveis das empresas e das indústrias, portanto precisa ser estudada em todos eles.

Num ambiente de incerteza, a busca por flexibilidade é a manutenção de um portfólio de opções, que forneçam o máximo de repostas possíveis em face às variações do meio. Os sistemas tecnológicos estão em constante mutação. Essas mudanças envolvem elementos de conhecida certeza e outros elementos de incerteza. Os elementos conhecidos fazem o sistema operar em condição ótima. Porém, os elementos de incerteza tendem a desestabilizar esta situação e afetar o desempenho. Flexibilidade então seria definida como a capacidade necessária em fornecer respostas às mudanças no ambiente, de maneira a evitar as perdas de performance (SILVA, 2008).

Muitos autores têm estudado a flexibilidade nas duas últimas décadas, tendo como consequência diversas maneiras de abordá-la. William Golden e Philip Powell, em 2000, juntaram a maioria dessas noções e apresentaram uma síntese bastante abrangente de como olhar a flexibilidade, cujas linhas gerais são apresentadas a seguir.

A flexibilidade é abordada a partir de quatro dimensões: temporal, previsão da mudança, intenção e foco, conforme apresentadas na Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Dimensões da flexibilidade - Fonte: Adaptado de Golden e Powell, 2000

Dimensões da flexibilidade	**Escopo**
Temporal	curto, médio ou longo prazo
Previsão da mudança	circunstâncias previsíveis ou imprevisíveis
Intenção	ofensiva ou defensiva
Foco	interno ou externo

Essas quatro dimensões são assim definidas:

- Temporal: consiste no tempo de duração para a adaptação ao surgimento de uma nova mudança, que pode ser curto, médio e longo prazo. Flexibilidades operacionais são as exigidas quando da entrada no mercado de um novo equipamento ou tecnologia, ou da escassez temporária de uma determinada matéria-prima, e são de curto prazo. Flexibilidades táticas são as necessárias para o combate a mudanças no desenho do produto ou nas taxas de produção, e são de médio prazo. Flexibilidades estratégicas envolvem habilidades na opção e construção do caminho mais competitivo, e significam mudanças estruturais na arquitetura, gestão e no direcionamento do capital a ser investido, e são de longo prazo.

- Previsão da mudança: é o grau de opções que uma empresa ou sistema tecnológico possui para se adaptar a uma mudança conhecida ou desconhecida no ambiente. Uma arquitetura flexível deverá possuir a competência de se adaptar o mais rapidamente possível, de forma a garantir sua viabilidade econômica permanente. Um primeiro tipo de flexibilidade é obtido através do planejamento, para a busca antecipada de competências exigidas pelas mudanças previsíveis (riscos). Um segundo tipo está relacionado às incertezas e de como fazer um bom uso de novas oportunidades, para responder rapidamente às mudanças ambientais imprevisíveis.

- Intenção: é o comportamento previamente definido para o enfrentamento das mudanças no ambiente, com atitudes pró-ativas ou reativas.

- Foco: é a direção das ações para reagir a qualquer mudança, podendo ser interno (dentro das empresas) ou externo (no ambiente onde a empresa se encontra - indústria ou sistema tecnológico).

Verifica-se que algumas dimensões podem se aplicar exclusivamente às empresas, e que outras são relativas ao sistema tecnológico como um todo, do qual essas firmas são componentes. Para as empresas ou módulos tem-se a temporal de curto e médio prazo, a antecipação de mudanças previsíveis, a definição da intenção e o foco interno. Por outro lado as dimensões temporal de longo prazo, preparação para mudanças imprevisíveis e foco externo são plenamente aplicáveis aos sistemas tecnológicos e, portanto, foram as escolhidas para serem estudadas nesse trabalho, que envolve esse tipo de arquitetura. A seguir é apresentada outra abordagem das flexibilidades presentes em um sistema tecnológico.

2.4.3) Avaliação das flexibilidades inerentes ao sistema tecnológico

Observa-se que a flexibilidade possui diferentes significados em diferentes contextos, o que dificulta o desenvolvimento de metodologia precisa para quantificá-la. Os níveis de flexibilidade são raramente monitorados ou medidos, e, quando o são, seu julgamento tende a ser subjetivo e informal.

A avaliação da flexibilidade, para ser significativa, precisa ser medida dentro de um dado contexto. Para ajudar a avaliá-la são utilizados quatro parâmetros: eficiência, capacidade de resposta, versatilidade e robustez. Sendo assim definidos (GOLDEN e POWELL, 2000):

- eficiência: é a capacidade de um sistema acomodar as mudanças com a mínima perda de desempenho, como as alcançadas através da existência de diversas possibilidades de escalas produtivas, aplicações e matérias-primas.

- capacidade de resposta: é a habilidade do sistema de responder a mudanças num tempo apropriado, causando penalidades mínimas na transição. A diversificação nas aplicações e desenvolvimento de rotas tecnológicas competitivas partindo de diferentes matérias-primas é um bom exemplo.

- versatilidade: é a quantidade de alternativas planejadas para responder às mudanças previsíveis no ambiente.

- robustez: é a capacidade de responder com sucesso a mudanças imprevisíveis no ambiente, ou seja, é a manutenção da flexibilidade sob condições de incerteza. O sistema é robusto na medida em que ele consegue manter satisfatoriamente a performance, sob diferentes cenários futuros incertos.

Os parâmetros eficiência, capacidade de resposta, versatilidade e robustez estão relacionados a duas dimensões da flexibilidade. As duas primeiras referem-se à dimensão temporal, e as duas últimas à dimensão de previsão de mudança. Eficiência mede a rapidez em que o sistema encontra a solução para o desafio desejado e capacidade de resposta mede o tempo de adaptação à nova circunstância. Versatilidade é a competência em responder às mudanças previsíveis, que não se aplica ao nosso estudo, e robustez às imprevisíveis.

Das dimensões apontadas como inerentes aos sistemas tecnológicos, observa-se que para o caso estudado, onde o ambiente apresenta alto grau de incertezas, nem todas estarão presentes. Terão contribuições os parâmetros de

eficiência e capacidade de resposta para a temporal de longo prazo, e do parâmetro de robustez na preparação para mudanças imprevisíveis.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIAS

Esse capítulo tem dois objetivos principais. O primeiro é apresentar e discutir a metodologia utilizada na identificação do sistema tecnológico, que possui o metanol como *gateway* para as indústrias da química e da energia. O segundo objetivo é a escolha de um método de análise capaz de comparar as diferentes alternativas de matérias-primas e aplicações e, consequentemente, testar a viabilidade do sistema identificado. O capítulo é então dividido em duas partes, na primeira será abordada a metodologia de construção da hipótese de trabalho e na segunda, a escolha da melhor metodologia para avaliar seu potencial.

3.1) Metodologia utilizada na identificação do sistema tecnológico

Essa metodologia se desenvolveu a partir da premissa de que o metanol poderá se tornar um novo estruturante das indústrias da química e da energia, transformando-se num *gateway*. A pesquisa foi focada em cada um dos módulos que poderiam constituir esse sistema tecnológico. A aquisição dessas informações se deu através de consulta na internet, bancos de dados do portal da CAPES e sítios de busca, em leitura de livros e em entrevistas com especialistas, que serão pormenorizados posteriormente. A experiência acumulada do autor, no trabalho desenvolvido em empresas privadas do setor, também contribuiu para o norteamento. O caminho percorrido é apresentado na Figura 3.1.

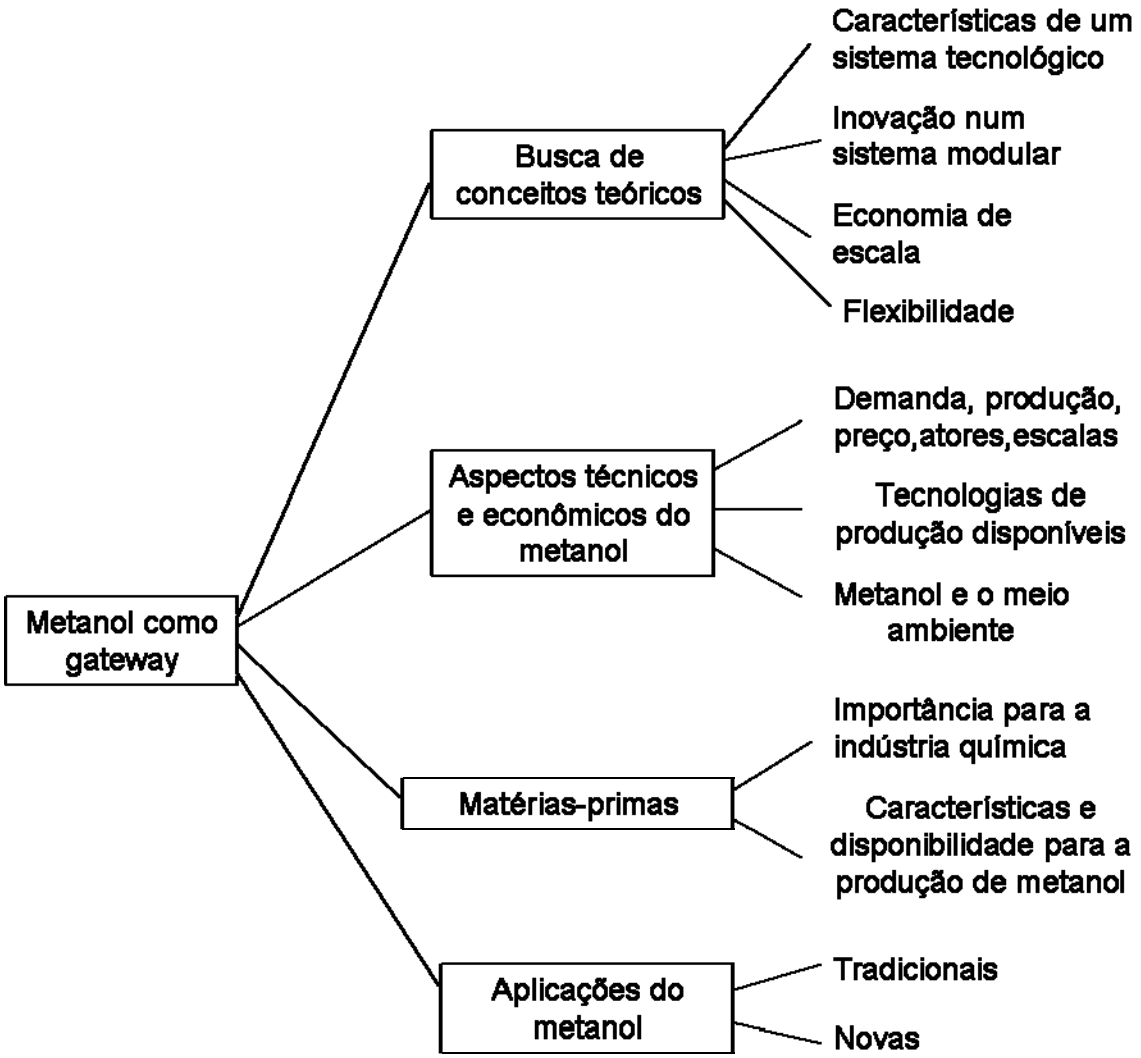


Figura 3.1: Fluxograma das etapas da metodologia empregada - Fonte: Elaboração própria

A pesquisa se iniciou com a busca de como se organizavam as indústrias da química e da energia em sítios de empresas e entidades. A conclusão que era num sistema tecnológico modular levou ao estudo de suas possibilidades de inovações, assim como à necessidade da divisão dos esforços em três grandes blocos básicos: metanol, suas matérias-primas e suas aplicações. Muitas informações valiosas foram pesquisadas em sítios de institutos de dedicação exclusiva ao metanol como o Methanol Institute e o MMSA (Methanol Market Services Asia). No estudo do metanol observou-se a grande importância das economias de escala, o que exigiu seu aprofundamento teórico.

Demanda, produção, preço, atores, escalas, assim como as tecnologias de produção disponíveis para o metanol, foram buscadas em sítios dos produtores e de

entidades diversas que contribuíram também para mostrar a interação do metanol com o meio ambiente.

Foram mapeadas as matérias-primas fósseis e renováveis, atualmente disponíveis, e comprovada a sua importância para a indústria química, através do estudo de sua história em diversos livros clássicos, como Spitz (1988). As características e disponibilidades daquelas que podem ser fontes para o metanol foram obtidas, principalmente, em sítios de empresas que militam na química e energia como a British Petroleum (BP).

As aplicações do metanol foram divididas em tradicionais e novas e, majoritariamente, encontradas nos sítios dos produtores e na pesquisa na Web of Science.

No ambiente atual observa-se a presença de inúmeras incertezas que podem ser amenizadas através das flexibilidades presentes em qualquer sistema tecnológico. Portanto, após a identificação dos módulos que poderiam participar do sistema abordado nessa hipótese de trabalho, foram estudados os conceitos de flexibilidade, assim como suas aplicações no sistema baseado em metanol.

Os módulos e interfaces resultantes dessa pesquisa foram sistematizados no fluxograma da Figura 1.1 e compõem um sistema tecnológico, que tem o metanol como ponto focal. A Figura 1.1, então, sintetiza a hipótese que esse trabalho apresenta para a reestruturação das indústrias da química e da energia no atual contexto de incerteza.

3.2) Metodologia utilizada na avaliação do sistema tecnológico

A pesquisa mostrou que tanto matérias-primas como aplicações apresentaram estágios distintos quanto ao seu desenvolvimento tecnológico e econômico, podendo variar de maduro a iniciante e de grande potencial de crescimento econômico a potencial decrescente. Entretanto, é necessário comparar esses potenciais como parte do teste de viabilidade do sistema tecnológico em estudo.

A avaliação de um projeto ou problema proposto de qualquer natureza requer uma análise de viabilidade, ou seja, a apresentação e discussão dos fatores que podem permitir e que podem inibir a sua utilização na resolução do problema.

Desde os anos 1970 muitos métodos de análise de problemas ou projetos têm sido desenvolvidos e reportados na literatura. Poh *et alii* (2001) e Henriksen e Traynor (1999) realizaram uma ampla revisão bibliográfica e listaram em seus trabalhos esse conjunto de metodologias, as quais se dividem em duas grandes categorias: as quantitativas e as qualitativas. As primeiras são baseadas em apurações numéricas e podem ser:

- análises econômicas – utilizam métodos que partem de variáveis previamente determinadas como: preço e investimento. Essas variáveis são trabalhadas e expressam o resultado em termos de valor monetário como: taxa interna de retorno (*internal rate of return* - IRR), valor presente líquido (*net present value* - NPV), retorno do investimento *(return on investment* - ROI), análises de custo-benefício e teoria da opção de preço.
- análises matemáticas – são compostas por métodos que partem de modelos de funcionamento, que não trabalham com valores previamente determinados, como na econômica, e sim em termos de probabilidade. Seus principais métodos são modelagem e programações matemáticas (programações lineares, não lineares e integrais).

As análises qualitativas se baseiam em avaliação descritiva e podem ser divididas em dois grupos, em função do tipo de método utilizado. A primeira metodologia se baseia na comparação de alternativas através da distribuição de pesos a dimensões previamente escolhidas. A segunda se dá através da construção de sistemas de decisão hierárquicos, que indiquem a melhor ordenação de etapas ou a opção mais indicada, para resolução do projeto ou problema apresentado. Tem como principais métodos: a teoria da utilidade do “multiatributo” (*multiattribute utility theory* - MAUT), árvores de decisão, análise de riscos e processo de hierarquia analítica (*analytic hierarchy process* - AHP).

O objetivo nesse momento é buscar uma metodologia que tenha confiabilidade para comparar uma lista de matérias-primas ou aplicações, com relação a algumas dimensões ou indicadores. Observa-se que, nesse caso, uma análise econômica ou matemática não capta as inúmeras inter-relações existentes entre os módulos, não permitindo avaliar o sistema tecnológico como um todo, pois essas inter-relações não podem ser expressas através de números. Entretanto, essas interações interfaciais são facilmente constatadas e discutidas através de uma análise qualitativa. Mesmo que se tenham dados confiáveis, é impossível captar e

comparar, através deles, as inter-relações existentes nas diferentes possibilidades de produção do metanol, via carvão e via CO2, pois envolvem variáveis de inovação tecnológica, por exemplo, que não podem ser facilmente quantificadas.

Lembra-se ainda que uma análise quantitativa, se executada num ambiente com grande incerteza, como o atual, não apresenta resultados estáveis e confiáveis, também, por muitas vezes, os dados requeridos nem sequer podem ser obtidos, pois são baseados em informações consideradas confidenciais pelas empresas. Existem ainda as novas tecnologias com grande potencial de desenvolvimento, como as aplicações de metanol em células combustível e DME, e o aproveitamento de fontes como hidrato de metano e CO2 como suas matérias-primas. Essas alternativas são recentes e estão em estágio inicial de desenvolvimento. Suas informações numéricas são muito insípidas e, em muitos casos, apenas estimadas com a tecnologia atualmente conhecida. A consequência disso é a baixa disponibilidade e confiabilidade de informação para as análises matemáticas e econômicas. Em vista disso, a metodologia qualitativa é a que dá melhor resposta para a análise da hipótese desse sistema tecnológico que tem o metanol como *gateway.*

Entre as análises quantitativas têm-se o critério de pontos e as análises de decisão, como visto anteriormente. O que se busca é a metodologia mais adequada para comparar, avaliar e discutir as características e diferenças entre as matérias-primas e as aplicações do metanol. Isso permitirá a avaliação do sistema tecnológico nele baseado. Essa necessidade tem melhor resposta através da metodologia de critério de pontos, e não por uma análise de decisão, que teria como objetivo escolher qual matéria-prima e aplicação que forneceriam ao sistema tecnológico a melhor viabilidade econômica. Portanto, será utilizada a metodologia de critério de pontos na análise da hipótese desse trabalho.

Segundo Henriksen e Traynor (1999), o critério de pontos apresenta as seguintes vantagens sobre os outros métodos:

- é suficientemente quantitativo para possuir certo grau de rigor, e não é tão complexo que desencoraje usuários potenciais;
- pode acomodar critérios qualitativos num processo seletivo que compara e ordena as alternativas;
- não requer dados econômicos

O critério de pontos pode então executar a comparação entre componentes de uma lista, exigida nesse trabalho, além de ser uma das metodologias mais utilizadas na avaliação de projetos (NEVES, 1981). O primeiro passo desse método consiste na escolha de fatores ou indicadores, a serem considerados na análise do conjunto de alternativas apresentadas, para as duas pontas do sistema baseado em metanol: as matérias-primas disponíveis para a sua produção e as aplicações tradicionais e emergentes que o utilizam. Tais fatores devem ser poucos, os principais, para evitar maior complexidade e dificuldade de comparação das alternativas. Obtida a lista de fatores, passa-se então à fase de atribuição de pesos relativos a cada um dos indicadores.

A atribuição de pesos, na maioria das vezes, consiste em avaliações subjetivas. Esse é o ponto de maior crítica a esse método, pois pode haver discordâncias quanto aos valores dados. Observa-se que a análise qualitativa é uma avaliação muito difícil, sendo consenso geral de que não há uma metodologia imparcial, passível de ser aplicada a todos os casos sem críticas. Uma alternativa para contornar essa dificuldade é através da utilização de metodologia tipo DELPHI, que inicialmente faz entrevistas individuais com especialistas, que seriam os responsáveis pela distribuição dos pontos. Posteriormente, far-se-iam rodadas sucessivas para a obtenção da convergência. Entretanto, há grande dificuldade em se encontrar especialistas no Brasil, devido ao tema possuir grande amplitude, e em função da inexpressiva participação do metanol nas indústrias da química e da energia brasileira.

Os pesos foram atribuídos com base na pesquisa realizada no decorrer do trabalho e através de entrevistas ou consultas realizadas com especialistas como[8]:

- D.Sc. George A. Olah e D.Sc. G. K. Surya Prakash– Professores da Universidade of Southern California e membros do Loker Hydrocarbon Research Institute, nos EUA. Possuem inúmeras pesquisas relacionadas ao metanol e são coautores do livro muito utilizado na idealização desse trabalho: *"Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy"*. Com o primeiro foram trocados emails e com o segundo foi realizada uma entrevista, após sua conferência sobre metanol realizada

[8] - Foram apresentados a M.Sc Fabio de Almeida Oroski, assessor de marketing da GPC Química S/A (ex-Prosint), maior fabricante de metanol no Brasil, os Capítulos 4, 5 e 6 que tratam de metanol, suas matérias-primas e aplicações, respectivamente, para sua apreciação. As sugestões e críticas foram discutidas e o resultado incorporado ao trabalho.

em setembro de 2008, no 48º Congresso Brasileiro de Química, patrocinado pela Associação Brasileira de Química ABQ, no Rio de Janeiro, Brasil. Com esses professores foram tratadas questões diversas sobre o potencial das novas tecnologias em utilizar o metanol. Envolveram perguntas sobre sua opinião acerca de: Quais as tecnologias de maior potencial? Qual seu estágio de desenvolvimento atual? Quais os desafios a serem vencidos? Qual a demanda de metanol requerida? Essas conversas foram realizadas ao final das pesquisas. Elas se mostraram de grande importância para refinar a discussão sobre as novas tecnologias, devido à rápida dinâmica de desenvolvimento dessas inovações e ao trabalho direcionado e permanente que Olah e Prakash desenvolvem sobre o assunto.

Nos Capítulos 5 e 6, essa metodologia, baseada em critério de pontos, será então empregada na análise das matérias-primas disponíveis para a produção de metanol e das aplicações tradicionais e emergentes, que têm esse álcool, respectivamente. Foram escolhidos fatores ou dimensões que permitissem indicar as incertezas para matérias primas e aplicações. Esses fatores são individualmente analisados, para os graus de desenvolvimento de cada uma das tecnologias, através da atribuição comparativa de pontos, sendo o mínimo “1” e o máximo “5. Observa-se que quanto maior o grau de desenvolvimento menor o grau de incerteza, portanto o grau de incerteza é inversamente proporcional ao grau de desenvolvimento.

A incerteza inerente a cada uma das fontes ou usos está contida no conjunto desses indicadores, que podem possuir contribuições distintas. Entretanto as informações disponíveis não permitem definir claramente os diferentes pesos relativos de cada contribuição. Considerou-se então que os indicadores têm a mesma participação na totalização da incerteza, que será obtida então através da soma dos fatores escolhidos para as matérias primas e aplicações.

Para matérias primas, no Capítulo 5, inicialmente são totalizados os graus atribuídos a cada um dos indicadores, obtendo-se os graus de desenvolvimento. Posteriormente, são calculados os inversos dos graus de desenvolvimento obtendo-se os graus de incerteza.

Para usos, no Capítulo 6, são previstos cenários otimistas e pessimistas para as demandas de metanol em 2012 e 2020. Efetua-se esse cálculo de acordo com:

a) Para as aplicações foram escolhidos três indicadores [9]. Cada um deles pode assumir um grau máximo de “5”. Seu somatório portanto é “15” e corresponde ao grau desenvolvimento máximo possível de ser obtido. Considera-se então que esse grau máximo possui a incerteza mínima de 10%.

b) O grau de desenvolvimento mínimo possível é “3”, o somatório dos graus mínimos, “1”, dos três indicadores escolhidos. Considera-se que tem a incerteza máxima, igual a 50%.

c) Calcula-se o grau de desenvolvimento para cada aplicação somando-se os valores atribuídos a cada um dos 3 indicadores. A respectiva incerteza é obtida através da interpolação desse valor nos limites definidos nos itens *a e b*.

d) Toma-se a demanda de cada aplicação para 2012 e acrescenta-se o percentual de incerteza. O somatório dessas novas demandas para cada aplicação será o cenário otimista de demanda de metanol para 2012. A mesma metodologia é aplicada para o cálculo do cenário otimista de demanda de metanol para 2020.

e) O cálculo do cenário pessimista de demanda de metanol para 2012 e 2020 é feito da mesma forma que o otimista, sendo que ao invés de se adicionar a incerteza de cada aplicação subtrai-se esse valor.

[9] A definição e o processo de escolha desses 3 indicadores serão discutidos no Capítulo 6

CAPÍTULO 4: ASPECTOS TÉCNICO-ECONÔMICOS DA INDÚSTRIA DO METANOL

Este capítulo tem por objetivo analisar a evolução da indústria do metanol, suas perspectivas atuais e futuras, discutir o papel das escalas produtivas na sua economia, avaliar a flexibilidade existente num sistema tecnológico nele baseado, como parte desse estudo que visa identificar seu potencial em se tornar um *gateway* das indústrias da química e da energia.

O foco do capítulo é o metanol, portanto, inicialmente serão mostradas as suas características gerais e sua interferência no meio ambiente. A seguir, apresenta-se o panorama econômico da sua indústria e mapeiam-se as plantas em operação e os novos projetos. A partir desses dados, analisa-se a evolução da escala e discute-se a importância que isso tem para o sistema, assim como se avalia a flexibilidade existente, como forma de amenizar as incertezas do ambiente atual.

4.1) Características gerais do metanol

4.1.1) Propriedades e periculosidade

O Metanol (CH_3OH) é um líquido claro, incolor, volátil, altamente polar com um odor característico, conhecido por “espírito da madeira”. Miscível em água, álcool e éteres. Apresenta reações típicas de álcoois alifáticos. Também chamado de Carbinol, Hidróxido de Metila, Monohidroximetano, Álcool Metílico e Wood alchool (METHANOL, 2008b).

A síntese do metanol teve início no final do século XIX, com seu isolamento de mistura obtida na pirólise da madeira. Os esforços em pesquisa e desenvolvimento, no início do século XX, buscaram a conversão de gás de síntese (CO+H2) em combustíveis líquidos e produtos químicos. Uma das principais tecnologias era a síntese de Fischer-Tropsch que, por catálise metal/álcali, coproduzia o metanol. Atualmente o metanol é industrializado principalmente a partir do gás natural, por um processo catalítico de alta atividade e seletividade.

É um álcool tóxico, podendo causar morte, e inflamável, sendo sua queima muito perigosa, devido à coloração azul clara de sua chama, que na presença da luz solar se torna de difícil visualização.

Inalado ou ingerido causa irritação às membranas das mucosas. Tem efeito tóxico no sistema nervoso, particularmente no nervo óptico. Os sintomas da exposição incluem dor de cabeça, náusea, vômito, dificuldade de respiração, cegueira, coma e até a morte. O contato com a pele pode deixá-la seca e quebradiça. Ocorrendo absorção, pode haver sintomas parecidos quando inalado. A exposição crônica prejudica a visão e causa aumento do fígado. Pessoas com desordens de pele, problemas nos olhos, ou com função prejudicada do rim e fígado podem ser mais suscetíveis aos seus efeitos. É eliminado do corpo humano através de conversão enzimática em formaldeido, e, posteriormente, a ácido fórmico, que é excretado pela urina ou metabolizado e exalado como CO2 (Methanex, 2008b). Apesar de a superexposição ser maléfica, o metanol é encontrado naturalmente no corpo humano, oriundo dos alimentos ingeridos como frutas frescas, vegetais em geral, produtos fermentados, ou vindo dos processos metabólicos. O aspartame, que é um adoçante utilizado em muitos produtos dietéticos, tem, como um dos componentes de sua digestão, o metanol. O FDA (Food and Drug Administration) indica que uma dose de 500mg diárias é saudável para uma dieta de um adulto (METHANOL, 2008c).

4.1.2) Marcos regulatórios e seus impactos na indústria do metanol

O metanol é um produto com alta taxa de evaporação, o que exige a existência de marcos regulatórios para monitorar suas emissões. Os produtos orgânicos que possuem essa característica são chamados de compostos orgânicos voláteis (VOCs – *Volatility Organic Compounds*), que nos EUA são definidos pela quantidade de material que evapora em uma hora, a 100ºC, em porcentagem peso por peso.

Portanto, legislações internacionais e nacionais regulam os produtos químicos, como o metanol, para o bem-estar do trabalhador e do ambiente, assim como definem normas para transporte e armazenagem.

A preocupação com a segurança e a saúde, e também com a preservação e defesa do meio ambiente, fez com que surgissem, em todo o mundo, instituições dedicadas a estudar e regular esses assuntos, como:

ACGIH - *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (EUA)

EPA - *Environmental Protection Agenc*y (EUA)

FIOH - *Finnish Institute of Occupational Healt*h (Finlândia)

HSE - *Health and Safety Executiv*e (Reino Unido)

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Espanha)

NFPA - *National Fire Protection Associatio*n (EUA)

NIWL - *National Institute for Working Lif*e (Suécia)

OSHA - *Occupational Safety and Health Administratio*n (EUA)

WHO - ,n (OMS - Organização Mundial de Saúde)

Estas entidades localizam-se principalmente nos países da América do Norte e Europa Ocidental, que é onde atualmente há maior rigor no monitoramento. Quanto à emissão, a EPA (EPA, 1998), nos EUA, por exemplo, age com regras estaduais, onde são determinados os limites máximos de emissão.

O metanol no Brasil está sujeito a diversos controles, tais como decretos, decretos-lei, portarias ministeriais, interministeriais, medidas provisórias e legislações complementares dos órgãos de controle ambiental estaduais, visto que é classificado como produto perigoso. Na esfera brasileira federal é regulado por:

- Portaria nº 1274/2003, do Ministério da Justiça (MJ) - Aumenta o controle pela Polícia Federal de 17 para 134 produtos, onde está incluso o metanol (MINISTÉRIO DA JUSTIÇA, 2007), que têm sido desviados de suas legítimas aplicações para serem usados ilicitamente, como precursores, solventes, reagentes diversos e adulterantes ou diluentes, na produção, fabricação e preparação de entorpecentes e substâncias psicotrópicas.

Esta ação provoca não só o controle sobre uma maior quantidade de produtos, como exige informações mais precisas das suas movimentações, aumentando a fiscalização sobre a totalidade dos atores, além de acréscimo nos custos administrativos. Estão sujeitas ao controle e fiscalização, as empresas que comprem o metanol, bem como suas respectivas soluções e as misturas que os contenham, independentemente da concentração.

- Portaria nº 3.214/78 - NR 15 – anexo 11, do Ministério do Trabalho e Emprego (MTB) - Limita os níveis máximos de exposição (os limites de tolerância, válidos para jornadas de trabalho de até 48 horas por semana) do trabalhador, que para o metanol é 156 ppm (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2007). Exige um monitoramento dos diversos ambientes de trabalho de cada empresa, o que leva à implementação de providências que diminuam a exposição dos seus vapores ao trabalhador, tais como, utilização de Equipamentos de Proteção

Individual – EPI pelos empregados, e ou instalação de equipamentos que melhorem a qualidade do ambiente, ou que passem a utilizar recuperação de vapores, nas respectivas fontes de emissão.

- O transporte terrestre de produtos perigosos é regulado por diversas portarias da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Exige que todo transporte de produtos perigosos seja acompanhado de declaração de carga, ficha de emergência, documento que comprove que o veículo atende às disposições gerais de segurança de trânsito, certificado de capacitação original do veículo e equipamentos, documento original que comprove o treinamento específico do condutor do veículo e licença especial do produto (para o Mercosul) (ANTT, 2007).

Existem muitas outras normas diretas e indiretas ligadas ao Ministério da Defesa (explosivos e produtos controlados), Ministério do Meio Ambiente (meio ambiente e disposição de resíduos), Ministério da Integração Social (defesa civil), Ministério da Agricultura (licenças para comercialização) e Ministério da Saúde (que, por exemplo, em 2004 publicou a Portaria nº 776, que permite um teor máximo de benzeno de 1% nos produtos finais, que foi reduzido até chegar a 0,1 % em volume, em 2007).

4.1.3) Cuidados no uso do metanol como combustível

O metanol pode ser usado como combustível, sendo que inspira maiores cuidados em seu manuseio. Por exemplo, sua dose letal por ingestão, sem tratamento médico, é de 20-90 ml, enquanto para a gasolina é 120-300 ml, o que demonstra sua maior periculosidade. Por isso, no seu uso como combustível, as unidades de abastecimento possuem sistemas que tornam quase que impossível seu contato com clientes e operadores. Fogo e explosão são perigos potenciais dos combustíveis, sendo que seu risco é inferior para metanol, já que possui um limite de explosividade[10]quase quatro vezes superior ao da gasolina, por exemplo. Entretanto essa inferioridade no limite de explosividade prejudica a partida a frio de veículos. Não é cancerígeno nem mutagênico, como os aromáticos presentes na gasolina. No meio ambiente é rapidamente degradado por fotodegradação e biodegradação no ar, solo e água. No seu uso em automóveis ou caminhões produz em sua

[10] Podem ser superior e inferior. São os limites de concentração do produto na mistura combustível, onde uma fagulha pode provocar explosão de máxima ou mínima intensidade (VERNERET, 1984)

combustão menor quantidade de CO, NOx, SO2 e particulados. Apesar de maior dose letal, numa comparação geral, o metanol é considerado menos tóxico e agressivo que gasolina e diesel (OLAH, 2006).

A discussão recente de mudanças climáticas globais inseriu o conceito de taxação de carbono, com o objetivo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. A taxa de carbono variaria de acordo com o teor de carbono contido no combustível (AGUIAR *et alii*, 2008). Vem sendo utilizada, desde 1991, no oeste da Europa, em países como: Suécia, Dinamarca, Holanda, Noruega e Finlândia (DURNING, 2008). É menor no metanol que nos hidrocarbonetos. Essa é uma vantagem para o uso do metanol como combustível, pois ele sofrerá menor taxação e consequentemente menor aumento de preço, em relação aos hidrocarbonetos convencionais, gasolina, diesel, GLP e GN.

4.2) Panorama econômico do metanol

4.2.1) Evolução mundial da demanda e produção

A demanda mundial de metanol foi de aproximadamente 40 milhões de toneladas em 2007. Prevê-se para os próximos anos a continuidade de seu crescimento histórico de 4,5% ao ano, como mostra o Gráfico 4.1 (CMAI *appud* METHANEX, 2008a). Esses números refletem o comportamento da demanda com relação às suas aplicações tradicionais em MTBE, formol, ácido acético, combustíveis, DME e outros. Essa previsão não inclui o seu provável crescimento nas tecnologias de MTO/MTP e células a combustível. Os usos em energéticos podem mudar completamente essa taxa de crescimento e, por consequência, a ordem de grandeza da demanda mundial de metanol. O sucesso nos novos usos provocará um aumento substancial no consumo, já que o volume de produto exigido nas aplicações energéticas é muito superior aos das químicas, e será dependente do grau de substituição destas tecnologias alternativas aos atuais combustíveis. Esse assunto será aprofundado no Capítulo 6, referente às aplicações do metanol.

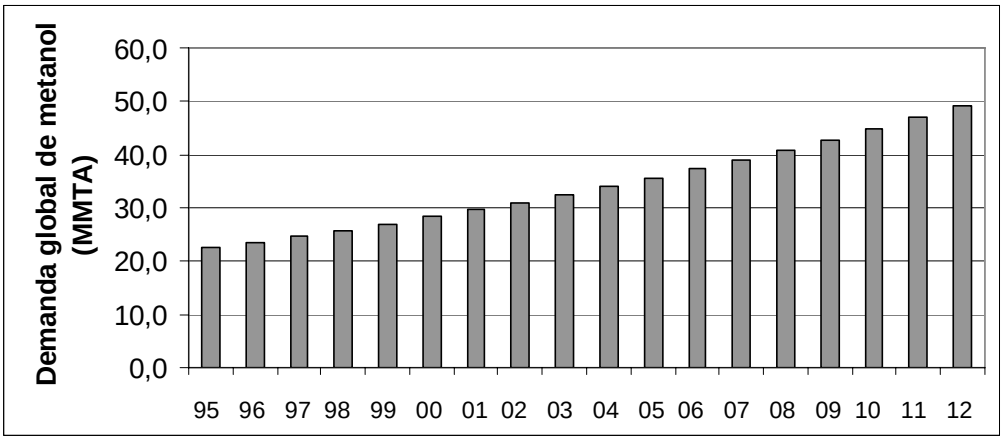


Gráfico 4.1: Evolução da demanda global de metanol (2007) - Fonte: CMAI, *apud* Methanex, 2008a

A demanda e produção mundial de metanol, por regiões geográficas, são apresentadas nos Gráficos 4.2 e 4.3. Observa-se que a Ásia é importadora, pois produziu 33% e consumiu 53% do total produzido no mundo em 2007. Já o Oriente Médio é exportador, com 6% de demanda e 20% da produção mundial de metanol. Portanto, as fontes produtoras estão distantes do mercado consumidor, o que implica um alto custo de logística na operação global. É um componente importante, que deve ser permanentemente otimizado, de forma a minimizar a sua participação no custo total.

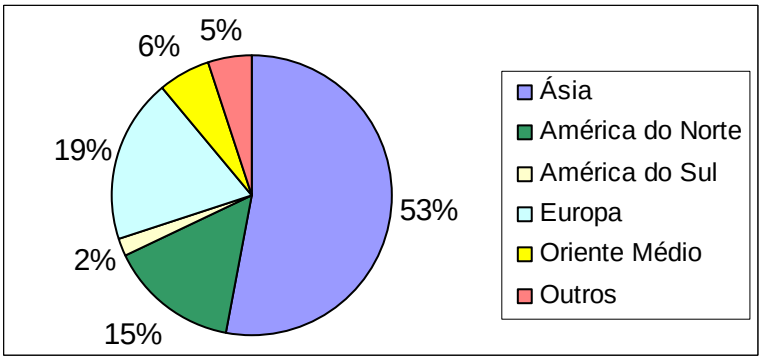


Gráfico 4.2: Demanda de metanol por região em 2006-- – Fonte: MMSA, 2007

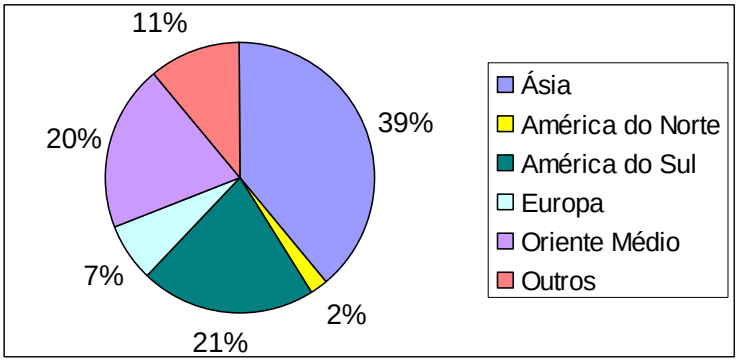


Gráfico 4.3: Oferta de metanol por região em 2006– Fonte: MMSA, 2007

O Gráfico 4.4 exibe os principais fabricantes de metanol, responsáveis por 50% das vendas internacionais, com as suas respectivas participações de mercado, baseado nas vendas de 2007. Constata-se que a Methanex é o principal fornecedor com aproximadamente 17% do mercado, seguida de longe pela MHTL (Methanol Holdings Trinidad Limited) e Sabic (Saudi Basic Industries Corporation), que tem 9,5% e 8% respectivamente. A participação amplamente majoritária da Methanex coloca-a como líder na competição da indústria do metanol. É ela, entre outras vantagens, quem irá influenciar, por exemplo, o ritmo da evolução da capacidade produtiva das plantas dessa indústria.

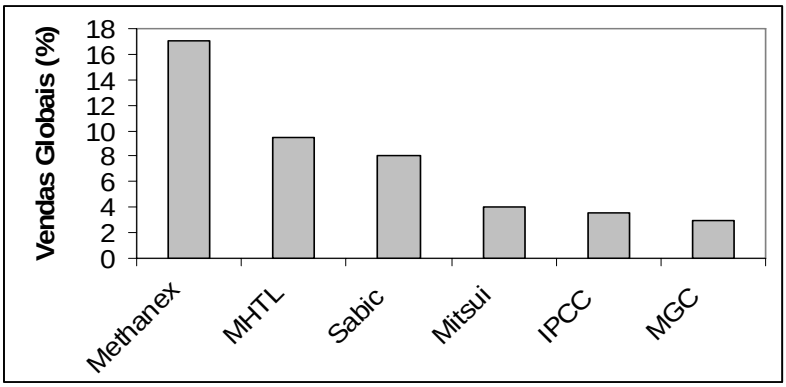


Gráfico 4.4: Principais fabricantes de metanol e suas participações no mercado mundial em 2007 - Fonte: Methanex, 2008a

4.2.2) Evolução dos preços internacionais do metanol

Muitos fatores impactam os preços do metanol, cujo negócio é de uma *commodity* global, e, portanto altamente influenciados pelas oscilações de suprimento e demanda. A demanda por metanol é altamente afetada pela sua

diversidade de aplicações, pelo nível de produção industrial, pelo valor da energia e pelas mudanças nas condições econômicas.

A série histórica dos preços do metanol é mostrada no Gráfico 4.5. Observa-se que há evolução dos preços em ciclos, conforme constatado por Lerner (2006), com 2 picos acentuados em 2007 e 2008.

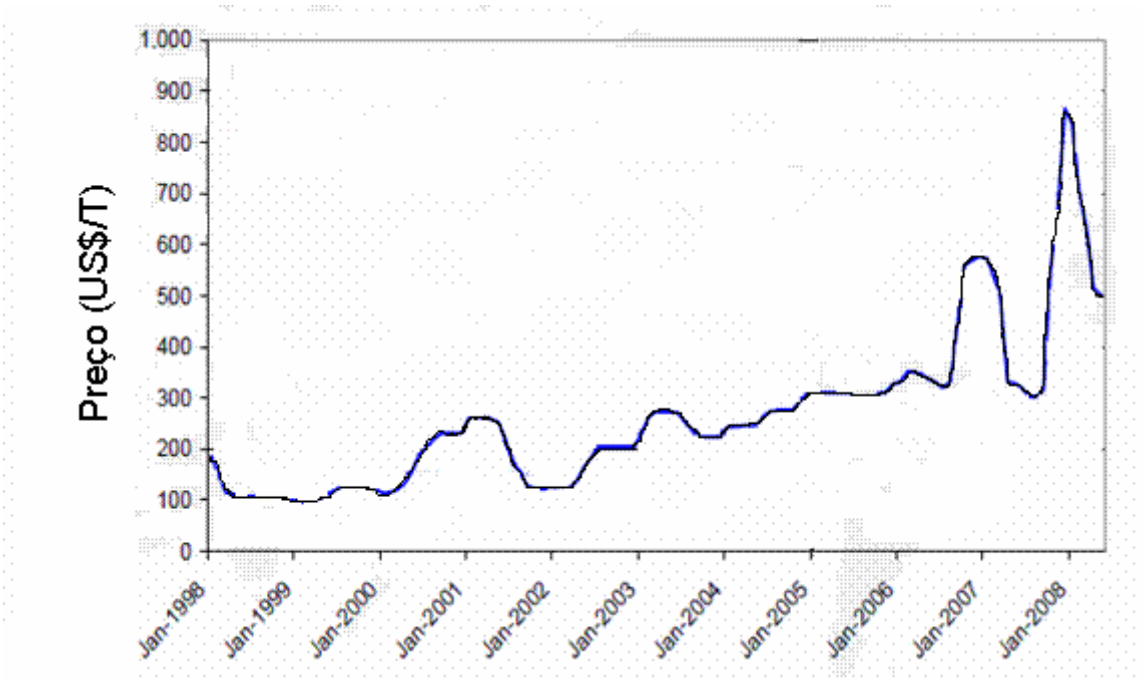


Gráfico 4.5: Evolução histórica do preço internacional do metanol - Fonte: Methanex, 2008a

A Methanex faturou mais em 2007, com um volume menor que em 2006, portanto o preço subiu devido principalmente a paradas de produção; planejadas e não planejadas (como a de suas plantas no Chile, desabastecidas de gás natural pela Argentina), no segundo semestre de 2006. O ano de 2007 começou ainda com aumento de demanda e de preços de energia, contribuindo mais para o aumento no preço do metanol (METHANEX, 2008a). O segundo pico, do início de 2008 tem como origem o aumento mundial das *commodities*. Baseado em dados de contratos celebrados pela Methanex na Ásia (Metanex, 2008b), construiu-se o Gráfico 4.6 para análise do comportamento atual. Observa-se a continuidade do aumento do metanol em 2007, mas que em 2008 diminuiu, repetindo comportamento histórico, em ciclos.

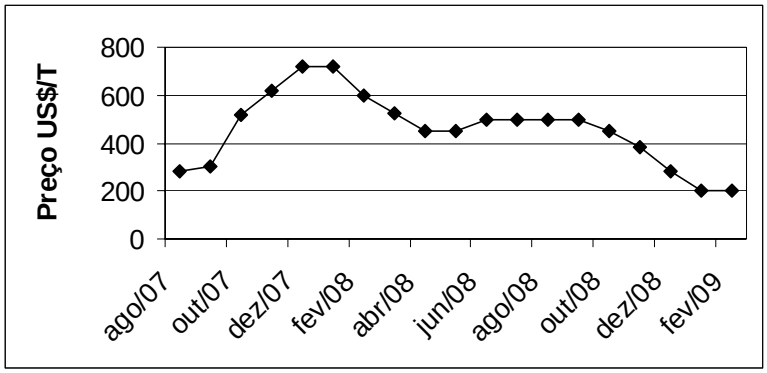


Gráfico 4.6: Evolução dos preços dos contratos praticados pela Methanex na Ásia - Fonte: Methanex, 2008b

A queda recente do preço do metanol acompanha o movimento da maioria das *commodities*, que são altamente afetadas pelas instabilidades econômicas. A partir de julho de 2008 desenvolveu-se mundialmente uma crise, que se iniciou no setor imobiliário nos EUA e se alastrou por toda a economia internacional, e ainda não se tem certeza do seu desfecho.

4.2.3) A indústria do metanol no Brasil

No Brasil, o consumo de metanol se distribui como no Quadro 4.1. A produção de intermediários químicos, principalmente formaldeído, representa cerca de 60% do mercado e é a utilização dominante. A produção de defensivos agrícolas deve crescer, com a tendência de cada vez se buscarem maiores safras. Observa-se que a produção brasileira de ácido acético não parte do metanol e sim do etanol, que tem oferta em melhores condições comerciais.

Quadro 4.1 – Participação das aplicações de metanol no mercado brasileiro - Fonte: ABIQUIM, 2008

Aplicações	**%**
Intermediário químico	57
Defensivos agrícolas	29
Tensoativos	9
Outras	5

Os dois principais produtores – Metanor e GPC Química (ex Prosint), embora sejam representativos dentro do mercado brasileiro, possuem escalas pequenas,

abaixo das faixas competitivas das empresas com foco no mercado internacional. Essas plantas são antigas, construídas nos anos 70, portanto já depreciadas.

4.3) A produção de metanol

4.3.1) A importância do gás de síntese

Atualmente a maioria dos processos de produção de metanol é baseada no gás de síntese, obtido do gás natural e do carvão como matéria-prima. Os principais processos utilizados na produção do gás de síntese via GN são a reforma autotérmica (ATR - *Autothermal Reforming*) ou uma combinação desta com a reforma a vapor ou pirólise do metano (SMR- *Steam Methane Reforming*) chamada de reforma combinada. Partindo-se do carvão, o gás de síntese é obtido através da gaseificação, cujas tecnologias serão pormenorizadas no Capítulo 5.

A composição do gás de síntese produzido em cada um dos processos é distinta, e caracterizada pelo número estequiométrico S (OLAH, 2006).

$$S = \frac{(\text{moles } H_2 - \text{moles } CO_2)}{(\text{moles } CO + \text{moles } CO_2)}$$

Para a produção de metanol, o valor ideal de S é 2. Portanto, se S é menor que 2 há falta de hidrogênio, e se é maior que 2 há excesso.

Pelos processos atualmente existentes o carvão produz S menor, e há necessidade de suprimento de hidrogênio. GLP e Naftas têm S aproximadamente 2, e para o GN, S é 2,8-3,0, podendo se aproximar de 2 com a adição de CO2.

4.3.2) Tecnologias para produção de metanol

Existem duas rotas para produção do metanol: uma em fase gasosa, que domina o mercado, e outra, em fase líquida, introduzida recentemente pela Air Products (OLAH, 2006). Ambos os processos utilizam catalisadores à base de cobre, que possuem alta seletividade (aproximadamente 99,5%).

A rota catalítica de produção do metanol, via gás de síntese, tem um equilíbrio exotérmico. Suas principais reações químicas são (ROSTRUP-NIELSEN e NIELSEN, 2004):

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \qquad \Delta H_r = -90.64\ kJ/mol$$

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \qquad \Delta H_r = -49.67\ kJ/mol$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad \Delta H_r = -41.47\ kJ/mol$$

Na rota em fase gasosa o gás de síntese entra então num reator, na presença de catalisador, para produzir metanol. O efluente do reator contém ainda 18% de água, metano, etanol, álcoois pesados, cetonas e éteres que são separados por processo de destilação, onde passam por uma primeira unidade para remover os leves, e uma segunda que retira água e álcoois pesados. O gás de síntese não reagido é recirculado para o reator, resultando numa eficiência de conversão de 99%. Um fluxograma simplificado é apresentado na Figura 4.1 (SPATH e DAYTON, 2003).

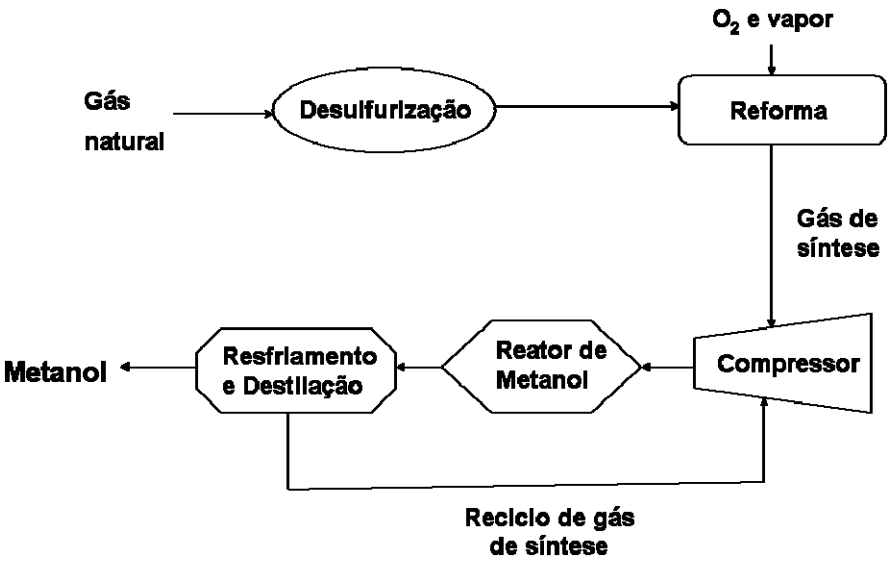


Figura 4.1: Fluxograma do processo de produção de metanol - Fonte: Spath e Dayton, 2003

O processo em fase líquida se dá num reator de lodo aquecido, formado por catalisador em pó em óleo mineral, por onde é borbulhado o gás de síntese (HEYDORN *et alii*, 1998).

4.3.3) Detentores das tecnologias atuais para produção de metanol

ICI atual Synetix e a Lurgi são os maiores detentores de tecnologias em fase gasosa utilizadas no mundo. O reator é em leito fixo, com tubos aquecidos cheios de catalisador (SYNETIX, 2008 e LURGI, 2008a). O Quadro 4.2 apresenta a participação das tecnologias na produção do metanol nas plantas com escala superior a 300 MTA (mil toneladas/ano), operando até 2006. Observa-se a liderança da Synetix, que possui maior quantidade de plantas em escalas grandes e pequenas, seguida de perto pela Lurgi, que predomina nas megaplantas (METHANOL, 2008d).

Quadro 4.2: Participação das diferentes tecnologias na produção de metanol em fase gasosa Fonte: Elaboração própria baseada em dados de Methanol, 2008d

Tecnologias	**%**
Synetix (ICI)	45
Lurgi	35
MGC	13
Outros	7

4.4) A importância da escala na economia do metanol

4.4.1) Avaliação das plantas atuais de metanol

Existem 191 plantas de metanol instaladas atualmente no mundo, com capacidade produtiva total de 60 MMTA. As 20 maiores são listadas no Quadro 4.3, e representam aproximadamente 37% da capacidade mundial instalada. As maiores plantas encontram-se localizadas principalmente em Trinidad e Tobago, Arábia Saudita, Irã, Malásia e Chile (ICIS, 2008a), o que torna estes países potenciais locais para a produção mundial de metanol, pois possuem disponibilidade de gás natural, matéria-prima utilizada em todas essas plantas (METHANOL, 2008a). O Chile merece comentário individual, pois as quatro unidades da Methanex dependem de 60% do gás natural oriundo da Argentina, que devido a sua crise energética, em 2007, cortou o suprimento para esse fim. O desabastecimento foi suprido praticamente pela concomitante entrada em operação das unidades em

Trinidad e Irã (Icis, 2008b). O Quadro 4.3 também mostra que das 20 maiores unidades, 13 entraram em operação nos últimos 10 anos, apontando a tendência do crescimento das escalas de produção do metanol.

Quadro 4.3: As 20 maiores plantas de metanol no mundo - Fonte: Adaptado de Icis, 2008a

Empresa	Localização	Capacidade MTA	Início de Operação
Methanol Holdings Trinidad Ltd - (MHTL)	Trinidad e Tobago	1900	2005
Saudi Methanol Co - (Ar-Razi)	Arábia Saudita	1800	2008
Atlas Methanol Co Unlimited	Trinidad e Tobago	1700	2004
Petronas Methanol Labuan Sdn Bhd - (PML)	Malásia	1700	2008
Zagros Petrochemical Co - (ZPC)	Irã	1650	2007
Fanavaran Petrochemical Co	Irã	1300	2004
Atlantic Methanol Production Co - (Ampco)	Guiné Equatorial	1150	2001
International Methanol Co - (IMC)	Arábia Saudita	1050	2004
Oman Methanol Co LLC	Oman	1050	2007
Siberian Methanol Chemical Co	Rússia	1000	1994
Methanex Chile Ltd (unidade III)	Chile	975	1999
National Methanol Co - (Ibn Sina)	Arábia Saudita	950	1984
Saudi Methanol Co - (Ar-Razi)	Arábia Saudita	950	1997
Methanex Chile Ltd (unidade II)	Chile	925	1996
Methanex New Zealand Ltd	Nova Zelândia	900	2008
Statoil Tjeldbergodden	Noruega	900	1997
Methanex Trinidad Unlimited	Trinidad e Tobago	860	2000
Saudi Methanol Co - (Ar-Razi)	Arábia Saudita	850	1999
Metanol de Oriente SA - (Metor)	Venezuela	840	1994

4.4.2) Classificação das plantas de metanol instaladas por capacidade de produção

Visando facilitar a avaliação e compreensão do papel da escala na economia do metanol, as unidades atualmente em operação foram classificadas de acordo com suas capacidades de produção em:

- Megaplantas – assim chamadas, no setor, por possuírem capacidades produtivas superiores a 1500 MTA;
- Plantas grandes – 1500 – 500 MTA
- Plantas pequenas – Abaixo de 500 MTA

As atuais 191 plantas foram divididas nessas faixas de capacidade de produção, e são apresentadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4: Classificação das unidades de metanol existentes no mundo em função das suas capacidades instaladas - Fonte: Elaboração própria a partir de dados Icis (2008a)

Capacidade por unidade (MTA)	**Nº de Unidades**	**% Unidades**	**Classificação**	**Capacidade da classe (MTA)**	**% Capacidade**
Acima de 1500	5	2,6	Megaplantas	8.750	14,5
1000 -1500 750 - 999 500-749 Total	5 14 21 40	20,9	Plantas grandes	29.650	49,1
250 - 499 abaixo 250 Total	24 122 146	76,4	Plantas pequenas	22.018	36,4

O Quadro 4.4 mostra a distribuição das plantas segundo a classificação proposta, mantendo as faixas de capacidades, para sua melhor visualização. As megaplantas, apenas 2,6% do número total de unidades, detêm 14,5% da capacidade de produção mundial de metanol. Entretanto 76,4% das plantas atualmente instaladas, na maioria pequenas plantas, são capazes de produzir somente 36,4% da capacidade global. As grandes escalas também possuem importância significativa, pois contam com 20,9% das unidades, e contribuem com a maior participação na produção mundial de metanol, 49,1%. Observa-se que a participação das megaunidades na produção de metanol é recente, com a primeira planta operando a partir de 2004. Essa característica aponta para uma possível tendência de aumento das escalas de produção. Contudo as pequenas e grandes permanecem em maioria, sendo responsáveis por aproximadamente 85% da produção global. A distribuição das classes das unidades de metanol em operação indica também a flexibilidade de sua produção competitiva nas mais diferentes escalas.

Essas avaliações preliminares não são suficientes para uma análise conclusiva da evolução das escalas. É necessário entender a dinâmica que se dará daqui para frente, e, para isso, é imprescindível estudar os novos projetos, assim como as unidades que já estão em construção.

4.4.3) Os novos projetos de produção de metanol e suas escalas

Encontram-se atualmente 135 novos projetos de construção de plantas de metanol (ICIS, 2008a). Para minimizar a incerteza, selecionou-se para análise apenas os que estão em fase de projeto de engenharia ou em construção, resultando numa amostra de 45 projetos. Esses projetos estão localizados prioritariamente na China, Irã, Malásia, Arábia Saudita e Egito. Posteriormente, foram classificados, usando-se o mesmo critério adotado na seção anterior, e agrupados no Quadro 4.5. Observa-se uma crescente evolução do papel escala, pois as megaplantas, com apenas seis unidades, vão contribuir com 36,6% de aumento da capacidade mundial de produção de metanol.

Quadro 4.5: Classificação dos novos projetos de metanol existentes no mundo em função das suas capacidades instaladas - Fonte: Elaboração própria a partir de dados Icis (2008a)

Classificação	**Nº de Unidades**	**% Unidades**	**Capacidades MMTA**	**% Capacidades**
Megaplantas	6	13,6	11.400	36,6
Plantas grandes	18	40,9	15.180	48,7
Plantas pequenas	20	45,5	4.585	14,7
Total	44		31.165	

A escala média mundial atual (capacidade de produção total/nº unidades) está na ordem de 316 MTA, enquanto nos novos projetos é de 708 MTA, mais que o dobro, outro dado que aponta a tendência de crescimento das escalas. Contudo, observa-se que em número de unidades, as grandes e pequenas plantas continuarão a ser majoritariamente construídas com 86,4%, que contribuirão com 63,4% do aumento mundial de capacidade produtiva de metanol.

Esse estudo confirma as tendências apontadas na seção 4.4.2, de que haverá uma maior participação das megaescalas na produção de metanol. Entretanto as

grandes e pequenas continuarão sendo altamente representativas. Isso reafirma a constatação da flexibilidade existente nas escalas produtivas para as plantas de metanol.

Visando cristalizar as características até aqui encontradas na avaliação da dinâmica da evolução das escalas de metanol, assim como sua diversidade, será feita uma análise estatística a seguir.

4.4.4) Análise estatística da evolução das escalas produtivas

A estatística básica estuda uma variável, a mediana, cuja característica é separar uma série em duas partes iguais, que apresentam o mesmo número de componentes. Tomando-se as 182 plantas em operação no mundo, organizando-as em uma série por capacidade crescente e dividindo-a em partes iguais, a capacidade produtiva do componente, que divide a série, é a mediana. No Quadro 4.6 são apresentadas as medianas das capacidades das plantas atuais e dos novos projetos mundiais, conforme previamente selecionados, assim como os respectivos quartis, que são as novas medianas, obtidas a partir dos dois intervalos construídos na primeira divisão.

Quadro 4.6: Estatísticas básicas das plantas em operação e projetos de construção de unidades de metanol no mundo - Fonte: Elaboração própria a partir de dados Icis (2008a).

	Plantas em operação (MTA)	**Projetos em construção (MTA)**
Mínimo	50	50
Quartil 1	60	250
Mediana	165	600
Quartil 3	455	1300
Máximo	1700	1800

Segundo o Quadro 4.6, a escala da metade das maiores plantas instaladas está compreendida entre 165 MTA e 1700 MTA e a dos projetos entre 600 MTA e 1800 MTA. Observa-se que há um aumento no limite inferior dos novos projetos, o que indica a direção da evolução para escalas maiores. Isso é confirmado vendo que na faixa da metade das instaladas, entre 165 MTA e 1700 MTA, estão

compreendidas as pequenas, grandes e megaplantas. O que já não ocorre com os novos projetos que, com unidades entre 600 MTA e 1800 MTA, não mais contemplam as pequenas.

A análise dos projetos para construção de novas plantas mostra ainda um fato que chama a atenção. A mediana, quartil 1 e quartil 3 apresentam capacidades muito superiores, o que mais uma vez indica a tendência de construção de plantas maiores do que as em operação.

4.4.5) O aumento da comoditização do metanol

Na Europa e nos EUA, a construção de novas unidades praticamente não ocorreu a partir dos anos 1980. Os investimentos em metanol passaram a ser feitos na América Central e do Sul, África e Oriente Médio, em megaplantas acima de 1500 MTA, pois nestas regiões há grande disponibilidade de gás natural a baixo custo. A China, por outro lado, tem como matéria-prima o carvão, e opta também por construir um grande número de plantas com capacidades médias de 400-600 MTA, objetivando o abastecimento regional.

A maior planta em construção encontra-se na China, e terá capacidade de produzir 3.000 MTA de metanol, a partir do carvão. Na pesquisa dos novos projetos aparecem estudos de unidades - que não foram incluídos nesse trabalho, pois ainda não estão em construção - com capacidades produtivas de 4.200 MTA, na China e Nigéria, partindo do carvão e do GN respectivamente (ICIS, 2008a). Observa-se que a escala é independente da matéria-prima, pois os estudos de mesmas escalas estão sendo feitos para GN e carvão.

Até bem pouco tempo, e hoje ainda na China, as plantas de metanol tinham o objetivo de atender às demandas regionais. O conjunto das informações anteriores nos permite verificar a intensificação do comércio internacional do metanol devido principalmente a dois fatores. O primeiro deles é o aumento das escalas de produção, com a construção de megaplantas já em operação e de projetos em execução. O segundo é a atuação de empresas, como a Methanex, a maior produtora mundial de metanol, cujo foco prioritário é a comercialização desse álcool e não a produção de seus derivados. Essa intensificação mostra a tendência de um aumento no grau de comoditização do metanol.

A comoditização se apresenta em diversos níveis ou graus. O metanol e o petróleo se encontram em níveis distintos, onde o petróleo é mais comoditizado que o metanol. Observa-se que o petróleo possui preço internacional único, o que permite, por exemplo, ser negociado em mercado futuro. Já o metanol possui um preço internacional de referência, interferido pelas intempéries socioeconômicas regionais diversas, e pelas políticas de preço das empresas produtoras para os países ou regiões onde possuem plantas produtivas. Isso provoca a prática de diferentes preços. Portanto, o metanol não é uma *commodity* global com o mesmo grau de desenvolvimento do petróleo. Entretanto, possui grande potencial de aumento de sua comoditização. Essa característica é uma condição importante para que um produto possa ocupar a posição de *gateway* num sistema tecnológico.

4.4.6) A importância da pequena escala na indústria do metanol

Essa tendência de evolução nas escalas produtivas se deve principalmente à nova demanda de aplicações em energia e provocará a divisão da economia do metanol em duas atividades distintas. A primeira é a do produtor global, fornecedor do mercado de energia, que buscará a evolução da escala permanentemente. A segunda será praticada por produtores globais e regionais de produtos químicos e produtores regionais de energéticos, que aproveitarão qualquer quantidade disponível de fonte carbonácea, onde quer que ela esteja. Nesse caso, os produtos obtidos deverão ser consumidos, preferencialmente, próximos ao local de produção.

Atualmente já se pode escolher o tamanho da planta. Pequenas e grandes para suprimento da demanda regional, como é o caso da China, ou megaplantas, para o suprimento da demanda mundial, como em Trinidad e Tobago e Irã. Note-se que nos Quadros 4.4 e 4.5 as escalas pequenas e grandes permanecem sendo maioria em número de unidades, o que permite afirmar ser possível ajustar o tamanho da jazida à escala, propiciando um aumento na flexibilidade do sistema ancorado em metanol.

Uma das grandes preocupações mundiais relativas ao meio ambiente é a enorme quantidade de GN que é desperdiçada através de ventilação ou queima, assim como a imensa quantidade de CO2 que é emitida pelo mundo atualmente, e que vem contribuindo para o aquecimento global. Esses dois problemas são fontes potenciais para a produção de metanol em menores escalas.

A Nigéria possui grande reserva de GN distribuída em pequenos e grandes poços. Para os grandes poços se está construindo a que será maior megaplanta de metanol do mundo. Para os pequenos poços existem estudos de viabilidade de construção de pequenas plantas. Tais estudos apresentam as seguintes vantagens para o estado do Delta (MISSIRI, 2005):

- O tempo médio de construção da pequena escala é de 2 anos enquanto a da grande é de 8 anos. O conjunto das pequenas plantas proporcionará mais empregos que uma megaplanta. As necessidades da população da região não permitem esperar pelos 4 anos de construção de megaplanta.
- As pequenas escalas possuem uma menor sofisticação e especialização de mão-de-obra e, portanto, são mais apropriadas para países em desenvolvimento;
- Há um problema a ser resolvido para os mais de 250 pequenos campos de petróleo que produzem gás natural associado. A construção de gasoduto que interligue esses poços tem custo proibitivo. Também não é vantajoso desperdiçar recursos com ventilação ou queima, que, além disso, não é ambientalmente recomendável. Esses pequenos campos, com produção de apenas 4 MMSCFD (Million Standard Cubic Feet per Day), podem suportar uma planta de 35 MTA de metanol, que é capaz de suprir a energia necessária para que 125.000 pessoas cozinhem;
- As pequenas plantas de metanol, com financiamento favorável e GN a baixo custo, podem ser competitivas com as megaplantas no mercado local de combustíveis.

Existem diversas outras ações para a construção de pequenas plantas. A Assam Petrochemical planeja a construção de uma miniplanta de 165 MTA de metanol no nordeste da Índia (HARIHARAN, 2008). Na Rússia a Metaprocess constrói e comercializa plantas modulares de 25 MTA cada uma, cuja capacidade máxima pode chegar a cinco módulos, ou seja, 125 MTA. As tecnologias envolvidas são conhecidas, e há uma adaptação delas para as pequenas escalas. O processo consiste em reforma a vapor para a produção de gás de síntese, compressão do gás de síntese, síntese do metanol e destilação do metanol (METAPROCESS, 2008).

É importante ressaltar que é muito difícil avaliar as unidades produtivas na China, por ter o maior número de unidades pequenas e grandes, devido à dificuldade de obtenção de informações precisas sobre essas plantas e também pela utilização da prática de adaptação ou cópia das tecnologias existentes nas plantas industriais ali construídas.

4.5) A produção competitiva de metanol em diferentes escalas

4.5.1) Características e diferenças entre os sistemas com diferentes tamanhos de escala

Através das análises anteriores é possível notar que o metanol possui a vantagem de poder ser produzido em pequenas, grandes e megaplantas, competitivamente. Entretanto a estrutura e características desses sistemas se diferem em função do seu tamanho. Os de pequena e megaunidades possuem estrutura e características próprias, e os de grande têm contribuição de ambas, sendo que o peso de cada uma varia com a capacidade produtiva. Ou seja, quanto maior a escala da planta grande, cujas capacidades estão entre 1499 MTA e 500 MTA, mais ela se aproximará da mega e mais contribuição terá de suas características. A seguir serão analisadas as principais características da pequena e megaescalas, uma vez que as grandes têm contribuição das duas.

As principais características e diferenças para os sistemas de pequena e megaescalas são sintetizadas no Quadro 4.7.

Quadro 4.7: Principais diferenças entre os sistemas de produção de metanol em mega e pequena escala - Fonte: Elaboração própria

Característica	**Pequena escala**	**Megaescala**
Complexidade	baixa	alta
Agilidade	alta	baixa
Produção interruptível	possível	impossível
Adaptação às mudanças de mercado	fácil	difícil
Utilização de fontes de custo de oportunidade negativo	possível	possível
Atendimento de nichos de mercado	fácil	difícil

As unidades de pequena escala têm estrutura menos complexa e, por conseguinte, mais ágil. O sistema tecnológico é composto por menor número de atores, apresentando menor número de módulos e interfaces, e, consequentemente, menor burocracia, o que facilita a tomada de decisões. Uma pequena empresa é mais rápida de se mover, para responder a qualquer mudança imprevisível, do que

uma firma gigante, que além do tamanho tem a resistência natural dos empregados. Por exemplo, uma empresa pequena caracteriza-se por possuir estrutura própria para comercialização de todo o produto produzido. Já uma organização mega geralmente elege distribuidores, firmas que atuam na venda de pequenas quantidades, cujo volume pode representar uma grande parcela do total comercializado.

A unidade com pequena escala pode ser interruptível, pois o custo de manutenção da planta parada e o custo de *start up* são muito menores que os das megaplantas, que exigem produção contínua pelo maior número de dias possível.

A pequena escala permite usar fontes de custo de oportunidade negativo como o lixo urbano, cujo objetivo é dar um destino aos resíduos produzidos pelo homem. Observa-se que o custo da matéria-prima é negativo, uma vez que a entidade responsável pela limpeza urbana deverá pagar pela retirada de lixo do seu depósito. Outro bom exemplo é o caso de haver instituição de multa ou taxação de carbono para a queima ou ventilação de GN. Essa operação ainda é feita em larga escala na produção de petróleo, em poços *offshore*, onde há gás associado de baixa rentabilidade. Observa-se que o GN está presente junto com o petróleo, que é o que se quer produzir, e tem que ser dele separado. Portanto, o custo de sua extração e separação é praticamente nulo, pois já está embutido no custo de produção do petróleo (SZKLO e ULLER, 2008). Vale lembrar que a multa ou taxa é compulsória. Pode-se então prever que o custo negativo terá a ordem de grandeza do valor da multa ou taxa. Observa-se que, caso exista grande disponibilidade de recursos com custo de oportunidade negativo, uma megaplanta poderá ser construída.

O atendimento de nichos de mercado é uma vocação de empresas ágeis, de pequeno porte, com provavelmente uma pequena planta, normalmente localizada nas proximidades dos clientes. Uma megaplanta é quase sempre de propriedade de empresas que operam no mercado mundial que dificilmente fornecerão a um cliente distante e com pequeno potencial de compra.

4.5.2) O desafio de integrar escalas diferentes em uma mesma indústria

As unidades pequenas e mega têm suas atividades definidas, conforme analisado em 4.6.1. Entretanto, cada uma das grandes tem uma atividade própria

composta por características das duas anteriores, dependente da capacidade produtiva.

Cada uma dessas diferentes atividades formará sistemas tecnológicos distintos, para o atendimento de suas necessidades. Esses diversos sistemas possuirão módulos e interfaces, comuns e exclusivos. A existência de vários sistemas, e de interfaces e módulos exclusivos de cada um deles, aumenta o número de componentes e suas relações, na indústria do metanol. Isso representa uma desvantagem do sistema baseado em metanol, pois haverá aumento na complexidade de toda a estrutura, com consequente aumento do custo de administração.

A operação de plantas com diferentes capacidades produtivas não é corrente na indústria química, que em muitos casos prefere trabalhar com escalas ótimas únicas, para o atendimento da demanda. Portanto, haverá necessidade de adaptações e busca de sinergia entre as diferentes estruturas.

Essa pluralidade é um esquema organizacional, onde as megaplantas aproveitam as vantagens da economia de escala, e as pequenas as vantagens decorrentes principalmente da menor complexidade estrutural. Enquanto as grandes possuem contribuição das duas.

4.6) Análise da flexibilidade presente na produção de metanol

Uma das incertezas que está presente em muitos investimentos é a determinação da capacidade produtiva da unidade a ser construída. Através das análises desse capítulo vê-se que é possível amenizar essa incerteza, através da flexibilidade existente na produção de metanol, que pode ser obtida competitivamente em qualquer escala.

A análise dessa flexibilidade será feita a partir dos seus parâmetros inerentes a esse trabalho: eficiência, capacidade de resposta e robustez, que foram discutidos no Capítulo 2. Relacionando-os com as escalas produtivas do metanol, observa-se que eles dotam o sistema de um grau expressivo de flexibilidade, pois apresentam:

- eficiência - diferentes matérias-primas, como carvão e GN, podem gerar metanol em qualquer escala. As menores demandas, como ácido acético ou formol, podem ser atendidas com pequenas unidades. Já as grandes demandas energéticas serão supridas pelas megaplantas. Portanto, o metanol tem aplicações

de grandes e pequenos consumos, cuja escala produtiva poderá ser facilmente ajustada, independente da matéria- prima disponível;

- capacidade de resposta – O metanol é uma *commodity*, portanto qualquer retração de sua demanda, em determinada região ou em função de aplicação específica, provocará excedente, que poderá ser rapidamente alocado em outra região ou uso, que esteja com aumento de consumo.

- robustez – Considerando que se tenha optado por construir megaplanta direcionada para aplicação específica, que é o caso da unidade de 3.400 MTA, que está sendo atualmente construída na Nigéria, para a produção de olefinas. Em havendo qualquer descontinuidade de matéria-prima ou da aplicação, o metanol necessário ou excedente poderá ser comercializado no mercado mundial. Caso a opção seja por planta pequena para abastecimento regional, em uso específico, havendo descontinuidade da matéria-prima ou demanda, ela poderá ser suprida pelo comércio mundial de metanol. Portanto, as incertezas quanto a que escala escolher são facilmente minimizadas, pois, se for superestimada ou subestimada, a diferença será comercializada no mercado global.

Esse conjunto de análises mostra que a viabilidade da operação de planta de metanol com qualquer escala produtiva, independente da matéria- prima disponível, confere ao sistema baseado em metanol uma grande flexibilidade, que proporciona maior segurança no investimento.

4.7) Resumo e conclusões do capítulo

O metanol é um produto que vem aumentando o seu grau de importância nas indústrias da química e da energia atualmente. A demanda mundial de metanol foi de aproximadamente 40 milhões de toneladas em 2007, mantendo o crescimento histórico de 4,5% ao ano de1995-2007, cuja manutenção é prevista até 2012. Os usos em energéticos podem mudar completamente esta taxa de crescimento, dependendo do grau de substituição dos atuais combustíveis e da introdução de novas tecnologias neste setor. Seu sucesso provocará um aumento substancial na demanda, podendo inclusive mudar sua ordem de grandeza, pois o volume de produto exigido nas aplicações energéticas é muito superior aos das químicas.

Essa direção é sinalizada através da evolução das escalas produtivas de metanol, que tendem a megaescalas. A análise das plantas atualmente em

operação, das em estágio de engenharia básica ou construção em curso e confirmadas através de avaliação estatística, mostrou a tendência do aumento das escalas de produção de metanol.

O recente aumento das escalas introduziu novos atores nessa indústria, cujo objetivo é prioritariamente o seu comércio. Isso intensificou a operação comercial e provocou o aumento do grau de comoditização do metanol e, também, da sua participação no mercado global.

Essa comoditização exige uma maior padronização dos módulos e das interfaces do sistema tecnológico baseado em metanol. Essa padronização proporcionará maior agilidade e, consequentemente, maior eficiência para o sistema como um todo.

Na avaliação das plantas atualmente em operação e das novas unidades em estágio de engenharia básica ou construção em curso observa-se também que, apesar da tendência de incremento das escalas, as plantas pequenas e grandes continuarão com uma boa participação na indústria do metanol. Conclui-se, então, que há competitividade em qualquer escala nessa indústria. As pequenas vão aproveitar os nichos de mercado e as mega as economias de escala, enquanto as grandes se utilizarão das vantagens das duas.

A operação de plantas com tamanhos diversos faz com que haja um aumento na complexidade do sistema de produção de metanol. Observa-se que cada estrutura poderá exigir componentes exclusivos, que aumentarão o número de componentes totais do sistema e, consequentemente, sua complexidade. O custo de administração dos sistemas tecnológicos é proporcional à complexidade, portanto esse aumento é uma desvantagem.

O metanol pode ser obtido em pequenas, grandes ou megaplantas, ou seja, em qualquer escala. A escolha do tamanho da escala mais eficiente é uma das incertezas apresentadas para o investidor. Essa pluralidade de diferentes escalas competitivas demonstra a flexibilidade encontrada no sistema tecnológico baseado em metanol, e ajuda a miniminizar a incerteza quanto a que capacidade produtiva se deva construir nos novos projetos.

CAPÍTULO 5: FONTES PARA PRODUÇÃO DE METANOL

Os objetivos deste capítulo são apresentar as matérias-primas possíveis para produção de metanol, mostrar sua diversidade e disponibilidade por longo período e discutir a perspectiva de utilização de cada uma delas, comparando-as e analisando-as do ponto de vista da flexibilidade do sistema de produção de metanol.

O capítulo, inicialmente, define matéria-prima e analisa sua importância para a indústria química através de mudanças ocorridas no setor que aproveitaram sua disponibilidade. Posteriormente, são analisadas e comparadas as fontes fósseis e renováveis disponíveis para a produção de metanol. Por último, é discutida a flexibilidade existente.

Do ponto de vista técnico, matérias-primas, para a indústria química, são quaisquer substâncias sólidas, líquidas ou gasosas que, sob a ação de processos físicos e ou químicos, se transformam em produtos finais ou intermediários. Esses servirão como matérias-primas para uma nova transformação. Por exemplo: o petróleo é matéria-prima para a produção de nafta, que é matéria-prima para a produção de eteno, portanto, nesta cadeia a nafta é um intermediário. Para este trabalho define-se como matéria-prima apenas a fonte carbonácea da cadeia, como o petróleo no exemplo citado. Todas as outras substâncias, geradas nas transformações subsequentes até a obtenção ao produto final, são intermediárias.

5.1) A importância da matéria-prima na indústria da química orgânica

A disponibilidade de insumos, em grande quantidade e a baixo custo, proporcionou sempre um desafio e um grande esforço de utilizá-los como matérias-primas ou intermediários para a indústria química. Estes movimentos provocaram o surgimento de novos produtos, novas rotas tecnológicas, novos processos, novos equipamentos, nova logística, novos atores, nova geografia, que passaram a estar disponíveis e serem utilizados pelo conjunto desta indústria.

A seguir serão exemplificadas três mudanças de insumos[11], que ilustram a importância de seu papel em quebras de paradigmas e no surgimento de novas tecnologias para o setor.

---

[11] Mais detalhes em Stokes, 2006 e Spitz, 1988

- *A química do acetileno* - O acetileno era o principal combustível até fins do século XIX. Uma de suas aplicações mais importantes foi na queima em lampiões, usada como fonte luminosa principalmente na iluminação pública. Logo foi notado também o seu grande potencial como precursor químico devido a sua alta reatividade, característica de um alcino leve, muito maior que a do eteno, que é um alceno. Tinha, portanto, enorme possibilidade de se converter em inúmeros outros derivados. O surgimento da energia elétrica e sua rápida propagação deslocaram o uso do acetileno como iluminante, possibilitando a sua utilização pela indústria química, pois proporcionou sua alta disponibilidade a baixo custo.

- *Carvão x petróleo: a disputa para ser a matéria-prima principal da indústria da química orgânica* - Durante a segunda guerra mundial, os esforços da indústria se concentravam na produção de combustíveis, borracha, plásticos e outros insumos para a indústria bélica, baseados no carvão e petróleo como matérias-primas. Sendo o primeiro principalmente na Alemanha, e o segundo nos EUA. O carvão era a única fonte carbonácea abundante no país europeu. Apesar de os EUA terem sua química inicialmente baseada no carvão, petróleo e gás jorravam em grande quantidade e a baixo custo no golfo do México. Aliado a isso, nos anos 1950, o petróleo e gás também possuíam grande disponibilidade e preços estáveis e baixos, devido à entrada de grande oferta do Oriente Médio. Isto provocou que os principais produtores de químicos orgânicos, em todo o mundo, optassem pelo petróleo como matéria-prima. Observa-se uma mudança estrutural na indústria química mundial, pois sua matéria-prima principal passou a ser o petróleo que substituiu o carvão. Além das diversas tecnologias geradas, houve também mudanças nas correlações de forças entre os fornecedores de matéria-prima, pois os principais produtores de petróleo, como por exemplo, o Oriente Médio e América Latina, até então não participavam desta indústria e passam a ter papel decisivo (STOKES, 2006).

- *Olefinas como matéria-prima para produção de gasolina de aviação e petroquímicos*: O desenvolvimento e utilização do craqueamento catalítico no refino do petróleo, para a otimização da produção de gasolina, proporcionou, como coproduto, uma corrente gasosa rica em olefinas. Esses insaturados, reconhecidamente, possuíam grande potencial como precursores na produção de outros produtos químicos, em função de sua alta reatividade, disponibilidade e baixo custo (eram queimadas no flare ou utilizadas como gás combustível). Durante a

segunda guerra mundial, a produção de gasolina, de alta octanagem para a aviação, era de fundamental importância para os esforços da guerra, assim como a utilização de borracha em pneus. Foram então desenvolvidos os processos de polimerização e alquilação para a produção de gasolina e o desenvolvimento da borracha sintética Buna S (SPITZ, 1988). Com o cessar-fogo, baixou a demanda de gasolina e borracha sintética, e estas olefinas leves se transformaram em precursores químicos fundamentais. Verifica-se que a disponibilidade a baixo custo de olefinas leves permitiu utilizá-las em tecnologias que estavam reprimidas, devido ao seu uso na produção de gasolina de aviação e borracha sintética.

A indústria da química orgânica tem a vocação permanente de utilizar quaisquer insumos carbônicos que tenham alta disponibilidade e baixo preço, buscando viabilizar sua transformação em produtos de maior valor agregado. A disponibilidade do acetileno, das olefinas e do petróleo permitiu o desenvolvimento de novos processos e produtos, como os polímeros, que além de aumentar o valor comercial dessas matérias-primas, ainda proporcionaram uma melhoria na qualidade da vida humana.

5.2) Características das matérias-primas

Uma substância para ser eleita matéria-prima ou intermediária viável, em qualquer rota de produção competitiva, deverá possuir características básicas como disponibilidade e estabilidade de preço. Entretanto, em alguns casos o custo de oportunidade direciona a sua escolha.

Entende-se como disponibilidade, a quantidade de produto e o tempo disponível para ser utilizado por determinado processo produtivo. Uma matéria-prima ou um precursor, com pouca disponibilidade, não permitirá o investimento necessário de muitos anos, para o desenvolvimento e aprendizado de sua exploração e transformação. Não haverá retorno econômico, pois seu estoque acabará ou não existirá quantidade disponível exigida pela demanda.

A estabilidade de preço é crucial para a evolução de qualquer rota tecnológica. Considerando duas tecnologias concorrentes em processos e insumos, a que terá maior probabilidade de sucesso econômico é a que contar com preços de matéria-prima ou intermediários com comportamento estável. Vale lembrar que o preço possui contribuição importante no cálculo do custo de produção e, por

conseguinte, no preço final do produto pronto. A matéria-prima contribui com aproximadamente 25% (AYCOCK, 2006), partindo do carvão, e 50% (BAKER, 2004), quando é via GN, para o custo de produção do metanol. Cabe ressaltar que o custo de capital para as plantas a carvão é significativamente mais elevado, devido à complexidade exigida na separação dos produtos.

O custo de oportunidade representa o custo associado a uma determinada escolha medido em termos da melhor oportunidade perdida, ou seja, o custo de oportunidade representa o valor que atribuímos à melhor alternativa de que prescindimos, quando efetuamos a nossa escolha (PINDYK E RUBINFELD, 2002).

O custo de oportunidade, desta forma, está diretamente relacionado com o fato de que o mundo atual é de escassez. A escassez obriga a realização de escolhas, o que implica em prescindir de determinados bens. Portanto, existe um custo de oportunidade sempre que tomamos uma decisão. O custo de oportunidade é um termo usado na economia para indicar o custo de algo em termos de uma oportunidade renunciada, ou seja, o custo causado pela renúncia do ente econômico, bem como os benefícios que poderiam ser obtidos a partir desta oportunidade renunciada ou, ainda, a mais alta renda gerada em alguma aplicação alternativa (BEUREN,1993).

Nesta aplicação alternativa, principalmente quando há grande disponibilidade a baixo custo, é que as matérias-primas, os intermediários e suas mudanças escreveram muitas páginas da história da petroquímica, como os exemplos descritos no item 5.1.

5.3) Matérias-primas carbonáceas disponíveis atualmente

Os compostos orgânicos podem ser obtidos de diversas fontes de carbono, que diferem entre si em função da razão C/H (carbono/hidrogênio). São apresentadas na Figura 5.1, onde se observa a grande flexibilidade do metanol, que pode ser obtido a partir de todas elas. São classificadas em três grandes grupos:

- fontes de uso tradicional com crescimento histórico - são o petróleo e o GN, eleitos como matérias-primas prioritárias da indústria da química e da energia. Vêm sendo utilizadas há bastante tempo, com um crescimento proporcional às necessidades da demanda mundial;

- fonte de uso tradicional com grande crescimento – é o carvão que, no século XIX e início do século XX, era a matéria-prima de maior utilização. Foi substituída pelo petróleo e GN, e, ultimamente, retornou à cena, com um crescimento vigoroso, muito superior ao petróleo e GN, principalmente na Ásia.
- fontes em desenvolvimento – são areias betuminosas (*oil sands*), petróleo ultrapesado, xisto (*oil shale*), gás de carvão (*coalbed methane*), *tight sands* e *shales*, hidrato de metano, gás carbônico (CO2) e biomassa. Essas novas fontes começam a ser utilizadas como matérias-primas, possuem diferentes estágios de desenvolvimento, e apresentam tendência de crescimento;

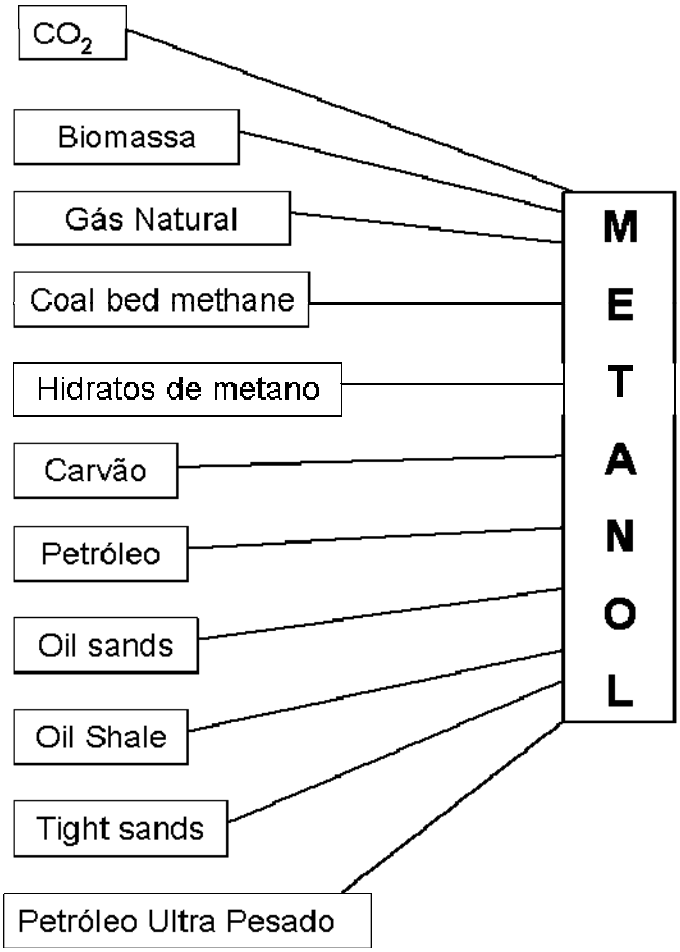


Figura 5.1: Diagrama simplificado das fontes de carbono disponíveis para a produção de metanol
Fonte: Elaboração própria

5.3.1) Fontes de uso tradicional com crescimento histórico

São o petróleo e o GN. Desde o fim da II Guerra Mundial, o petróleo se transformou na principal matéria-prima para as indústrias da energia e da química,

contribuindo inclusive para denominar um importante setor da economia mundial, a petroquímica. Teve companhia do GN, já na sua ocorrência conjunta nos poços associados, que mostrou na última década um maior aumento de consumo mundial. São insumos com extração, refino, processos e economia com alto grau de maturidade e bastante difundidos. Suas principais características são mostradas em inúmeras referências e foram sintetizadas[12] no Quadro 5.1, a partir de informações de relatório anual produzido pela BP relativo ao ano de 2007.

Quadro 5.1: Principais características econômicas do petróleo e GN - Fonte: Baseado em BP, 2008

Petróleo			**GN**		
1997	2007	Diferença (%)	1997	2007	Diferença (%)
73597(1)	85219 (1)	16	2245 (2)	2921 (2)	30
72230 (1)	81532 (1)	13	2235 (2)	2939 (2)	32
1069 (3)	1237 (3)	16	146 (4)	177 (4)	21
25 (5)	72 (5)	190	2,5 (6)	7,0 (6)	175

(2) bilhões de metros cúbicos, (3) bilhões de barris dia,(4) trilhões de metros cúbicos,(5) US$/barril e (6) US$/milhões de BTU

Observa-se que não há muita diferença entre a variação de preços e as reservas do petróleo e GN. Em compensação, as diferenças do consumo e da produção de GN são muito superiores, mais que o dobro das de petróleo.

Aproximadamente 60% dos 177 trilhões de metros cúbicos das reservas provadas de gás natural no mundo em 2007 encontram-se distantes das regiões de maior demanda. Portanto, podem ser consideradas remotas ou *stranded* (BP, 2008a). Os atuais maiores produtores de metanol utilizam preferencialmente essa matéria-prima *stranded*, que é aquela proveniente de jazidas demasiadamente distantes dos mercados consumidores e ou sem condições econômicas de explotação, pelas formas convencionais (THACKERAY E LECKIE, 2002). Isso sugere que o custo do gás natural para produção de metanol, e para os usos de conversão química em geral, não pode estar nos níveis dos preços de mercado do gás para usos energéticos. As plantas industriais são então instaladas próximas às fontes produtoras para minimizar o custo de transporte.

Existem duas possibilidades para utilização destas fontes remotas: a rota física do GNL, onde há liquefação do gás natural perto da jazida, e sua posterior regaseificação próxima ao mercado consumidor, ou na rota química que produz

[12] Mais detalhes em BP, 2008

derivados do etano/propano, previamente separados do gás natural, como polietileno/polipropileno. A conversão química inclui ainda a obtenção do gás de síntese e sua transformação em hidrocarbonetos (GTL) ou em metanol e DME, alternativas de valorização de GN *stranded*. Observa-se que há vantagem na facilidade do transporte e estocagem, que é muito mais fácil e barata para produtos sólidos e líquidos, já que não dependem de liquefação/gaseificação.

Há grande quantidade de GN associado ao petróleo, que atualmente ainda é ventilada, queimada em *flare* ou reinjetada, principalmente em poços onde a distância é empecilho econômico à construção de gasodutos e sejam altamente rentáveis em petróleo. Existem ainda jazidas que possuem volumes pequenos, como poços abandonados com gás injetado ou com pequena quantidade de gás associado, que não são atraídas pelos grandes projetos para a produção do setor energético. Mas são fontes importantes e podem ser avaliadas para a produção de químicos orgânicos (BRANCO, 2008). São queimados, anualmente, 150 bilhões de m3/ano de GN em flares e, cada vez mais, é reconhecido pela indústria do petróleo que a queima e ventilação representam uma grande perda de recursos (WORLD BANK, 2008). É importante salientar que o aumento da prática de taxação do carbono vai contribuir para aumentar o custo de produção nessas operações.

Com relação às grandes jazidas, os projetos *offshore* encontram-se em andamento, na Austrália e Timor, em plantas de metanol com capacidades acima de 1500 MTA, instaladas sobre plataformas fixas ou FPSO (Floating Production, Storage and Offloading), que são uma espécie de “navios plataforma” (ROSCOE, 2006). É importante observar que a configuração *offshore* contribui com a flexibilidade, pois permite o remanejamento da planta, quando a produção de GN estiver em declínio, e não economicamente competitiva.

A Figura 5.2 apresenta o uso de GN, em função da sua escala de produção e mostra o potencial de fabricação de metanol, em poços com capacidades produtivas ao redor de 5 MM-m3/dia (BANISTER, 2006).

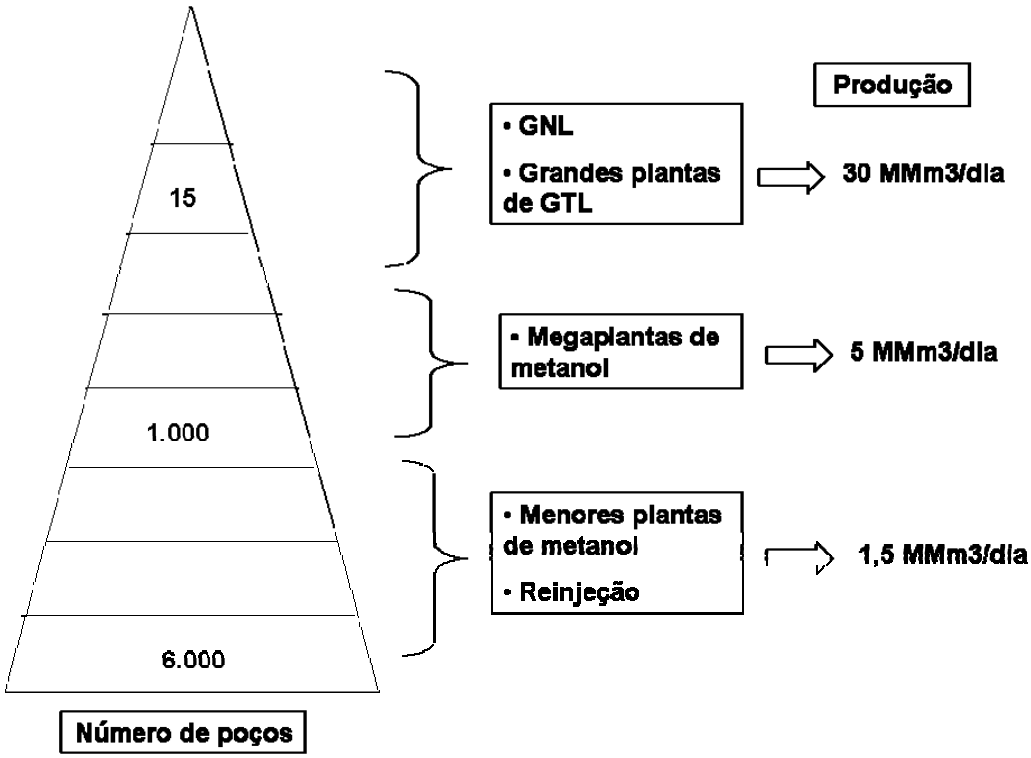


Figura 5.2: Tecnologia mais provável de utilização de GN em função de sua escala de produção
Fonte: Banister, 2006

Mesmo se utilizando a via que produz as macromoléculas, a partir de etano/propano do GN, haverá disponibilidade de metano, que na maioria das vezes está presente em mais de 70% na composição do gás natural, como é visto no Quadro 5.2.

Quadro 5.2: Composição típica do gás natural - Fonte: Abreu e Martinez, 1999

Dados do gás	Gás associado	Gás não-associado				
Campo	Aga Jari Irã	Leman Bank Mar do Norte	Gröningen Holanda	Monroe Louisiana	Amarillo Texas	Ashland Kentucky
		Composição volume em %				
Metano	66,0	94,7	81,2	94,7	72,9	75,0
Etano	14,0	3,0	2,9	2,8	19,0	24,0
Propano	10,5	0,5	0,4	-	-	-
Butano	5,0	0,2	0,1	-	-	-
C5 e maiores	2,0	0,2	0,1	-	-	-
H2S	-	-	-	-	-	-
CO2	1,5	0,1	0,9	0,2	0,4	-
N2	1,0	1,3	14,4	2,3	7,7	1,0
He	-	< 0,1	<0,1	-	-	-
Ar	-	-	-	-	-	-
Densidade (ar=1)	0,87	0,59	0,64	0,68	0,68	0,67
Poder Cal. (kcal/Nm3)	13.136	9.710	7.693	9.251	9.869	10.870

Este metano disponível pode ser utilizado na geração de energia e como matéria-prima na síntese do metanol, provocando sua monetização. Os fatores preponderantes desta valorização são: a coincidência verificada entre as características econômicas deste negócio e as procuras do capital financeiro disponível no mundo, a já observada escalada de preços do gás natural, o crescimento da demanda de produtos químicos e a variável ambiental, que já provoca custos na emissão de carbono no oeste da Europa.

No passado, as plantas de metanol eram construídas perto dos maiores centros consumidores, como EUA e Europa. A diminuição das reservas e o aumento dos preços do gás natural nestas regiões provocaram a migração da produção para países com grandes reservas, como Irã, Trinidad e Tobago, Nigéria e Arábia Saudita, mas que ficam distantes dos grandes centros consumidores. Nos EUA, por exemplo, a produção caiu de 7,4 milhões de toneladas em 1988, que abastecia 70% da demanda doméstica, para 2 milhões de toneladas em 2005, abastecendo apenas 20-25% deste mercado (OLAH *et alii*, 2006).

5.3.2) Fonte de uso tradicional com grande crescimento

É o carvão. Com a eleição do petróleo como matéria-prima, após a II Guerra Mundial, o carvão perdeu muito da sua grande demanda. A partir dos anos 1990, as dificuldades de acesso ao petróleo e GN e suas grandes reservas fizeram com que a China optasse pelo carvão. O crescimento fenomenal desse país foi o grande responsável pelo aumento do consumo mundial de carvão, aproximadamente 36%, de 1997-2007, superior aos 30% do GN e 16% observado para o petróleo, conforme mostrado anteriormente no Quadro 5.1. A tendência é a China continuar o seu crescimento vigoroso. Ela não tem outra matéria-prima alternativa para a produção de energia e químicos, pois não pode ficar dependente de importação de petróleo e GN. Portanto, há tendência da continuidade do aumento de consumo mundial de carvão. Essas características e outras, que serão apresentadas no decorrer deste trabalho, permitem classificá-lo como de grande crescimento.

O carvão é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos, como ocorre com todos os combustíveis fósseis. Sua qualidade e tipo são determinados pelo estágio da sua evolução, através do conteúdo de carbono. A turfa, de baixo conteúdo carbonífero,

constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%. O linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém de 75% a 85% de carbono, e o mais puro dos carvões, o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%. Da mesma forma, os depósitos variam de camadas relativamente simples e próximas da superfície do solo e, portanto, de fácil extração e baixo custo, a complexas e profundas camadas, de difícil extração e custos elevados (ANEEL, 2008).

5.3.2.1) Economia do carvão

A demanda de carvão teve o maior crescimento entre as fontes fósseis em 2007, pelo quinto ano consecutivo. A produção global cresceu 4,5%, sendo a Ásia-Pacífico a região de maior contribuição, conforme o apontado no Gráfico 5.1. A China contribuiu com 2/3 do crescimento do consumo mundial (BP, 2008a). Observa-se que América Central e Oriente Médio têm produção ínfima e que pouco interferem no resultado mundial.

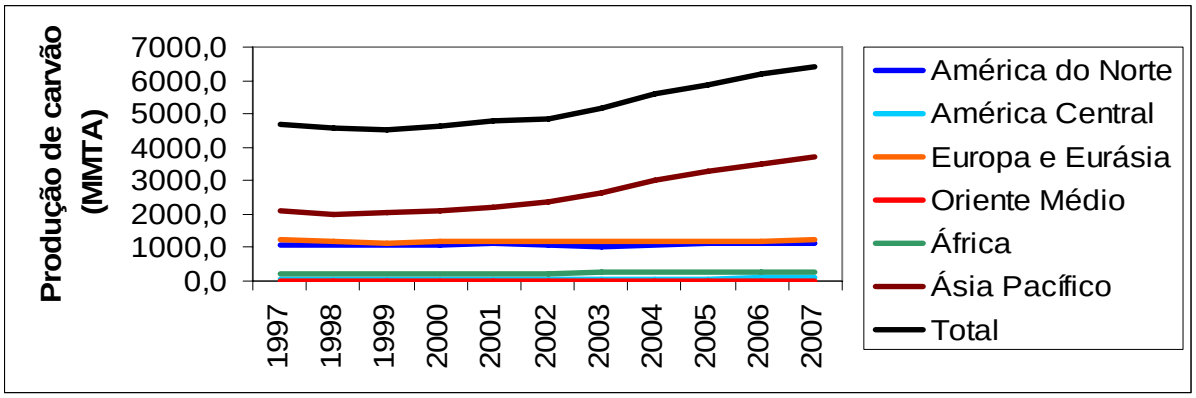
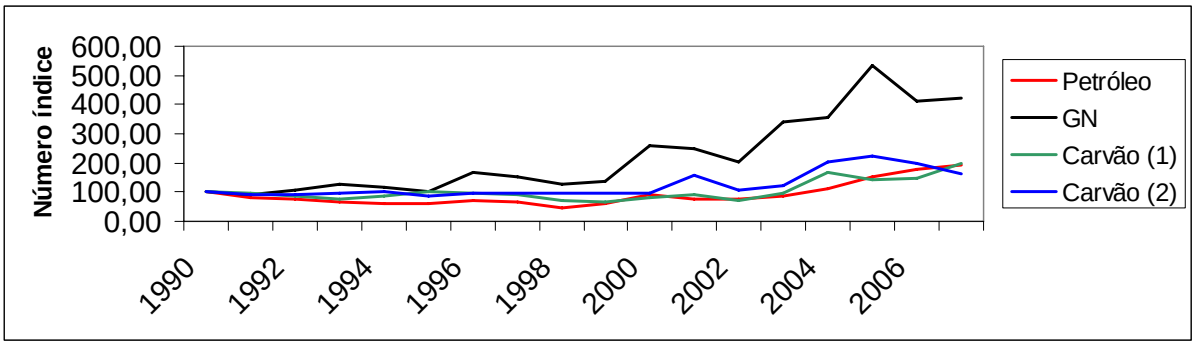


Gráfico 5.1: Produção anual de carvão por regiões geográficas em 2007 - Fonte: BP, 2008a

O carvão é a fonte carbônica mais tradicional de todas as disponíveis. Teve demanda estável desde os anos 60, mas por uma questão de preço vem tendo um crescimento mais acelerado nos últimos anos. Observa-se no Gráfico 5.2, do tipo número índice[13], que o GN teve o maior aumento comparativo de preço, sendo que

[13] Os valores dos preços são padronizados de forma que em 1990 todos são iguais a 100. A partir daí calcula-se o valor proporcional para cada cotação anual

petróleo e carvão têm comportamento similar. O carvão é menor nos EUA devido a suas grandes reservas e alta demanda energética. A China, que também tem as mesmas características, deve possuir um comportamento similar aos EUA, com o agravamento de ser muito mais dependente que ele do carvão.



(1) EUA, (2) China
Gráfico 5.2: Evolução dos preços1990-2007 de petróleo, GN e carvão - Fonte: Elaboração própria baseado em BP, 2008

No Gráfico 5.3, os preços estão todos em uma única base de conteúdo energético: US$/milhão de BTU (MMBTU), para permitir comparação. O GN e carvão, atuais preferidos para a produção de metanol, têm uma relação entre seus preços com pouca variação até 1999, apesar de um maior aumento do GN. Observa-se que a partir daí o preço do GN descola, em função de seu uso nas termoelétricas, e tem taxa de crescimento muito superior a do carvão. Isso confirma a tendência atual de utilização do carvão como matéria-prima, devido a seu menor preço. O petróleo também apresenta evolução crescente de preços, mas com maior interferência da geopolítica e da especulação.

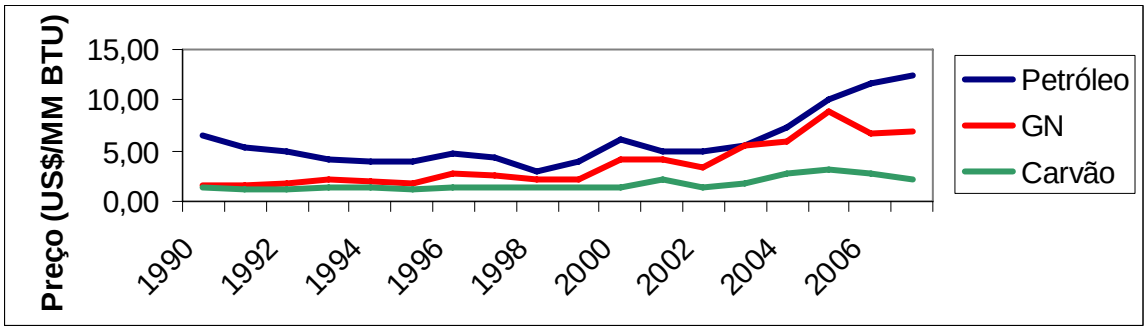


Gráfico 5.3: Preço comparativo do petróleo GN e carvão em US$/MMBTU - Fonte:Elaboração própria baseado em BP, 2008a

No Gráfico 5.3, vê-se que o preço do carvão a partir de 2003 teve grande aumento em todas as regiões, devido à demanda asiática que cresceu 25% de 2003-2007. A entrada em vigor de acordos como o EU Emission Trading Scheme, em janeiro de 2005, e o protocolo de Kioto, em 2008, colocaram preço no carbono, o que antecipadamente também contribuiu neste aumento (WITTEVEEN, 2005).

Compreendem as reservas provadas, aqueles reservatórios cuja produção de carvão, petróleo ou gás é possível sob as circunstâncias econômicas e operacionais existentes (THOMAS, 2001). O Gráfico 5.4 mostra que as maiores reservas provadas de carvão encontram-se em volumes próximos na Europa, Ásia-Pacífico e América do Norte, regiões muito dependentes da importação de petróleo e GN, que poderão substituí-los por carvão.

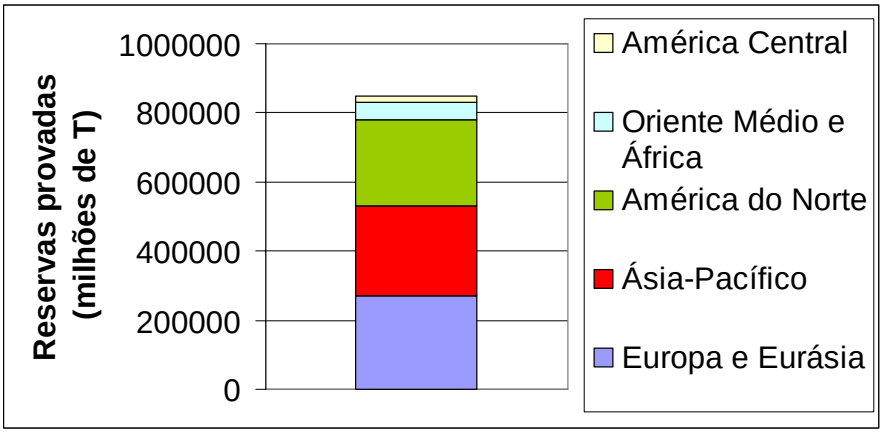


Gráfico 5.4: Reservas provadas de carvão por área geográfica - Fonte: Adaptado de BP, 2008a

Esse mineral apresenta ainda a vantagem de ser a matéria-prima com maior razão reservas/produção, portanto com maior disponibilidade. Seus, aproximadamente, 130 anos correspondem a mais que o triplo do tempo para o petróleo e o dobro para GN, considerando a razão R/P (reservas/produção), obtida através da divisão das reservas provadas pela produção, de 2007 (Gráfico 5.5).

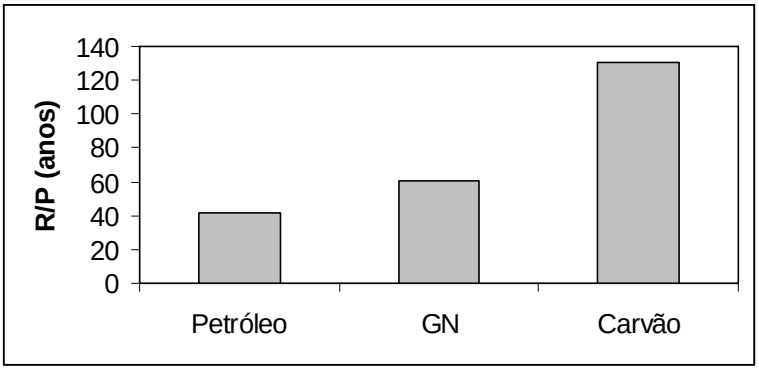


Gráfico 5.5: Tempo de atendimento da demanda de carvão, petróleo e gás natural considerando reservas provadas e produção de 2007 - Fonte: Elaboração própria baseado em BP, 2008a

É importante registrar que o aumento do consumo do carvão tem produzido uma diminuição acentuada da taxa R/P, que em 2000 era de 277 anos, ou seja, praticamente o dobro da atual (R/P).

As reservas conhecidas de carvão mineral no Brasil são inexpressivas e estão localizadas e distribuídas num total de 32 bilhões de toneladas entre Rio Grande do Sul (28 bilhões de toneladas), Santa Catarina (3,3 bilhões de toneladas) e Paraná (103 milhões de toneladas) (ABCM, 2008). Suas principais aplicações, com as respectivas participações, estão no Gráfico 5.6.

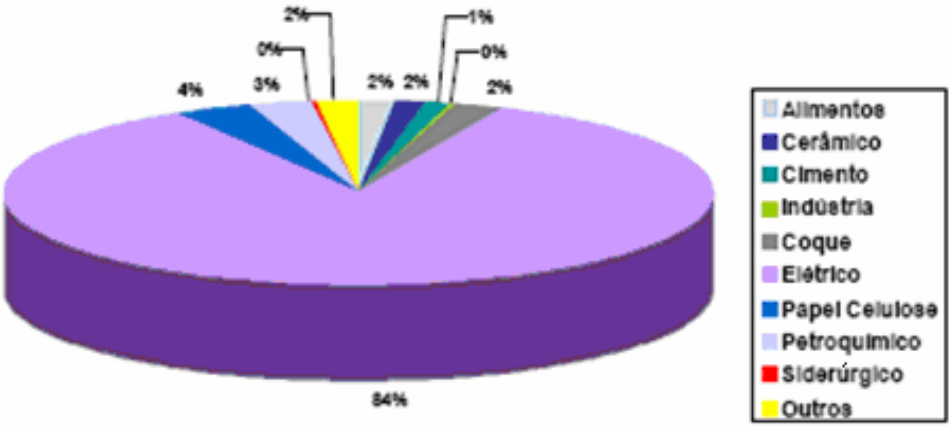


Gráfico 5.6: Participação das aplicações do carvão mineral no Brasil em 2006 – Fonte: ABCM, 2008

O Gráfico 5.6 mostra que a quase totalidade do carvão no Brasil, 84%, é utilizada na combustão direta, para geração de energia nas termoelétricas.

5.3.2.2) Gaseificação do carvão

O processo de produção de gás de síntese (CO+H2), que é o intermediário para a produção de metanol, partindo do carvão é chamado de gaseificação.

O gás de síntese ou *syngas* é produzido, através de reação a altas temperaturas e pressões, de carvão com quantidade controlada de oxigênio (ar ou oxigênio puro) na presença de vapor d'água. Os efluentes contaminantes são CO_2 e N_2 (quando se utiliza ar). O vapor age como moderador de temperatura. Ocorrem as seguintes reações:

Exotérmica: $C + O_2$ ------> CO_2 + 97.000 Kcal/kmol

Endotérmica: CO2 + C ------> 2 CO – 38.200 kcal/kmol

Endotérmica: C + 2H2O ------> $CO_2 + 2H_2$ – 28.200 kcal/kmol

Segundo o Eletric Power Research Institute (PHILLIPS, 2007), os principais processos atualmente utilizados são: leito fixo, leito fluidizado e leito arrastado.

Leito Fixo – É o processo mais antigo usado desde o início do século XX para produção de gás combustível doméstico. O principal gaseificador utilizado é o de tecnologia Lurgi, cujo reator permite a gaseificação do carvão em contracorrente, num leito fixo. O meio, ar ou oxigênio, entra por baixo da grelha. A temperatura do leito varia, sendo de 1000ºC no fundo e de 200-500ºC no topo. (KUMAR, 2007). Operado pela Sasol em sua planta de CTL (Coal to Liquid).

Leito Fluidizado – O ar pressurizado entra por baixo da tela da câmara de combustão vertical, que suporta um leito de areia, ou outros sólidos como cinzas e resíduos de queima. O carvão micropulverizado é alimentado por cima, ficando suspenso no meio reacional. O gaseificador principalmente utilizado é o chamado Winkler, que tem o cabeçote de alimentação na horizontal, onde o oxigênio e o vapor injetados mantêm o carvão moído em suspensão (fluidizado), em constante turbulência, para controle da combustão.

Leito Arrastado – O carvão pulverizado em pequenas partículas é introduzido em co-corrente com oxigênio ou ar e vapor, em cabeçotes, queimando a 1000 ºC ou mais, fundindo carvão e cinzas. O principal gaseificador utilizado é o de Koppers-Totzek, que opera à pressão atmosférica, com carvão pulverizado 90 % abaixo de 200 mesh (KUMAR, 2007). Tais características produzem um gás cuja composição

é praticamente de CO, CO_2 e H_2 não formando produtos líquidos do tipo alcatrão e fenóis. Não há geração de produtos líquidos no gaseificador, como no processo Lurgi, portanto o tratamento dos gases efluentes é bem mais simples, não exigindo unidades para a condensação, separação e concentração dos subprodutos líquidos. Entretanto, o processo Koppers necessita de uma unidade de produção de oxigênio muito maior que a necessária ao processo Lurgi, uma vez que utiliza temperatura da ordem de 1500°C. O Koppers-Totzek é utilizado atualmente em vários países (Índia, África do Sul, Zâmbia, Espanha e Turquia) para a produção de amônia a partir do carvão, sendo utilizado pela Shell, GE Energy (Cheveron – Texaco), Conoco-Phillips e Siemens (KUMAR, 2007).

5.3.2.3) Impactos ambientais do carvão

A mineração do carvão, particularmente a executada na superfície, produz distúrbios numa grande área geográfica. É observado grande número de impactos ambientais como: erosão do solo, produção de pó (poluição do ar), poluição sonora e da água presentes, e impactos na biodiversidade local. Na moderna mineração há um prévio e cauteloso planejamento, que avalia as condições existentes e identifica os sensíveis e potenciais problemas, que o processo pode causar à superfície terrestre, à água, à vegetação, à fauna nativa e ao uso local da terra. Esses estudos devem ser aprovados por órgãos governamentais do meio ambiente, que têm aumentado sistematicamente o nível de exigência. Atualmente, a evolução dos equipamentos e a sofisticação dos métodos utilizados na lavra e na termoeletricidade a carvão nada têm a ver com o passado. Os sistemas de bacias seladas, circuitos fechados de águas, monitoramento do ar e solo, regeneração topográfica com reposição do solo original e revegetação, entre outros, constituem técnicas modernas de prevenção a maiores impactos ambientais, com a lavra do carvão mineral (WORLD COAL INSTITUTE, 2008).

Na gaseificação do carvão, a maior parte das cinzas é recolhida logo no início do processo. Isto não quer dizer que, posteriormente, não sejam necessários outros métodos de limpeza do fluxo gasoso para reduzir a carga de material particulado.

Um dos maiores problemas ambientais do planeta, o efeito estufa, é causado, principalmente, pela emissão do CO_2, resultado da queima de combustíveis fósseis. Os países europeus que exploram carvão estão mudando suas matrizes

energéticas, principalmente a Alemanha. Este país não permite mais a instalação de novas termelétricas a carvão e está investindo pesado nas fontes energéticas consideradas limpas, como a eólica, solar e biomassa. Nesse continente, as restrições estão se tornando cada vez mais rigorosas, tanto que nos últimos cinco anos nenhuma usina a carvão foi licenciada. A China, uma das maiores exploradoras de carvão, está buscando o melhor controle da emissão de particulados e CO2, com o endurecimento dos parâmetros para a concessão de licença ambiental. O governo de Pequim também cortou os subsídios às minas de carvão, e cancelou milhares de licenciamentos de lavras que funcionavam irregularmente, ou que não cumpriam as leis de proteção ambiental (ICIS, 2008g). Em Sepetiba, no Rio de Janeiro, o projeto de uma termelétrica a carvão chegou a ser licenciado pelo órgão ambiental, mas ela não será construída porque um plebiscito municipal decidiu não permitir a instalação, devido exclusivamente aos impactos que a queima do carvão iria provocar no meio ambiente da região (AMBIENTAL, 2008).

O maior impacto da cadeia produtiva do carvão é na sua gaseificação com a geração de CO2 e particulados, em quantidade muito superior à emitida no processamento de derivado de petróleo ou gás natural. Uma das mais novas tecnologias que visa minimizar a agressão ao meio ambiente é a *clean coal*, onde há o reflorestamento da área mineirada, e o efluente gerado na combustão do carvão é dessulfurizado, o CO2 presente é absorvido em solventes e pode ser posteriormente transformado em combustíveis como o metanol ou capturado e estocado (tecnologia CCS – carbon capture and storage). As empresas RWE Power, Ludwigshafen's, BASF (OTC: BASF) e Linde Group estão construindo uma planta em Munique, Alemanha, cujo objetivo é remover 90% do CO2 gerado (LINDE, 2008).

5.3.3) Fontes em desenvolvimento.

As novas fontes em desenvolvimento atual são: areias betuminosas (*oil sands*), petróleo ultrapesado, xisto (*oil shale*), gás de carvão (*coalbed methane*), *tight sands* e *shales*, hidrato de metano, gás carbônico (CO2) e biomassa. O petróleo e o GN estão chegando ao seu limite e o consumo continua aumentando. É previsto que, em 30 ou 35 anos, a produção deverá começar a cair e, consequentemente, haverá tendência à substituição natural desses insumos. Essa

substituição também pode ser explicada pela lei da oferta e da procura. Nos últimos anos, o preço das fontes fósseis tem subido continuamente, devido ao aumento da demanda, a diminuição da oferta e a especulação, inerente à geopolítica. Naturalmente, o consumo mundial tende a crescer cada vez mais, principalmente em função da necessidade de produção de energia. As constantes altas nos preços do petróleo e do GN aumentam o lucro das exploradoras e produtoras desses insumos, e dá a elas condições de investir em novas fontes, cujo custo de produção é muito mais elevado. As tecnologias mais caras vão sendo viabilizadas de acordo com o aumento do preço e a escassez da matéria-prima tradicional. Os países que possuem reservas estão então trabalhando em prol dessas fontes, se preocupando ainda com os impactos ambientais inerentes a cada processo produtivo. Essas matérias-primas são então a seguir descritas:

- Areias betuminosas (*oil sands*) – são depósitos de areia que contêm um óleo bastante viscoso e com alto teor de enxofre, o betume. Sua obtenção se dá através da mineração da areia e extração do betume, que após processado dá origem ao *Synthetic Crude Oil* (SCO), que pode ser carga numa refinaria de petróleo convencional. Estão sendo explorados comercialmente no Canadá, com uma produção em 2007 de 1.184 milhões da barris/dia (ALBERTA ENERGY, 2008). O custo de produção do SCO é de US$ 50, por barril - West Texas Intermediate (WTI) (WORLD ENERGY COUNCIL. 2008a). O processo de produção do SCO gera resíduos carbônicos. A empresa Kline & Company já possui planejamento de gaseificá-lo, gerando gás de síntese para uso na indústria petroquímica. O metanol é um forte candidato a ser produzido a partir daí (ICIS, 2008c).

- Petróleo ultrapesado – é um petróleo com alta densidade (grau API<10) e alto teor de enxofre e metais, encontrado principalmente na faixa de Orinoco, na Venezuela. Exige técnicas diferenciadas para sua produção e refino. Possui previsão de início de produção em 2011 (PDVSA, 2008). O custo de produção do petróleo pesado é a metade do da *oil sands* (WORLD ENERGY COUNCIL. 2008a).

- Xisto (*oil shale*) – É uma rocha que não se afundou o bastante, para ter pressão e temperatura necessárias para a transformação da matéria orgânica nela contida em petróleo. O Brasil detém a segunda maior reserva do mundo de xisto, ficando atrás apenas dos EUA. É uma rocha sedimentar do tipo oleígena, normalmente argilosa, que contém betume e querogênio, um complexo orgânico que se decompõe termicamente e produz óleo e gás. Após passar por processo de

aquecimento a 500 º C é possível extrair dele cerca de 9% em óleo leve, de baixa viscosidade, semelhante ao petróleo, e também água e gás, deixando um resíduo sólido contendo carbono. O refino tradicional do xisto obtém nafta, gasolina, óleo diesel, óleo combustível e gás liquefeito - correspondentes aos mesmos derivados do petróleo extraído dos poços. As características desses produtos dependem do tipo de matéria orgânica e inorgânica que possuem e do solo onde foram formados. Atualmente sua utilização comercial não é economicamente viável (NETL, 2008a).

- Gás de carvão (*coalbed methane*) – É o metano que se encontra adsorvido pela própria estrutura molecular do carvão em alguns de seus depósitos. Por possuir grande área superficial, o carvão tem enorme capacidade de retenção de metano. O metano aqui se encontra adsorvido no carvão, diferentemente do que ocorre nos reservatórios de GN, onde ele ocupa o espaço vazio dos poros. É retirado através da injeção de água pressurizada, que ao ter sua pressão reduzida, provoca desorção da área superficial do carvão. Metano e água são retirados por bombeamento através de poços previamente perfurados, sendo posteriormente separados e tratados na superfície. Esta fonte nos EUA já representa 10% da sua produção de metano (BP, 2008a). É uma fonte em ascensão de interesse pela indústria, tendo grande potencial. Em vista disso, a British Petroleum (BP) está investindo na Austrália, país com grandes reservas, para a produção GNL, a ser exportado para a Ásia (THE ECONOMIST, 2008a),

- *Tight sands and shales* – é similar ao *coalbed methane*, só que ao invés de carvão, são formações geológicas com baixa permeabilidade que em alguns casos podem conter GN. São rochas de alta densidade que não permitem que o GN flua, como acontece normalmente nos reservatórios tradicionais. Os reservatórios não são capazes de produzir a taxas de fluidez ou a vazões econômicas se não forem estimulados através de processos especiais. GN é extraído por perfuração horizontal similar à sua perfuração tradicional com posterior processo de fratura ou utilização de fluidos. Já contribui com 15% da produção doméstica de metano nos EUA (WORLD ENERGY COUCIL, 2008b).

- Hidrato de metano – Os gases têm a característica de formar hidratos com o gelo, ficando retidos em sua estrutura cristalina. O hidrato de metano é o mais comum deles. Portanto, águas profundas de oceanos e lagos frios são as maiores fontes, ainda não exploradas comercialmente (NETL, 2008b). O hidrato de metano vem tendo sua exploração e beneficiamento estudados em plantas pilotos

construídas em locais de baixa temperatura ambiente permanente, como: no norte do Alasca (EUA), no delta do rio Mackenzie no Canadá e no oeste da Sibéria (US DEPARTAMENT OF ENERGY, 2007)

- Gás carbônico (CO_2) – É o principal responsável pelo efeito estufa que aumenta a temperatura da Terra, permitindo maior produção de água pelas geleiras, que elevam os níveis dos oceanos, provocando um total desequilíbrio no ecossistema do planeta. Grandes quantidades de CO_2 são produzidas pela combustão de qualquer uma das fontes carbônicas citadas anteriormente. Estas emissões podem ser capturadas e, se reagidas com hidrogênio, produzirão metanol. Existem pesquisas no desenvolvimento desta alternativa, que exigirá otimização na produção de hidrogênio, principalmente no consumo de energia. Esse hidrogênio poderá ser de fonte renovável, como eletrólise da água (OLAH *et alii*, 2006). Observa-se que essa tecnologia pode evitar a emissão de CO2 para atmosfera, como na gaseificação do carvão. Também permite a transformação do CO2 em fonte renovável, caso seja oriundo da biomassa. Essa rota, então, possui vantagens sobre a atualmente difundida *CO2 Capture and Storage (CCS)*, que retira o CO2 do ambiente, mas apenas armazena-o sem monetizá-lo. A Mitsui Company está construindo, em seu sítio em Osaka, uma planta piloto de 100 toneladas/ano (TA) de metanol a partir de CO2 (ICIS, 2008d).

- Biomassa – é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica vegetal ou animal. Há inúmeras substâncias orgânicas que não são aproveitadas em suas cadeias produtivas, e podem ser utilizadas como biomassa na produção de metano. Exemplos: bagaço de cana, resíduos de beneficiamento de grãos como palha e sabugo de milho, casca de arroz e fezes de animais. O aumento da geração de CO2 e sua influência no clima mundial levaram a busca por fontes renováveis para combustíveis. Daí um grande investimento político e financeiro vem ocorrendo no desenvolvimento da biomassa. A grande área para cultivo, exigida para atender a escala industrial, vem sendo, na atualidade, amplamente discutida, e pode prejudicar o seu crescimento na matriz energética mundial (GONZALES, 2008a). Essas características mostram a necessidade de um estudo mais específico da biomassa, o que será feito na seção seguinte.

5.3.3.1) Biomassa

5.3.3.1.1) Características gerais da biomassa

Todo material orgânico pode ser considerado biomassa, mas comumente as fontes renováveis vegetais como árvores, grãos e coprodutos do beneficiamento agrícola, como palha e bagaço, são as utilizadas na produção de energia e produtos químicos. As usinas de açúcar e álcool no Brasil já são exportadoras de energia, devido à utilização do bagaço de cana como combustível. Os resíduos municipais sólidos também fazem parte do conjunto da biomassa (ANEEL, 2005). Observa-se que podem ser divididas em dois grandes grupos: os resíduos (de beneficiamento agrícola e os municipais sólidos) e os que são cultivados, como cana para etanol ou soja para biodiesel. Esses dois grupos têm perspectivas completamente diferentes quanto ao seu futuro. O primeiro tem alta tendência de desenvolvimento, devido a todo o apelo ambiental de minimização de resíduos, principalmente os urbanos. O segundo já possui restrições, pois necessita de exploração intensiva, o que provocará concorrência pela área plantada, que poderia ser utilizada na produção de alimentos.

Os diferentes tipos de biomassa são processados de diversas formas, para a produção de energéticos e de insumos químicos, como o metanol, conforme mostra a Figura 5.3.

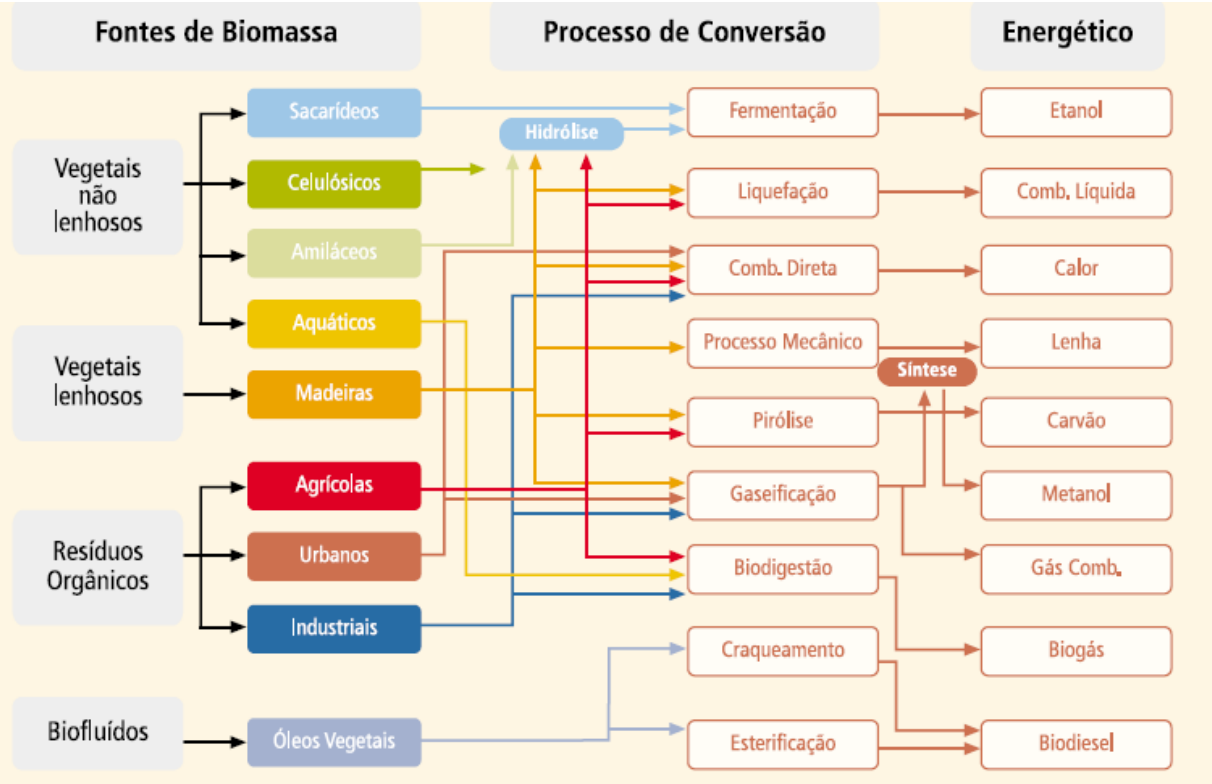


Figura 5.3: Fontes, processos de conversão e produtos da biomassa - Fonte: Aneel, 2005

As tecnologias apresentadas na Figura 5.3 têm os seguintes processos de aproveitamento energético da biomassa (ANEEL, 2005):

Combustão direta: combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia, por exemplo) e caldeiras (geração de vapor, por exemplo). Embora muito prática é, normalmente, ineficiente. Outras desvantagens da combustão direta são a alta umidade (20% ou mais no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc.), o que dificulta o seu armazenamento e transporte.

Gaseificação: é um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações com vapor e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores às estequiométricas (mínimo teórico para a combustão). Há vários tipos de gaseificadores, idênticos aos utilizados na gaseificação do carvão (USHIMA, 2008). É a rota tecnológica para a produção de gás de síntese, intermediário na obtenção de metanol.

Pirólise ou carbonização: é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e

conteúdo energético (carvão, essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na “quase ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética, duas vezes maior que aquela do material de origem, e queima em temperaturas muito mais elevadas. A pirólise pode ser empregada também no aproveitamento de resíduos vegetais, como subprodutos de processos agroindustriais. Nesse caso, é necessário que se faça a compactação dos resíduos, cuja matéria-prima é transformada em briquetes. Com a pirólise, os briquetes adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico, podendo ser usados com maior eficiência na geração de calor.

Digestão anaeróbia: a digestão anaeróbia, assim como a pirólise, ocorre na ausência de ar. Mas, nesse caso, o processo consiste na decomposição do material pela ação de bactérias (microrganismos acidogênicos e metanogênicos). Trata-se de um processo simples, que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos. O tratamento e o aproveitamento energético de dejetos orgânicos (esterco animal, resíduos industriais etc.) podem ser feitos pela digestão anaeróbia em biodigestores, onde o processo é favorecido pela umidade e aquecimento. O aquecimento é provocado pela própria ação das bactérias, mas, em regiões ou épocas de frio, pode ser necessário calor adicional, visto que a temperatura deve ser de pelo menos 35°C. Em termos energéticos, o produto final é o biogás, composto essencialmente por metano (50% a 75%) e dióxido de carbono, com conteúdo energético por volta de 5.500 kcal por metro cúbico. O efluente gerado pelo processo pode ser usado como fertilizante.

Fermentação: é um processo biológico anaeróbio, onde os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e a cana-de-açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos (usualmente leveduras). Em termos energéticos, o produto final, o álcool, é composto por etanol e, em menor proporção, metanol, e pode ser usado como combustível (puro ou adicionado à gasolina) em motores de combustão interna.

Transesterificação: é um processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com metanol ou etanol produzindo glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel). O biodiesel possui características físico-químicas muito semelhantes às do óleo diesel e, portanto, pode ser usado em motores de combustão interna, de uso veicular ou estacionário.

A biomassa é uma fonte renovável, pois a quantidade produzida de CO_2 na sua queima é reutilizada pelas plantas em seu crescimento, através da fotossíntese com a luz solar. Portanto, a energia aproveitada é a solar, cuja quantidade fixada pela fotossíntese é oito vezes maior que o atual consumo mundial de energia, o que demonstra o seu enorme potencial. A maior utilização da biomassa é a produção de energia, desde que o homem descobriu o fogo queimando madeira (ROCHA, 2008).

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento em geração de energia pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos ou caldeiras.

O crescimento constante (com curva cada vez mais ascendente) dos preços das fontes fósseis e as pressões ambientais para utilização de fontes renováveis acarretarão maior aproveitamento da biomassa.

5.3.3.1.2) Aspectos econômicos da biomassa

Embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não comercial, estima-se que, atualmente, ela represente cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária. Em alguns países em desenvolvimento, essa parcela pode aumentar para 34%, chegando a 60% na África. Atualmente, várias tecnologias de aproveitamento estão em fase de desenvolvimento e aplicação. Mesmo assim, há estimativas antagônicas, quanto a sua evolução na proporção da matriz energética mundial. A maioria dos estudos indica que, futuramente, a biomassa ocupará uma menor proporção, enquanto outros estudos indicam que o uso da biomassa deverá se manter estável ou até mesmo aumentar, devido ao crescimento populacional, à urbanização e à melhoria nos padrões de vida. Um aumento nos padrões de vida faz com que a população de áreas rurais e urbanas de países em desenvolvimento passe a usar mais carvão vegetal e lenha, em lugar de resíduos (pequenos galhos de árvore, restos de materiais de construção etc.) (DEMIRBAS E DEMIRBAS, 2007).

A precariedade e a falta de informações oficiais sobre o uso da biomassa devem-se, principalmente, à sua maior utilização no consumo popular informal, em países pobres e setores menos desenvolvidos, que possuem menor monitoramento das informações.

A biomassa teve seu maior consumo global nos EUA, em 2007, com contribuição na matriz energética de aproximadamente 3,5% (EIA, 2008a). Cada 7,0 MMT (milhões de toneladas) de biomassa seca geram 1,0 MMBTU (milhões de BTU) de energia, portanto foram necessários, aproximadamente, 25.000 quatrilhões de tons de biomassa seca para a geração de 3.500 quatrilhões de British thermal unit (BTU) consumidos nos EUA em 2007 (EIA, 2008b).

A produção de produtos químicos a partir da biomassa foi de 17,9 milhões de toneladas em 2006. Aumentou muito, recentemente, devido ao maior consumo de biodiesel e etanol (SRI, 2008).

No Brasil, a imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além da produção de álcool, a queimada em fornos, caldeiras e outros usos não comerciais mostram o grande potencial da biomassa no setor de geração de energia elétrica.

Atualmente, o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no país é o bagaço de cana-de-açúcar. A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, tem disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar. Essa biomassa é utilizada na geração de energia elétrica. As usinas são interligadas aos principais sistemas elétricos, que atendem a grandes centros de consumo dos estados das regiões Sul e Sudeste. Além disso, o período de colheita da cana-de-açúcar coincide com o de estiagem das principais bacias hidrográficas do parque hidrelétrico brasileiro, tornando a opção ainda mais vantajosa (ANEEL, 2005).

O setor sucroalcooleiro produz uma grande quantidade de resíduos, que pode ser aproveitada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração. Ao contrário da produção de madeira, o cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em grandes e contínuas extensões, e o aproveitamento de resíduos (bagaço, palha etc.) é facilitado pela centralização dos processos de produção.

A biomassa pode ser de inúmeras espécies e com composições distintas, portanto para sua otimização é necessário escolher a que tenha maior conversão energética ou, no caso da química, maior seletividade do produto desejado (MCKENDRY, 2002).

Embora ainda muito restrito, o uso de biomassa para a geração de eletricidade tem sido objeto de vários estudos e aplicações, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento. Entre outras razões estão a busca de fontes mais competitivas de geração e a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono. Do ponto de vista técnico-econômico, os principais entraves ao maior uso da biomassa são (SRI, 2008):

- baixa eficiência termodinâmica das plantas na geração de energia elétrica;
- altamente intensiva em terras, a quantidade de produto químico produzido por hectare é muito baixa, porque normalmente ele não é o produto principal e sim um coproduto;
- altamente intensiva em recursos humanos (a atividade exige um grande número de trabalhadores);
- é um processo produtivo lento, comparando-se com os de refino e petroquímica;
- grande quantidade de carga a ser transportada, normalmente, em vias de difícil acesso, por longas distâncias;

Essas características levam a custos relativamente altos de produção e transporte, o que torna essa via não competitiva, se comparada às tradicionais carvão, GN e petróleo para a produção de químicos, apesar das suas inúmeras vantagens ambientais.

5.3.3.1.3) Impactos ambientais da biomassa

Apesar das vantagens citadas, a utilização da biomassa em larga escala também requer alguns cuidados que devem ser lembrados. Nas décadas de 1980 e 1990, a expansão explosiva da indústria do álcool no Brasil provocou desmatamento em várias florestas, para dar lugar a plantações de cana-de-açúcar. Isto tem um efeito global, pois a diminuição das florestas favorece o incremento do teor de CO_2 na atmosfera e, consequentemente, do efeito estufa. Empreendimentos para utilização de biomassa em larga escala podem ter impactos ambientais preocupantes. O resultado pode ser destruição de faunas e floras com extinção de espécies, contaminação do solo e mananciais de água por uso de adubos e defensivos, manejo inadequado ou coprodutos poluidores como o vinhoto (cana-de-açúcar). O respeito à diversidade e a preocupação ambiental devem reger todo e qualquer projeto de utilização de biomassa. De um modo mais genérico, incluindo

aspectos sócio-ambientais, verifica-se a necessidade de maior gerenciamento do uso e ocupação do solo, devido à falta de regularidade no suprimento (sazonalidades da produção), criação de monoculturas, perda de biodiversidade, uso intensivo de defensivos agrícolas entre outros. Esses entraves tendem a ser contornados, a médio e longo prazo, pelo desenvolvimento, aplicação e aprimoramento de novas e eficientes tecnologias de conversão da biomassa (CORTEZ *et alii*, 1999).

A transformação da biomassa em produtos químicos ou energia também provoca impactos no ar, água e solo em todos os elos da sua cadeia produtiva.

5.4) Comparação entre as matérias-primas

O metanol pode ser obtido através de todas as fontes carbônicas fósseis ou renováveis, como foi abordado anteriormente. Numa visão geral pode-se afirmar que a disponibilidade em quantidade, qualidade e baixo preço, a distância do mercado consumidor de maior demanda e o custo de produção serão os principais norteadores da escolha da melhor matéria-prima. Observa-se que existem várias possibilidades possíveis em cada uma dessas dimensões, o que provoca um alto grau de incerteza quanto a sua escolha. Esse ambiente então exige que se compare e discuta os atributos que cada uma delas possui, de forma a amenizar as incertezas presentes.

Conforme mostrado no Capítulo 3, foi escolhida a metodologia de análise qualitativa pelo critério de pontos para avaliar as incertezas presentes na escolha da matéria-prima.

As incertezas, quanto à escolha da matéria-prima, podem ser sintetizadas em quatro indicadores: grau de desenvolvimento tecnológico, disponibilidade, facilidade de produção e efeito ambiental positivo. Esses indicadores foram comparados para cada uma das matérias-primas, através da atribuição de pesos, e são conceituados da seguinte forma:

- *grau de desenvolvimento tecnológico*: é o estágio atual em que se encontra a tecnologia com relação à extração, beneficiamento e logística de cada matéria-prima em relação ao seu potencial de amadurecimento, sendo o grau “1” à menos desenvolvida, e o grau “5” à já em estado maduro;

- *disponibilidade*: é a quantidade e o tempo que a matéria-prima estará disponível para ser utilizada. O grau “1” é dado à menos disponível, e o grau “5” à mais disponível;

- *facilidade de produção*: é o quanto exige de trabalho, tecnologia e custo para o insumo ser extraído, produzido, transportado e convertido em metanol. A nota “1” é dada ao de maior dificuldade de produção, e o grau “5” ao de maior facilidade;

- *efeito ambiental positivo*: é a contribuição positiva ou negativa dada ao meio ambiente através da extração, beneficiamento, movimentação de cada matéria-prima, assim como sua utilização na produção de metanol, sendo a de maior contribuição positiva ao meio ambiente atribuída o peso “5” e a de menor o peso “1”.

No Quadro 5.3 são apresentados os graus auferidos a cada uma das matérias-primas para esses indicadores:

Quadro 5.3: Graus auferidos aos indicadores de incerteza para as fontes carbônicas - Fonte: Elaboração própria

Fontes	**Desenvolvimento tecnológico**	**Disponibilidade**	**Facilidade de produção**	**Efeito ambiental positivo**
Petróleo	5	3	4	2
GN	5	1	5	3
Carvão	5	4	4	1
Areias betuminosas	3	2	2	2
Petróleo pesado	2	2	3	2
Xisto	2	2	2	2
Gás de carvão	4	1	4	3
Tight sands	4	1	4	3
Hidrato de metano	1	5	1	3
Gás carbônico	1	5	2	5
Biomassa	2	4	2	4

Baseando-se nas informações apresentadas para cada uma das fontes é possível construir os Quadros, 5.4, 5.5 e 5.6, que traduzem de forma sintética as justificativas dos pontos atribuídos no Quadro 5.3 para os indicadores de desenvolvimento tecnológico, facilidade de produção e efeito ambiental positivo,

respectivamente. Os graus auferidos à disponibilidade são justificados descritivamente posteriormente:

Quadro 5.4: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento tecnológico na apuração comparativa de incertezas para matérias-primas Fonte: Elaboração própria

Fontes	Pontos	Justificativa
Petróleo GN Carvão	5	São tradicionais e apresentam-se em estágio de maturidade
Gás de carvão Tight sands	4	já são utilizados a custo competitivo, porém são mais recentes necessitam ainda de tempo para atingir a maturidade das tradicionais
Areias betuminosas	3	vêm sendo beneficiadas, mas ainda não são comercialmente competitivas, o que exige pesquisa e desenvolvimento
Petróleo pesado Xisto Biomassa	2	as primeiras unidades de demonstração estão sendo construídas ou em operação recente
Hidrato de metano Gás carbônico	1	encontram-se em estágio inicial de pesquisa e desenvolvimento

Quadro 5.5: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de facilidade de produção na apuração de incertezas para matérias-primas Fonte: Elaboração própria

Fontes	Pontos	Justificativa
GN	5	gasoso, portanto de mais fácil extração e transformação que as outras fontes
Petróleo Carvão Gás de carvão Tight sands	4	petróleo e carvão tem facilidade de produção similar, porém inferior ao GN. A eles se somam gás de carvão e tight sands que apesar de gasosas precisam de injeção de água e estimulação para sua extração
Petróleo pesado	3	possui maior viscosidade que o petróleo tornando-o mais difícil de extrair e processar. Tem a metade do custo de produção das areias oleíferas
Xisto Areias betuminosas	2	betume precisa ser extraído das rochas (xisto) e das areias betuminosas e beneficiado para servir como carga em refinaria convencional.
Gás carbônico	2	de difícil captura e separação, e alta demanda de energia para produção de H2, utilizado na produção de metanol
Biomassa	2	dispersa, tem grande dificuldade logística e baixa densidade energética
Hidrato de metano	1	ocorre em locais de difíceis acessos e condições climáticas, são as mais críticas para explotação

Quadro 5.6: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de na apuração comparativa de incertezas para matérias-primas Fonte: Elaboração própria

Fontes	Pontos	Justificativa
Gás carbônico	5	tem a maior contribuição pois além de renovável, evita emissão e retira CO2 do ar melhorando as atuais condições ambientais
Biomassa	4	é renovável, criticada pela competição com área plantada, a fotossíntese não possui a mesma eficiência que a rota direta usando CO2
GN Gás de carvão Tight sands Hidrato de metano	3	fontes gasosas que possuem cadeia produtiva menos agressiva ao meio ambiente, já que são mais facilmente explotadas e transformadas
Petróleo Areias betuminosas Petróleo pesado Xisto	2	fontes líquidas cuja extração e transformação é mais agressiva ao meio ambiente que as gasosas, porém menos agressivas que as sólidas
Carvão	1	fonte sólida cuja extração e transformação é a mais agressiva ao meio ambiente. Contém a gaseificação que produz grande quantidade de CO2 e particulados

A disponibilidade possui características individuais que para melhor compreensão da justificativa da atribuição de pontos é melhor descrevê-la do que inseri-la em um quadro. A disponibilidade das fontes fósseis não pode ser comparada tomando-se como base as reservas provadas[14]. Algumas fontes como *tight sands* e hidrato de metano, por serem de interesse recente, não possuem esses números, e estão ainda em fase de produção experimental. A disponibilidade em termos de tempo dada pela razão R/P é calculada a partir das reservas, portanto também não poderá ser utilizada. Observa-se ainda uma grande variação da razão R/P na última década, devido, principalmente, ao aumento do consumo de carvão e GN, o que dificulta também sua aplicação. Em função dessas limitações será usado o conceito de recurso como balizador da disponibilidade. Entende-se como recurso, o potencial global de utilização da fonte carbonácea, ou seja, a quantidade mundial estimada com possibilidade de exploração, incluindo aí as reservas desconhecidas (PETROBRÁS, 2008 e SPE, 2008). Os dados dos recursos foram obtidos a partir de EIA, 2008, USGS, 2008 e BP, 2008 e inseridos no Quadro 5.4. O fator de conversão

[14] É a quantidade do recurso que pode ser comprovadamente extraída, com as tecnologias atualmente existentes.

(NATIONAL ENERGY BOARD, 2008) tem o objetivo de transformar os recursos em uma mesma unidade de energia, de forma a poder compará-los.

Quadro 5.7: Recursos previstos das fontes fósseis, em equivalente energético – Fonte: Elaboração própria, baseado em EIA, 2008c, USGS, 2008, BP, 2008 e NATIONAL ENERGY BOARD, 2008

Matéria-prima	Recursos 2007	Unidades	Fator de conversão	Equivalente em energia (EJ) (2)
GN	292	Trilhões de m3	1,05	307
Metano de carvão	180	Trilhões de m3	1,05	189
Tight sands	300	Trilhões de m3	1,05	315
Hidrato de metano	8.000.000	Trilhões de m3	1,05	8400000
Carvão	6.200	Bilhões de T	20,00 (1)	124000
Petróleo	9.000	Bilhões de barris	6,06	54540
Petróleo pesado	2.300	Bilhões de barris	6,06	13938
Areias oleíferas	2.400	Bilhões de barris	6,06	14544
Xisto	2.800	Bilhões de barris	6,06	16968

(1) calculado a partir da media das diferentes energias produzidas pelos diversos tipos de carvão
(2) $E = 10^{18}$

O Quadro 5.7 mostra que os recursos podem ser distribuídos em cinco ordens de grandeza, às quais serão auferidos graus em ordem crescente do equivalente energético. O de maior recurso é o hidrato de metano que recebeu “5”, a seguir vem o carvão com “4”, o petróleo com “3”, o petróleo pesado, as areias oleíferas e xisto com “2” e, finalmente GN, metano de carvão e *tight sands* com “1”. Quanto aos renováveis, biomassa e CO2, por serem teoricamente recursos infindáveis, receberam graus “4” e “5” respectivamente. Grau menor foi dado à biomassa devido à concorrência que ela pode sofrer com a área plantada para a produção de alimentos.

Observa-se que as notas foram distribuídas de forma a que a maior representasse a menor incerteza, e a menor, a maior incerteza. A grande maioria dos aspectos que contribuem para a incerteza de cada matéria-prima está embutida nos indicadores escolhidos, portanto o somatório desses indicadores apontará a incerteza inerente a cada fonte. A totalização dos pesos comparativos dos indicadores de incerteza fornece um valor que é inversamente proporcional ao grau de incerteza, para cada uma das matérias-primas. A ordenação crescente dos graus de incerteza é mostrada no Quadro 5.8.

Quadro 5.8: Grau de incerteza das matérias-primas - Fonte: Elaboração própria

Fontes	Somatório dos indicadores	Grau de incerteza
Petróleo	14	0,071
GN	14	0,071
Carvão	14	0,071
Gás carbônico	13	0,077
Gás de carvão	12	0,083
Tight sands	12	0,083
Biomassa	12	0,083
Hidrato de metano	10	0,100
Areias betuminosas	9	0,111
Petróleo pesado	9	0,111
Xisto	8	0,125

O Quadro 5.8. demonstra que as fontes tradicionais, petróleo, GN e carvão, ainda são as matérias-primas de menor incerteza. Entretanto, pelos indicadores avaliados, elas não terão espaço para diminuir seus índices de incerteza, pois já atingiram a maturidade em sua tecnologia, seus impactos ambientais serão minimizados, mas sempre existirão, e a disponibilidade dependerá do consumo. Isso privilegia as novas matérias-primas que ainda podem se desenvolver em tecnologia, com consequente facilitação da produção, e diminuição do grau de incerteza. Observa-se que a fonte de maior potencial de utilização é CO2, pois é a única que pode chegar ao somatório máximo de 20, se otimizar sua cadeia produtiva em tecnologia e facilidade de produção. Entretanto, aparentemente, é a que está mais distante de concretização.

Observa-se que a utilização de pesos iguais para todos os indicadores na apuração das incertezas é uma limitação do trabalho. Em condições de melhor conhecimento seria desejável avaliar os diferentes pesos de cada variável. Há distorções importantes que podem decorrer da adição simples dos pontos, como um resultado excessivamente favorável ao CO2 como fonte. As dificuldades tecnológicas são extraordinárias nos níveis atuais de conhecimento e a qualidade ambiental é uma dimensão estática, inerente à natureza da fonte. Não adianta ter

valor ambiental se o obstáculo tecnológico for de grande dificuldade, como a geração de hidrogênio a um custo competitivo, para a produção de metanol.

Esses quatro indicadores se relacionam entre si e traduzem informações importantes. A partir daí foram construídos seis gráficos possíveis do arranjo dos quatro parâmetros dois a dois.

O Gráfico 5.7 apresenta a variação da disponibilidade em função do desenvolvimento tecnológico. Observa-se que os mais desenvolvidos são as fontes tradicionais carvão e o petróleo. Porém as novas fontes, biomassa, hidrato e CO2, que possuem maior disponibilidade, poderão migrar para esse patamar de fonte preferida, se o nível de desenvolvimento tecnológico permitir.

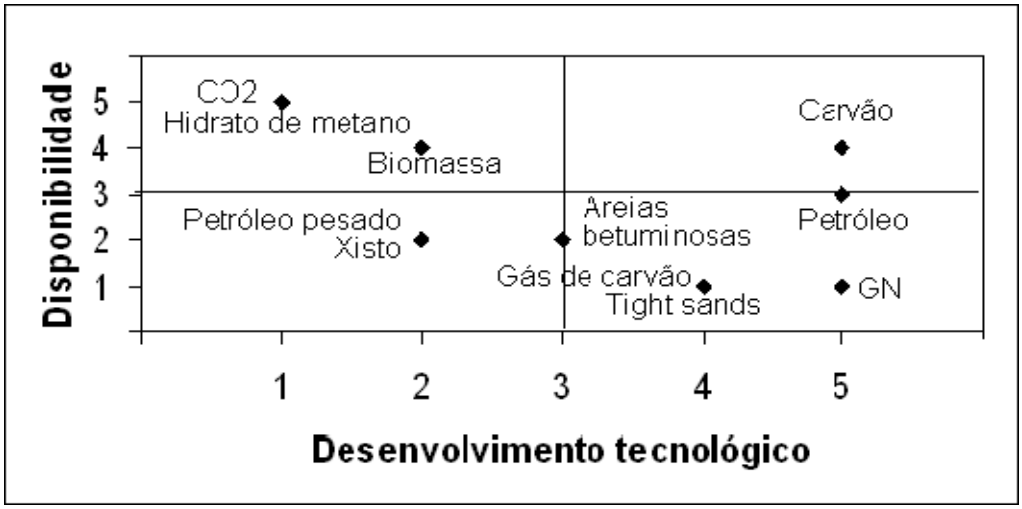


Gráfico 5.7: Variação da disponibilidade em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas - Fonte: Elaboração própria

Vê-se no Gráfico 5.8 que as novas fontes, biomassa, hidrato e CO2, possuem maior disponibilidade, mas ainda têm grande dificuldade de produção. Estão muito longe das já maduras, carvão, GN e petróleo, cujas disponibilidades tendem a diminuir, em função do consumo. Portanto, as novas fontes poderão substituir ou complementar as tradicionais, desde que tenham investimento na facilitação da produção.

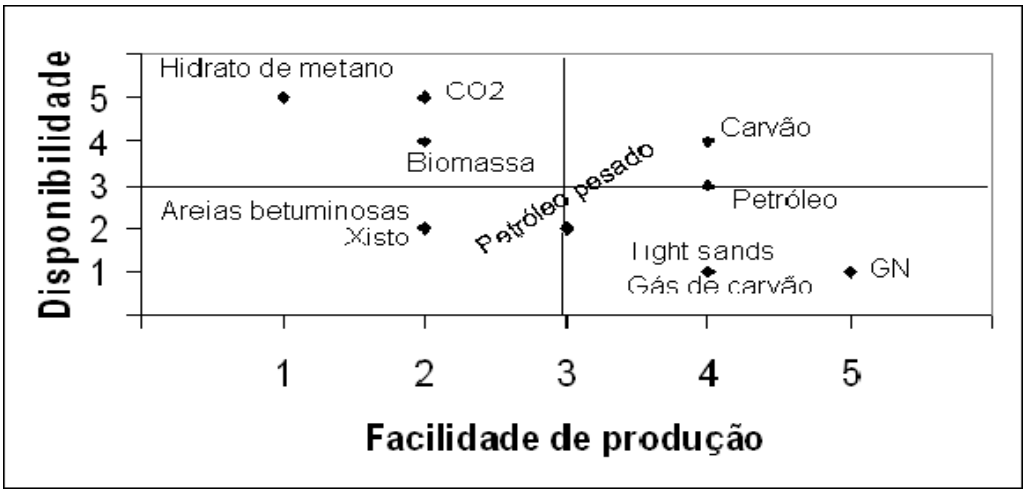


Gráfico 5.8: Variação da disponibilidade em função da facilidade de produção das fontes carbônicas Fonte: Elaboração própria

O desenvolvimento da tecnologia é um dos fatores que alteram a facilidade de produção, pois, quanto maior esse desenvolvimento, maior a facilidade de produção. Da mesma forma que o Gráfico 5.8, o Gráfico 5.9 mostra que para CO2 e hidrato, fontes de grande disponibilidade, há necessidade de amplo investimento no desenvolvimento de tecnologia na explotação e na transformação, o que facilitará essa produção, provocando o aumento de ambas, contribuindo ainda para maior diversidade das fontes disponíveis na obtenção de metanol.

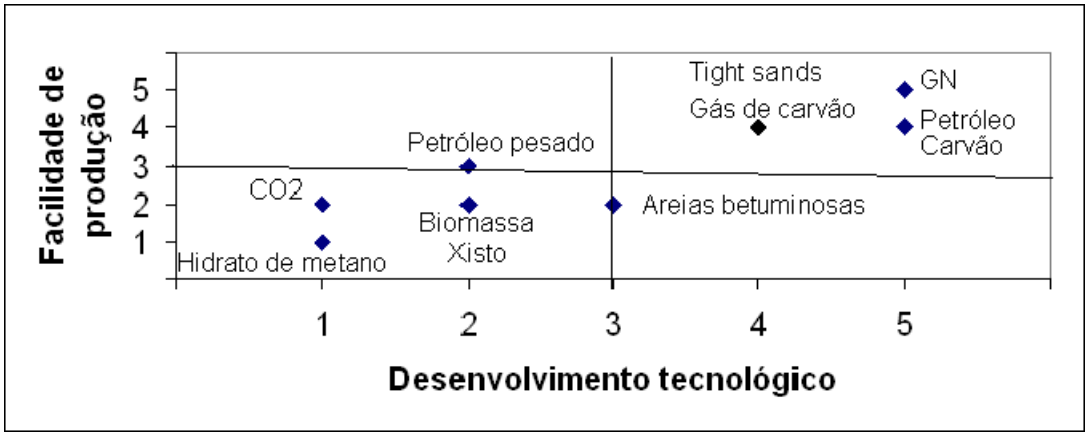


Gráfico 5.9: Variação da facilidade da produção em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas – Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 5.10 mostra, novamente, que há necessidade do desenvolvimento de tecnologia nas novas fontes, CO2 e Biomassa, hoje ainda em estágio

embrionário, pois também apresentam a vantagem de serem as menos poluidoras dentre as fontes carbônicas.

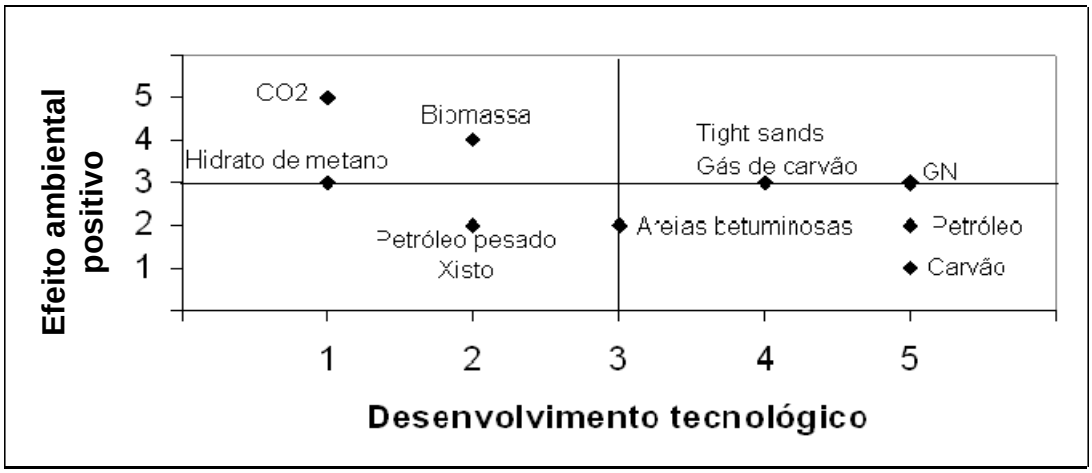


Gráfico 5.10: Variação do efeito ambiental positivo em função do desenvolvimento tecnológico das fontes carbônicas - Fonte: Elaboração própria

. O Gráfico 5.11 mostra que as novas fontes, hidrato, CO2 e biomassa, são as de maior disponibilidade e também as de maior efeito ambiental positivo, portanto as de maior possibilidade de sucesso futuro.

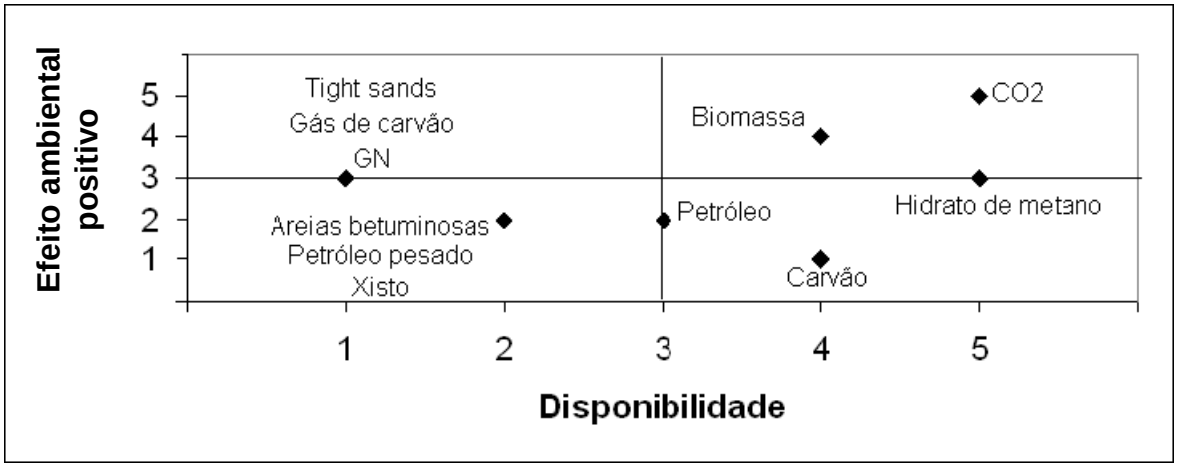


Gráfico 5.11: Variação da disponibilidade em função do efeito ambiental positivo das fontes carbônicas Fonte: Elaboração própria

Mais uma vez o Gráfico 5.12 mostra que as fontes de maior efeito ambiental positivo, biomassa, CO2 e hidrato de metano, possuem ainda atualmente muita dificuldade de captação, estocagem e exploração, de cada uma delas,

respectivamente. Os processos produtivos estão em escalas de laboratório ou em plantas piloto. Portanto, são tecnologias novas em estágio inicial de desenvolvimento.

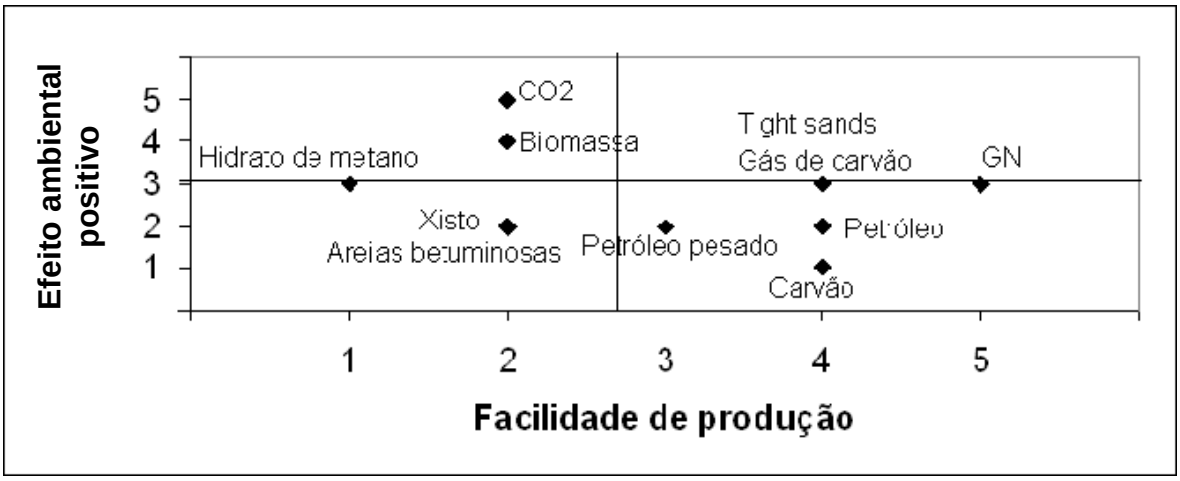


Gráfico 5.12: Variação do efeito ambiental positivo em função da facilidade de produção das fontes carbônicas – Fonte: Elaboração própria

Do conjunto dos gráficos vê-se que as novas fontes, biomassa, CO2 e hidrato de metano, apresentam a maior tendência de utilização futura já que possuem as maiores disponibilidades e efeito ambiental positivo. Entretanto, para o seu uso efetivo, será necessário um vigoroso desenvolvimento tecnológico em toda cadeia produtiva.

5.5) A flexibilidade de matéria-prima na produção de metanol

Conforme anteriormente apresentado, flexibilidade é uma alternativa confiável para amenizar as incertezas. Devido à complexidade das flexibilidades, o Capítulo 2 apontou os parâmetros inerentes à análise de um sistema tecnológico, como o baseado em metanol, que são os parâmetros de eficiência e capacidade de resposta para a dimensão temporal de longo prazo e o parâmetro de robustez na dimensão de previsão de mudança.

Avaliando as fontes disponíveis para a obtenção do metanol, observa-se que elas dotam o sistema de grandes flexibilidades, pois conferem:

- *eficiência* - petróleo, carvão e GN, possuem atualmente tecnologias de extração e transformação em metanol maduras e competitivas. Havendo qualquer

mudança na competitividade de determinada matéria-prima, a demanda exigida de metanol poderá ser suprida por outra. No futuro a eficiência ainda vai aumentar. Haverá a entrada das novas fontes em desenvolvimento, que precisam ainda de pesquisas, principalmente na área de extração, uma vez que seu produto final é o metano ou outro hidrocarboneto qualquer, cujas tecnologias de transformação para o metanol são atualmente conhecidas. Isso mostra a garantia de fornecimento atual e futuro de matéria-prima para a produção de metanol.

- *capacidade de resposta* – necessitando-se de mudança na matéria-prima, o tempo de resposta será igual ao da construção de novas unidades, mais o tempo de tomada de decisão, visto que petróleo, carvão e GN, por exemplo, possuem tecnologias maduras para produção de metanol. A internacionalização do mercado permite que, caso haja restrição de fornecimento de qualquer fonte em determinado lugar, essa demanda poderá ser suprida por unidades em outras localizações. Esse fato ocorreu com a Methanex, a partir de 2005 no Chile, quando a Argentina, responsável por 60% do abastecimento de GN para essas unidades, cortou seu fornecimento. No mesmo instante a empresa aumentou os níveis de produção em outras unidades de sua propriedade, em outras regiões, para suprir essa escassez. As novas fontes também provocarão aumento na capacidade de resposta, pois aumentarão o leque de opções para a escolha.

- *robustez* – é muito improvável que haja futuramente uma única matéria-prima competitiva para a produção de metanol. A localização, o custo de extração, o preço e a taxa de conversão matéria-prima/metanol, entre outras características, nortearão o caminho a seguir. O sistema avaliado neste trabalho permite que a escolha seja entre todas as fontes fósseis e renováveis atualmente existentes, o que demonstra sua alta robustez. Lembra-se que o Quadro 5.5 aponta a ordem de escolha, em função da menor incerteza.

O investimento em metanol tem boa probabilidade de sucesso, pois existe a garantia de fornecimento de matéria-prima. É um produto de origem universal, versátil, ou seja, pode ser obtido de todas as fontes carbonáceas disponíveis, tanto fósseis como renováveis, existentes em qualquer parte do mundo.

A disponibilidade de matéria-prima, em determinada região, também aumenta a flexibilidade do sistema. A China, por exemplo, baseou-se no carvão, devido à existência de enormes reservas no país e por buscar independência no fornecimento. Já o Oriente Médio, que possui grandes reservas de GN, o tem como

matéria-prima preferencial. Entretanto há permanentes incertezas quanto à geopolítica e à economia da região. É dificilmente factível, por exemplo, a construção de um gasoduto do Irã até a Europa. Daí a opção de utilizar o GN como matéria-prima para a química orgânica, pois viabiliza sua utilização e ainda aumenta o valor das reservas. Constroem-se plantas gigantescas de eteno e propeno para a produção de polipropilenos e polietilenos, que possuem maior valor agregado que o GN.

Considerando-se a grande quantidade de novos recursos ainda existentes, observa-se que o metanol tem vida longa, pois o fornecimento de matéria-prima está garantido, o que confere vantagem competitiva e confiabilidade ao sistema nele baseado.

Existem obstáculos tecnológicos e econômicos a esta flexibilização. A indústria química tradicionalmente elege matérias-primas únicas. A estrutura complexa da indústria procura explorar as vantagens econômicas decorrentes dessa padronização. A mudança do modelo provocará alterações profundas nesta estrutura. Não é também tradição do setor investir em tecnologias dispersas, uma vez que elas poderão partir de qualquer uma das fontes. Portanto, a adoção da arquitetura que contempla o metanol como *gateway* dependerá da capacidade de mudança destas e de outras características próprias da indústria da energia e da química, exigidas pela flexibilização.

A reunião dessas flexibilidades em matérias-primas mostradas para o metanol faz concluir que um sistema, que o tenha como ponto focal, é uma alternativa capaz de amenizar as grandes incertezas presentes no ambiente socioeconômico atual.

O carvão seria a matéria-prima mais competitiva atualmente, pois tem grande disponibilidade e tecnologias de extração e processamento maduras. Porém, atualmente ele não é a matéria-prima dominante, pois possui duas grandes desvantagens. A primeira é a geração de CO2 e particulados em seu beneficiamento, que causam grande impacto ambiental. Para serem minimizados precisam de altos investimentos em pesquisas tecnológicas e na construção e operação de plantas, que aumentam em muito o custo da operação. A segunda é o próprio processamento em si, que é mais custoso para o carvão devido à alta necessidade energética da gaseificação e da geração de um número maior de coprodutos, que exigem maior custo de separação.

Uma variável fundamental para a viabilização das matérias-primas de menor custo é a questão da solução das emissões de CO2. Por exemplo, diminuindo-se essa emissão na produção do gás de síntese a partir do carvão, haverá muito mais interesse por essa rota, o que tornará o carvão imbatível. A grande desvantagem das fontes fósseis é a emissão de CO2, portanto, qualquer uma delas que minimizá-la terá vantagens sobre as outras. Lembra-se que a taxação do carbono interferirá nos custos de produção.

Por outro lado as fontes renováveis possuem maior disponibilidade e menor impacto ambiental, entretanto estão pouco desenvolvidas tecnologicamente.

5.6) Resumo e conclusões do capítulo

A indústria da química orgânica sempre enfrentou desafios e não mediu esforços para utilizar qualquer fonte carbônica que tivesse grande disponibilidade e baixo custo. A história dessa indústria é também construída através do aproveitamento de insumo disponível, como: a mudança do carvão para o petróleo como matéria-prima preferencial, a utilização de GN para a produção de petroquímicos olefínicos básicos e o aproveitamento de coprodutos, como acetileno e efluentes de gases de FCC e resíduos de refino também como matéria-prima.

Para uma substância ser matéria-prima ou intermediário viável, em qualquer rota de produção competitiva, deve possuir alta disponibilidade e preço baixo. Em função disso, os atuais maiores produtores utilizam de preferência matéria-prima chamada *stranded,* que é aquela oriunda de jazidas distantes dos mercados consumidores e ou sem condições econômicas de exploração pelas formas convencionais, portanto apresentam as características supracitadas de alta disponibilidade e preços baixos. Observa-se que o custo do gás natural para produção de metanol não pode estar nos níveis dos preços praticados no mercado de produção de energia.

O metanol pode ser obtido, via gás de síntese, de qualquer fonte carbonácea, que são classificadas em três grandes grupos: fontes de uso tradicional (GN e petróleo), fonte de uso tradicional com grande crescimento (carvão) e fontes em desenvolvimento (*oil sands*, petróleo ultrapesado, xisto, *coalbed methane, tight sands e shales*, hidrato de metano, CO2 e biomassa). As que atualmente possuem

maior potencial de crescimento são as de uso tradicional com grande crescimento e as novas em desenvolvimento.

Existe um alto grau de incerteza, quanto à escolha da fonte a ser usada, distribuído nos indicadores: grau de desenvolvimento tecnológico, disponibilidade, facilidade de produção e efeito ambiental positivo. A análise desses indicadores de incerteza é capaz de fornecer importantes conclusões para sustentar este trabalho, e serão apresentadas a seguir.

As fontes tradicionais petróleo, GN e carvão ainda são as matérias-primas de menor incerteza. Devido principalmente à grande geração de CO2 em sua combustão, têm tendência de diminuição de participação no uso em energia e química. Isso tem provocado o direcionamento do foco para as novas matérias-primas, de menor impacto ambiental e grande disponibilidade. Porém elas ainda exigem muitos desenvolvimentos tecnológicos para se tornarem competitivas.

O que tem determinado a escolha da matéria-prima é a sua disponibilidade e principalmente o seu preço. Observa-se que suas grandes reservas levaram o Oriente Médio a optar pelo GN e a China pelo carvão, garantindo assim seus fornecimentos na quantidade requerida e a baixo preço.

A grande versatilidade de fontes para a obtenção de metanol mostra a flexibilidade existente num sistema que se baseie nele. Observa-se ainda a garantia e confiabilidade de fornecimento de matéria-prima para sua produção no presente e no futuro, o que mostra a sua grande probabilidade de longevidade. Essas características são vantagens importantes deste estudo que visa analisar a viabilidade de um sistema tecnológico, em que o metanol funciona como *gateway,* para reorganização das cadeias da química e da energia.

CAPÍTULO 6: APLICAÇÕES DO METANOL

Os objetivos deste capítulo são apresentar, comparar e discutir as aplicações tradicionais e o potencial dos novos usos do metanol, na indústria química e da energia, como intermediário químico e combustível, e mostrar a flexibilidade presente, o que contribuirá para alimentar a viabilidade do sistema tecnológico avaliado neste trabalho.

Inicialmente serão abordadas as principais características dos usos do metanol. Dividem-se as aplicações em dois grandes grupos, baseados na tendência de evolução: as tradicionais com crescimento histórico e as novas com grande potencial de crescimento, que serão discutidas isoladamente. A região asiática é a que mais investe e cresce na produção de metanol, principalmente a China, e, portanto, terá enfoque particular. Posteriormente os usos são comparados, de forma a subsidiar a avaliação e discussão das flexibilidades existentes nas aplicações do metanol. Finalmente, serão mostradas a síntese e as conclusões do capítulo.

O metanol possui inúmeras aplicações que para melhor compreensão foram sistematizadas na Figura 6.1.

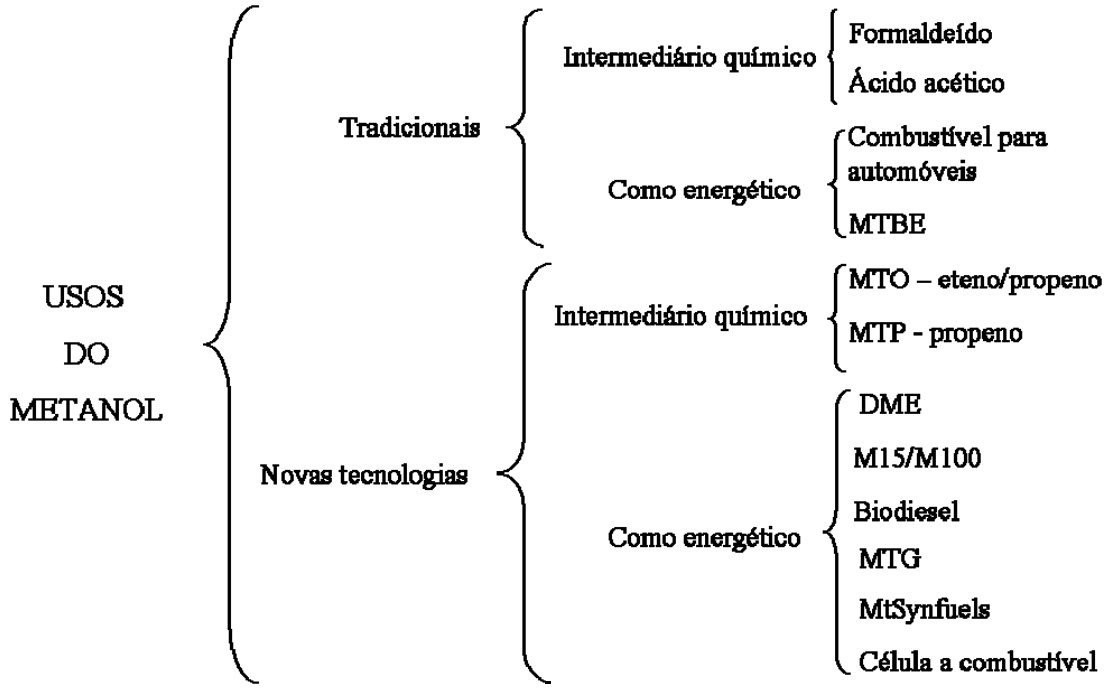


Figura 6.1: Aplicações do metanol – Fonte: Elaboração própria

As aplicações do metanol podem ser divididas em tradicionais e novas. As primeiras são as tecnologias maduras cujo crescimento se dará normalmente, de acordo com o aumento da demanda de seus derivados. Já as novas tecnologias são as que absorverão as demandas até agora inexploradas, principalmente na indústria da energia, o que lhe permite um grande desenvolvimento.

Dentro destes dois grandes grupos distinguem-se dois outros tipos de aplicação do metanol: na indústria da química orgânica e na indústria da energia, e dentro de cada um deles é mostrada cada uma das tecnologias separadamente.

As aplicações apresentadas na Figura 6.1 possuem potenciais de crescimento muito diferentes. Existem produtos em estado vegetativo, como o ácido acético e formaldeído, que continuarão com seu crescimento histórico. Outros são potencialmente decrescentes como o MTBE, devido ao seu banimento na mistura com gasolina, para a utilização em combustível de automóveis nos EUA. Há ainda as novas tecnologias, com tendência de grande crescimento, como: MTO (methanol to olefins), misturas combustíveis com metanol, DME e célula a combustível. Esses usos crescentes terão inúmeros desafios a serem transpostos e o sucesso dessa trajetória será imprescindível para a viabilização do metanol como *gateway*.

A seguir, as aplicações de metanol serão descritas, seguindo classificação baseada no seu potencial de crescimento, em:

- Aplicações com crescimento vegetativo
- Aplicações com crescimento decrescente
- Aplicações com grande potencial de crescimento

6.1) Aplicações com crescimento vegetativo

As aplicações com crescimento vegetativo se encontram nos produtos químicos produzidos a partir do metanol, principalmente formaldeído e ácido acético, cujas demandas percentuais podem ser vistas no Gráfico 6.1.

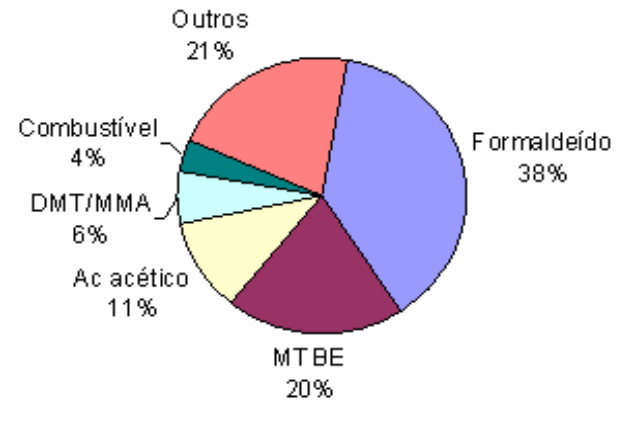


Gráfico 6.1: Demanda mundial de metanol por derivados - Fonte: Olah, 2006

6.1.1) Formaldeído

Formaldeído ou aldeído fórmico, conhecido também como formol, formalina, metanal ou aldeído metílico, é comercializado em solução aquosa, geralmente a 37%p/p, convenientemente estabilizada para evitar sua tendência à polimerização.

O formol é um líquido incolor, com cheiro sufocante, miscível em água, acetona, benzeno, clorofórmio, álcool e éter etílico. Suas principais aplicações *in natura* são:

- Componente de fertilizantes, fluídos para embalsamamento, biocidas, desinfetantes, antitranspirantes, desodorantes, corantes, tintas de impressão, adesivos, gelatinas e sucos.
- Preservador na borracha, acelerador no processo de vulcanização, inibidor da corrosão nos poços petrolíferos e em tratamento de couros.

Tem demanda muito superior na produção de derivados, aplicados preferencialmente nos setores da construção civil, automobilístico e fundição, sendo principalmente (ICIS, 2008e):

- Resinas: ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (PF), melamina-formaldeído (MF)
- Poliacetal polioximetilênico (POM)
- Polióis: Pentaeritritol, Trimetilolpropano (TMP), Neopentilglicol (NPG), e Trimetiloletano (TME)
- Hexametilenotetramina (HDTA), Metil di-p-fenileno isocianato (MDI), Paraformaldeído e 1,4 butanodiol (1,4 BDO)

O Gráfico 6.2 ilustra a distribuição das principais aplicações dos derivados do formaldeído, sendo a resina ureia-formaldeído a de maior contribuição, com 36%.

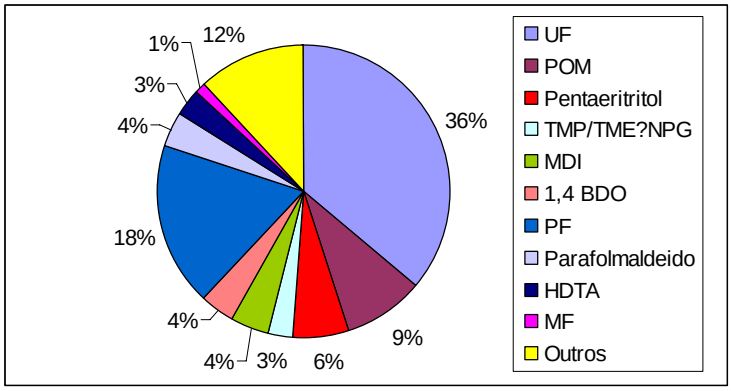


Gráfico 6.2 Distribuição das principais aplicações dos derivados do formaldeido - Fonte: MMSA, 2008a

Já o Gráfico 6.3 apresenta a distribuição do consumo mundial do formaldeído por região, e mostra a Ásia como seu maior consumidor, com 47% da demanda.

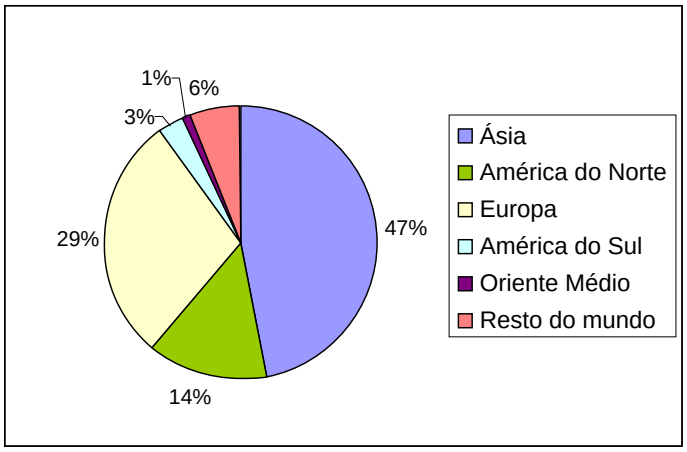


Gráfico 6.3: Distribuição do consumo mundial de formaldeído por região - Fonte: MMSA, 2008a

O formaldeído é produzido, comercialmente, a partir do metanol por dois principais processos industriais (REUSS *et alii*, 2003).

- Oxidação parcial e desidrogenação com ar, na presença de catalisador de prata metálico, vapor e excesso de metanol à temperatura de 680-720°C, conhecido como processo Basf tem 97-98% de conversão de metanol.
- Por oxidação com excesso de ar na presença de catalisador de óxido de ferro/molibdênio/vanádio modificado à temperatura de 250-400°C, é o processo Formox, que tem 98-99% de conversão de metanol.

A produção de formol em 2007 foi de aproximadamente 15 MMTA (milhões de toneladas/ano). Os três maiores mercados de formaldeído são China, Europa e EUA (Gráfico 6.3). Estão maduros nos EUA e Europa Ocidental com crescimento previsto de 1% e 2%, respectivamente. Em contraste, haverá aumento de demanda na Europa Oriental em 5%, na Rússia 7% e na China 7,5%, que em 2005 se tornou seu maior consumidor mundial com aproximadamente 7 MMTA (ICIS, 2008e).

6.1.2) Ácido acético

O ácido acético é um líquido higroscópico, que solidifica a 16,6ºC, incolor e de cheiro irritante (vinagre). É solúvel em água, etanol, éter, glicerina, acetona, benzeno e tetracloreto de carbono. É insolúvel em disulfeto de carbono. Ocupa dentro da química orgânica um lugar preponderante, semelhante ao lugar do ácido sulfúrico na indústria química pesada.

É utilizado principalmente:

- Na produção de produtos químicos como sais orgânicos e inorgânicos diversos, principalmente acetato de sódio e de vinila, anidrido acético, ácido tereftálico, ácido monocloro acético, perácidos e ésteres frutíferos.
- Na indústria têxtil e do couro, na extração de antibióticos, adesivos, lacas especiais para a indústria aeronáutica, filmes fotográficos, inseticidas e herbicidas.

A maioria dos processos comerciais atuais de produção de ácido acético adota o chamado processo Monsanto, que consiste na carbonilação do metanol com CO. A reação é catalisada com ródio/iodo à temperatura de 180°C e pressão de 30-40 atm, tendo 99% seletividade (KING E GRATE, 1985).

A demanda mundial de ácido acético em 2008 é estimada em 11 MMTA (CHEM WEEK, 2008), distribuídas pelas aplicações como mostra o Gráfico 6.4.

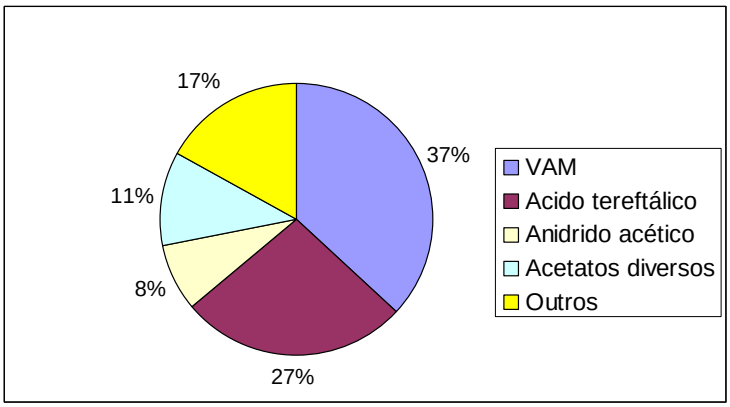


Gráfico 6.4: Distribuição percentual das aplicações de ácido acético - Fonte: MMSA, 2008b

O ácido acético tem maior uso na produção de monômero de acetato de vinila (VAM). Deverá ter crescimento de 3-4%, com forte contribuição de 8-10% da China, principalmente devido ao aumento do consumo de ácido tereftálico, usado na produção de poliéster (ICIS, 2008f). Essa alta taxa de crescimento na China nos últimos anos levou a Ásia a ser seu maior consumidor, como pode ser visto no Gráfico 6.5.

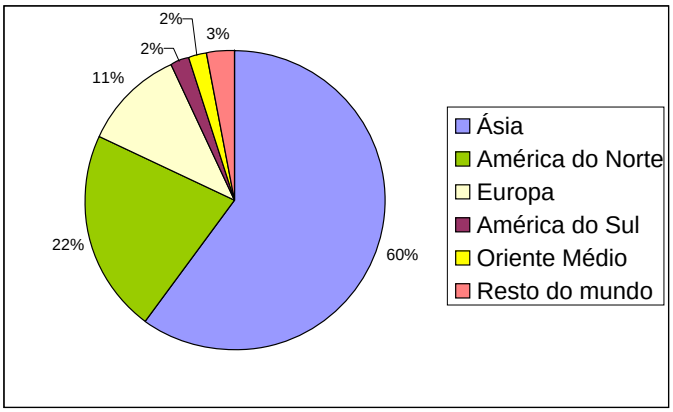


Gráfico 6.5: Distribuição do consumo mundial de ácido acético por região - Fonte: MMSA, 2008b

6.2) Aplicações com crescimento decrescente

As aplicações com crescimento decrescente se encontram no setor de combustível para automóveis: metanol puro (M100) e MTBE

6.2.1) M100

O metanol apresenta inúmeras propriedades que o fazem atrativo como alternativa à gasolina oriunda do petróleo. Possui baixo calor de vaporização[15], o que leva a uma temperatura de queima inferior à da gasolina. Isto resulta em menores emissões de CO, NOx e hidrocarbonetos, entretanto em maiores emissões de formaldeído. Em geral, o metanol puro só e utilizado como combustível em motores de alto desempenho, como carros de corrida e aviões. Esses motores sofrem modificações nos componentes de plástico e de borracha, no sistema de injeção e no pré-aquecimento do combustível para evitar degradação pelo contato metanol (FIEDLER *et alii*, 2003).

O metanol é mais corrosivo que a gasolina, mas é menos tóxico e não é carcinogênico. Foi usado em mistura com gasolina, nos EUA, até meados de 1980, quando o EPA proibiu o seu uso sem a presença de um cosolvente, devido à baixa solubilidade do metanol na gasolina, que provocava problemas de separação de fase.

Uma nova tentativa foi feita com M85, mistura de 85%v/v[16] de metanol com 15%v/v de gasolina, que é mais segura, pois produz a queima com chama colorida, enquanto a do metanol puro é incolor. Mas ainda apresentava dificuldades na partida a frio, devido à baixa concentração dos componentes leves da gasolina. Alguns automóveis foram produzidos com motores para rodar com M85, mas a escala não foi desenvolvida, o que provocou desconforto no consumidor, já que a demanda era pequena e havia poucos postos que vendessem esse produto (DAVENPORT *et alii*, 2002).

6.2.2) MTBE

O MTBE é o segundo mais importante derivado do metanol e, conforme o Gráfico 6.1, foi responsável por 20% de sua utilização em 2005. Está em declínio devido à proibição de sua utilização na mistura de combustíveis veiculares nos EUA.

---

[15] O calor de vaporização ou entalpia de vaporização é a quantidade de energia necessária para que um mol de um elemento ou de uma substância que se encontra em equilíbrio com o seu próprio vapor, à pressão de uma atmosfera, passe completamente para o estado gasoso.
[16] Unidade de concentração em porcentagem de volume/volume.

Sua participação teve queda para 16% do com sumo de metanol em 2007, aproximadamente 6,1 MMTA (METHANEX, 2008c).

Sua principal aplicação é como componente oxigenado na mistura com gasolina, devido a sua alta octanagem[17], e porque sua combustão produz menor quantidade de poluentes do ar. Possui ainda aplicações como intermediário na produção de isopreno e metacroleína, e também como desengraxante.

O MTBE é obtido a partir do isobuteno e metanol. A reação ocorre à temperatura de 30-100°C e pressão de 7-14 atm, em fase líquida, com catalisadores à base de zeólita ZSM-5 ou à base de resinas de troca iônica com macroporos de ácido sulfônico. Há necessidade de um excesso de metanol, para aumentar a conversão de isobuteno e inibir sua dimerização e oligomerização. Em condições ótimas o rendimento é de aproximadamente 90%. A tecnologia consiste em reação e separação e foi desenvolvida por empresas como: Snamprogetti and Hüls (atual Oxeno), Arco, IFP, CDTECH (ABB Lummus Crest e Chemical Research Licensing), Shell, Phillips Petroleum e Sumitomo. Em 2003 havia 140 plantas de MTBE instaladas no mundo com capacidade de aproximadamente 20 milhões de toneladas/ano (PETERS *et alii,* 2003).

Neste período a principal demanda de MTBE era nos EUA, aproximadamente 65%, devido ao aumento do consumo proveniente das exigências da Clean Air Act Amendments de 1990. O MTBE teve forte ataque em virtude do seu impacto ambiental, provocado por vazamentos dos tanques de estocagem que contaminaram os lençóis freáticos. Cogita-se também a contribuição de ações feitas pelos produtores de milho para sua substituição por etanol (METHANEX, 2008c).

O programa de substituição de MTBE por etanol iniciou-se na Califórnia (EUA) e alcançou todos os EUA em 2007, quando segundo a Methanex, não houve mais venda do produto para o uso em misturas de combustíveis veiculares (METHANEX, 2008c). Tal fato provocou uma eliminação de 9,0 MMT de MTBE, equivalente a 3,0 MMT (milhões de toneladas) de metanol, se comparado ao pico de 2000.

---

[17] Octanagem é o índice de resistência à detonação, que quanto maior é melhor para a gasolina. O índice faz relação de equivalência à resistência de detonação de uma mistura percentual de isoctano (2,2,4 trimetilpentano) e n-heptano. Assim, uma gasolina de octanagem 87 apresenta resistência de detonação equivalente a uma mistura de 87% de isoctano e 13% de n-heptano. Entretanto, são possíveis valores superiores a 100 para a octanagem. Uma gasolina com octanagem 120 apresentará na mesma escala uma resistência 20% superior à do isoctano.

Na Europa há um programa de incentivos fiscais para sua substituição por biocombustíveis, principalmente etanol, que provocará uma perda de 1,8 milhões de metros cúbicos de MTBE, equivalente a 600 mil toneladas métricas de metanol, se também comparado ao pico de 2000 (CMAI, 2006). Segundo ICIS, 2008e, há previsão de participação de 5,75% de etanol biocombustível na matriz dos combustíveis veiculares em 2010.

Também na Europa, concluiu-se que não há riscos à saúde humana com o MTBE e sua demanda cresceu até 2005, com a sua utilização na substituição de aromáticos nos combustíveis veiculares. Houve limitação da concentração de aromáticos na gasolina, que passou a ser de 35-42% , em 2005. Atualmente a demanda começa a cair, devido a sua substituição por etil tercbutil éter (ETBE). Esse novo produto está sendo produzido alternativamente ao MTBE e também conta com incentivos fiscais (METHANEX, 2008c). Na América do Sul, unidades de produção de MBTE estão sendo convertidas para obtenção de ETBE, a ser exportado para Europa (ICIS, 2008g).

A demanda de MTBE crescerá em algumas regiões principalmente na Europa Oriental, Índia e Ásia, que terá 30% do seu consumo em 2011. Apesar disto, o consumo global deverá cair a taxas de aproximadamente 8% ao ano entre 2007-2011, devido ao forte impacto de sua substituição nos EUA (ICIS, 2008g).

6.3) Aplicações com grande potencial de crescimento

As aplicações com grande potencial de crescimento têm origem nas novas tecnologias. São processos em desenvolvimento ou início de implantação com potencial de futura grande demanda. Encontram-se presentes como intermediário químico na produção de eteno e propeno, assim como em energéticos como DME, produção de hidrocarbonetos, misturas e célula a combustível e biodiesel.

6.3.1) Produção de eteno e propeno

Existem duas rotas de produção de olefinas leves sendo desenvolvidas a partir do metanol, a MTO – Methanol to Olefins e a MTP - Metanol to Propylene.

No caso de MTO, existem duas tecnologias a serem licenciadas atualmente no mercado internacional, ambas baseadas em reatores de leito fluidizado, similares

aos utilizados no processo de FCC (Fluid Catalytic Cracking) no refino do petróleo. A primeira da UOP (Universal Oil Products)/Hydro Norsk, sendo a UOP líder em tecnologia de desenvolvimento e comercialização (licenciamento) de processos de refino e petroquímicos. A segunda da ExxonMobil, uma das maiores empresas produtoras de olefinas no mundo.

A MTP vem sendo implementada e licenciada pela Lurgi, empresa especialista em desenvolvimento de tecnologias para a química e petroquímica.

6.3.1.1) Tecnologia MTO

Os processos comerciais utilizam um reator de leito catalítico fluidizado, cujas condições operacionais podem ser ajustadas de acordo com as necessidades requeridas dos produtos, sendo o catalisador extremamente seletivo para produção de eteno e propeno. São obtidos como coprodutos, em pequenas quantidades, parafinas C1-C3 e C4+, hidrogênio, CO e CO2, assim como oxigenados pesados em concentrações de ppm (parte por milhão), removidos para garantir as especificações dos produtos. A conversão de metanol em eteno e propeno tem de 75-80% de seletividade de carbono e a razão entre etileno e propileno pode variar de 0,50 a 1,50 (CHEN *et alii*, 2005).

Durante os anos 1980, a Mobil produziu em Montonui, Nova Zelândia, um novo processo que convertia metanol em gasolina. A chave para esse processo era o uso de forma seletiva do catalisador zeolítico ZSM-5. A ExxonMobil então observou que, modificando as condições de reação, seria produzida uma quantidade substancial de olefinas leves. Essa descoberta levou ao desenvolvimento de um processo de conversão intencional de metanol em olefinas (SPITZ, 1988).

Logo após esta inovação, a Union Carbide desenvolveu um novo catalisador, silico-alumino-fosfato - o SAPO-34, que possuía maior seletividade e sua tecnologia foi transferida para UOP em 1988.

Portanto, a principal diferença entre as tecnologias da UOP/Hydro Norsk e ExxonMobil está na catálise. Ambas se baseiam em catalisadores com sítios ácidos, sendo a primeira com um especificamente desenhado para este fim os SAPO - 34 (silicato-alumino-fosfatos) e a segunda com a tradicional zeólita, alumino silicato, ZSM-5 utilizada largamente em FCCs de refinarias de petróleo. A Figura 6.2 mostra as diferenças entre os tamanhos dos poros dos dois catalisadores, o que dá uma

melhor seletividade e consequentemente produtividade no processo de MTO para a SAPO-34.

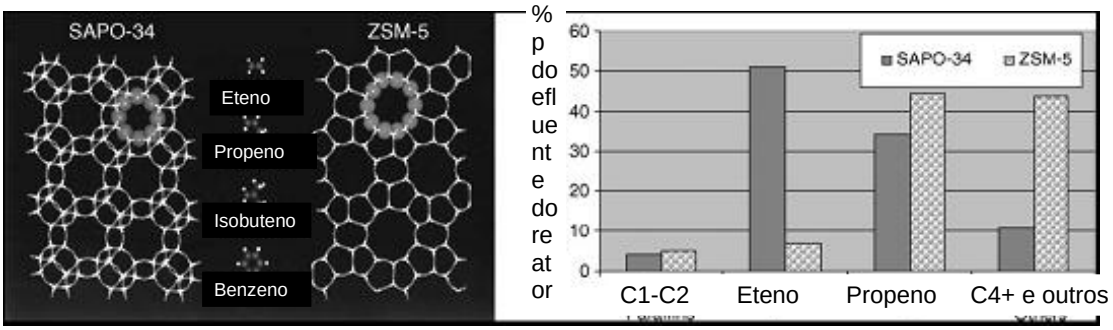


Figura 6.2 – Comparação entre SAPO-34 e ZSM-5 quanto a tamanho dos poros e produtividade para MTO – Fonte: Chen *et alii*, 2005

‘ O processo UOP pode ser operado nos modos de alto rendimento de eteno ou de propeno, cujos valores típicos são apresentados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1: Composição típica dos produtos de FCC operados nos modos de alto rendimento de eteno ou de propeno - Fonte: UOP, 2008a

Produtos	**Modo alto eteno**	**Modo alto propeno**
Eteno	0, 57	0,43
Propeno	0,43	0,57
C4=+	0,19	0,28
Razão C3=/C2=	0,77	1,33

Um fluxograma simplificado do processo da UOP é apresentado na Figura 6.3.

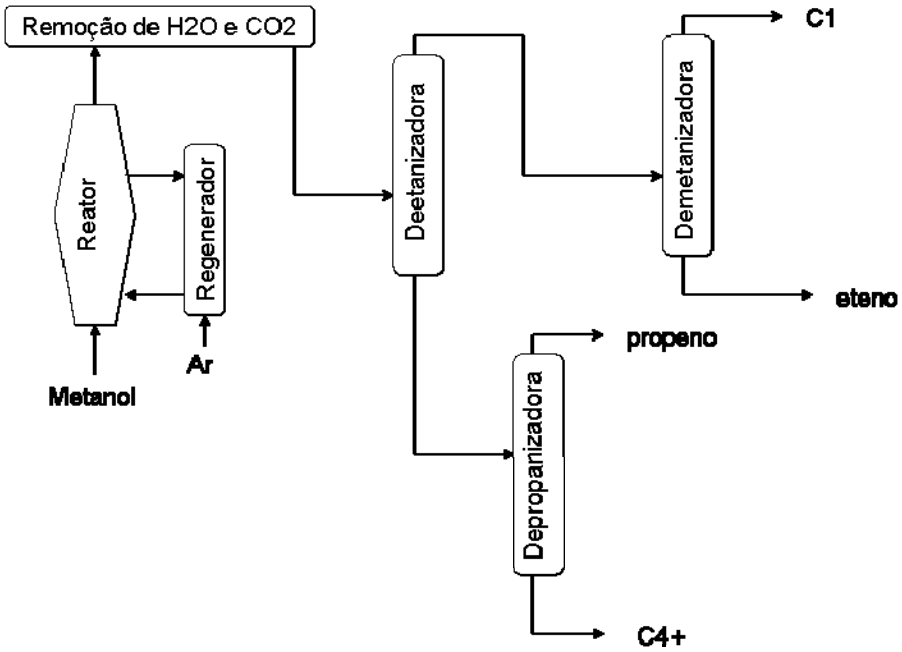


Figura 6.3: Fluxograma simplificado do processo MTO - Fonte: Adaptado de UOP, 2008a

Um dos problemas com o processo MTO, para produção de olefinas, é que mesmo que a reação se processe com 100% de rendimento de olefinas, 56% do produto total é água.

Observa-se que no depropanizador da Figura 6.3 há produção de C4+, uma fração olefínica. O processo, apresentado em 2000 pela Atofina/UOP, aproveita essa fração como matéria-prima para um craqueador de olefinas (Olefin cracking – OC), aumentando a seletividade de carbono do processo em relação à produção de eteno e propeno. Os produtos saem com razão de 3,5-4,0 propeno/eteno. O reator opera em temperaturas de 500-600ºC e pressões de 1-5 bar. Há conversão de 80-90% das olefinas pesadas em principalmente propeno e eteno de alta pureza (90%), que facilita a purificação para atender as especificações.

No craqueamento de olefinas utiliza-se um reator de leito fixo, com catalisador à base de zeólitas, com alta acidez e tamanho de poro grande. Há regeneração contínua do catalisador devido à existência permanente de um reator em stand by. (UOP, 2008b). A Figura 6.4 apresenta o fluxograma simplificado da integração MTO/OC.

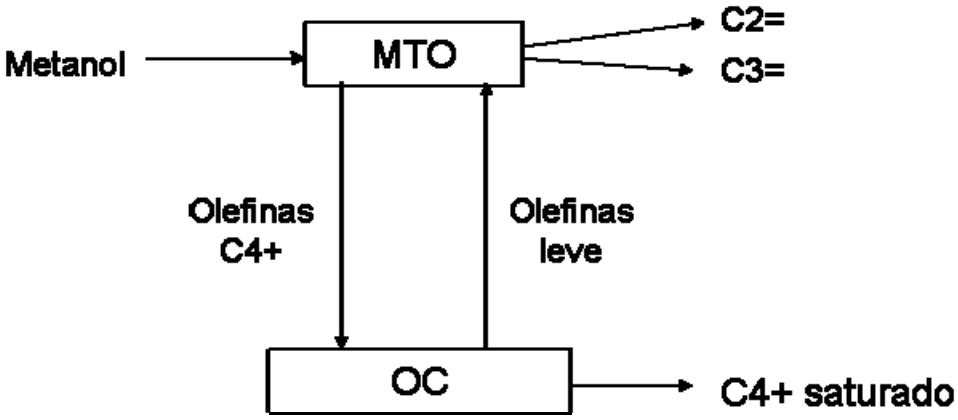


Figura 6.4: Fluxograma simplificado da integração MTO/OC - Fonte: Adaptado de UOP, 2008b

O processo combinado tem grande flexibilidade em proporcionar produtos com uma faixa de razões de propeno/eteno acima de 1,75. Além disso, uma redução de 80% na formação de C4+ como subproduto e aumento de 20% do rendimento de olefinas leves podem ser alcançadas. A seção de recuperação da unidade de MTO permanece inalterada, exceto se tiver que ser dimensionada para acomodar a demanda da unidade de craqueamento da olefina. O desenvolvimento contínuo tem levado a um catalisador MTO com performance cada vez melhor, oferecendo maior flexibilidade para alcançar maior produção de propeno. O catalisador otimizado em combinação com a boa integração MTO/OC pode produzir razões propeno/eteno acima de 2,0.

Comparando-se com a reforma a vapor do GN, este processo fornece excepcional valor para conversão de metano, mínima produção de subprodutos (o que resulta em uma simplificada seção de recuperação) e flexibilidade na mudança da razão dos produtos, propeno e eteno. Enquanto a reforma fornece uma razão praticamente fixa de 2:1 eteno/propeno, o craqueamento do metanol pode fornecer de 1:0,7 até 1:2 eteno/propeno, o que vai ao encontro da maior taxa de crescimento de demanda mundial do propeno (CHEN *et alii*, 2005). A difusão do processo MTO será discutida em conjunto com a de MTP no item 6.3.1.2.

6.3.1.2) Tecnologia MTP

Na rota metanol para propeno, o metanol é inicialmente convertido em DME e água, no pré-reator de DME. O DME segue então para os reatores de MTP, que são de leito fixo, com catalisador a base de zeólitas. O efluente do reator MTP é

resfriado e separado em uma corrente gasosa, uma líquida orgânica e água. Não há produção de eteno. Após compressão dos gases, traços de água, CO2 e DME são retirados e o propeno já se encontra em grau químico, ou seja, com 97% de pureza. A grande quantidade de água produzida pode ser utilizada no processo em irrigação ou transformada em água potável por tratamento de custo elevado. A natural deposição de coque sobre o catalisador é fundamental na síntese de olefinas, pois evita a ocorrência de reações laterais indesejáveis. Há três reatores, dois estão sempre operando, enquanto um está em regeneração do catalisador ou em *stand by*. Após um ciclo de 600-700 horas de operação, o catalisador deve ser regenerado, com a queima do coque por injeção de mistura de ar (LURGI, 2008b).

A China é o país com maior investimento nas tecnologias MTO e MTP, partindo principalmente do carvão, como pode ser visto no Quadro 6.2. Tal quadro foi obtido através do estudo da Tecno Orbichem, em 2007, que lista os projetos em construção. Neste trabalho encontram-se hiatos quanto às capacidades produtivas de algumas plantas e ao estágio de evolução das construções. Foram sanados através de pesquisa que usou como palavra-chave o nome da empresa.

Quadro 6.2: Demanda de metanol para projetos de MTO e MTP previstos e em construção na China - Fonte: Adaptado de Tecno Orbichem, 2007

Empresa	Qt. Metanol (MTA)	Processo	Matéria-Prima	Estágio
Sinopec Dazhou	800	MTO	GN	em construção
Daqing Petrochemical Daqing, Heilongjiang	600	MTO	GN	em construção
Xinjiang Guanghui Industry Co.	700	MTO	Carvão e GN	Start up 2011
Shenghua Ningxia Coal Group Ningdong	520	MTP	Carvão	Start up 2009
Henan Rongxing Industrial Henan	1500	MTP	Carvão	Start up 2008
Huating Coal Group Gansu	600	MTP	Carvão	em construção
Datang International Power Generation	1700	MTP	Carvão	Start up 2009
GAIL/Shaanxi Huashan Chemical Industry	600	MTO	Carvão	Start up 2008
Zhonghua Yiye Energy Investment Yulin	600	MTO	Carvão	em construção
Shaanxi CNCEC Yiye Energy Investment Co.	800	MTO	Carvão	em construção
Zhongyi Group Erdos	600	MTO	Carvão	em construção
Shenhua Group Yulin, Shaanxi	1.000	MTO	Carvão	em construção
Shenhua Group Coal-based Olefin Co	600	MTO	Carvão	Start up 2011
Shaanxi Xinxing Coal & Olefins	200	MTO	Carvão	Start up 2010
Hebei Jinneng/Jiantao Group/Xingtai Government	500	MTO	Carvão	Star up 2010
TOTAL	**11.320**			

O Quadro 6.2 mostra que os projetos em construção na China vão agregar 11.320 MTA à capacidade produtiva mundial de metanol, sendo 7000 MTA através de MTO e 4.320 MTA por MTP até 2011.

Observa-se que a maioria das unidades possui escalas médias de 500-600 MTA, sendo que essa capacidade é citada como a primeira fase do projeto em muitas delas.

Recentemente foi anunciada a primeira planta em escala comercial do processo MTO/OC da UOP/Hydro Norsk/Atofina, fora da China. Está sendo construída em Lagos, na Nigéria, pela Viva Methanol, subsidiária da Eurochem. Produzirá 3.400 MTA de metanol, tendo como matéria-prima o gás natural, e será a maior unidade no mundo de produção de metanol, a partir de 2012 (REUTERS, 2008).

Rússia, Azerbaijão e Cazaquistão, além de diferentes países localizados no Oriente Médio e norte da África, estudam a possibilidade de utilização de MTO/MTP para adicionar valor à grande reserva de gás natural por eles possuída (ICIS, 2008h).

Considerando-se todos esses projetos que estão sendo executados, vê-se que as novas tecnologias MTO e MTP terão grande participação na produção de metanol. Apenas essas primeiras unidades em construção vão contribuir com um aumento de aproximadamente 15.000 MTA, o que corresponde a 37,5% da demanda mundial de 2007.

6.3.2) DME

A primeira aplicação do DME conhecida foi como aerossol. A produção comercial foi iniciada em 1966 pela Akzo Nobel, sendo empregado em spray para cabelos, na França, e em odorizador de ar, na Holanda. Tal aplicação é favorecida devido à propriedade do DME se liquefazer a pressões relativamente baixas, e ao fato desse produto não ser um composto carcinogênico e mutagênico, sendo assim considerado pouco ofensivo à saúde humana. Em 1995, após vários estudos, o uso de DME como combustível em motores a diesel e os seus benefícios ambientais foram apresentados no *SAE Congress* (FLEISCH, 2002).

As propriedades físico-químicas do DME e de alguns combustíveis são mostradas no Quadro 6.3. A comparação entre os compostos listados mostra que o DME possui propriedades semelhantes às do propano, tais como o valor da pressão de vapor saturado e densidade em fase de vapor. Essas semelhanças explicam o

fato de o DME ser considerado o possível substituto do gás liquefeito de petróleo (GLP), pois o propano é o seu principal constituinte.

Quadro 6.3: Propriedades físico-químicas de alguns combustíveis - Fonte: Adaptado de INT, 2005

PROPRIEDADES	DME	PROPANO	METANO	METANOL	ÓLEO DIESEL
Temperatura de ebulição (°C)	- 25,1	- 42	- 161,5	64,6	180 – 370
Densidade (fase líquida, g/cm^3 20 °C)	0,67	0,49	0,42	0,79	0,84
Densidade (fase gasosa, relativa ao ar)	1,59	1,52	0,55	-	-
Pressão de vapor saturado (atm, 25 °C)	6,1	9,3	246	-	-
Temperatura de ignição (°C)	235	470	650	450	250
Limite de explosividade (%)	3,4 - 17	2,1 – 9,4	5 - 15	5,5 – 36	0,6 – 6,5
Índice de cetana	55 - 60	5	0	5	40 – 55
Capacidade calorífica (kcal/Nm^3)	14.200	21.800	8.600	-	-
Capacidade calorífica (kcal/kg)	6.900	11.100	12.000	4.800	10.000

Outra semelhança que deve ser destacada são os valores do índice de cetana[18], observados no DME e no óleo diesel. Embora os valores do índice de cetana para o DME sejam ligeiramente superiores, e sua temperatura de ignição inferior, sua aplicação como potencial combustível para motores do ciclo diesel também está sendo desenvolvida. A principal vantagem da substituição do diesel pelo DME é em relação às emissões. O DME não contém enxofre e as emissões de materiais particulados, em motores que o utilizam, são reduzidas, devido ao fato da sua estrutura molecular não apresentar ligações carbono-carbono (INT, 2005).

O potencial uso combustível de DME em termoelétricas é identificado em alguns países asiáticos, como Coreia do Sul e China (FERREIRA E SANTOS, 2006). A energia elétrica pode ser produzida a partir do calor gerado durante a combustão do DME em turbinas a gás. Por se tratar de um combustível gasoso, a geração de

[18] O desempenho do combustível (diesel, GLP ou DME) é comparado com o desempenho do volumétrico de cetano e alfametilnaftaleno. Ao n-hexadecano puro, produto parafínico comercializado como cetano, é atribuído um número de cetano igual a 100 e a um produto aromático (alfa metil-naftaleno) é atribuído um número de cetano igual a zero. Nos motores de ciclo diesel, o combustível de melhor desempenho será o de maior índice de cetana.

energia é mais eficiente, e tratamentos posteriores de resíduos sólidos não são necessários, como exigidos quando se usa o carvão devido à geração de cinzas.

A Rússia avalia possibilidades de utilização de suas vastas reservas de gás natural *stranded*. Entre as possibilidades identificadas está a liquefação do GN (GNL) e a fabricação de combustíveis líquidos (GTL ou DME), uma vez que a instalação de novas tubulações e estações de compressão é extremamente elevada (INT, 2005).

Além das aplicações energéticas potenciais, o DME também é um insumo importante na indústria química, devido à possibilidade de sintetizar formaldeído e olefinas (propeno em especial).

A produção de DME conta atualmente com duas principais rotas tecnológicas para sua obtenção: rota convencional (que realiza a desidratação do metanol) e a rota de síntese direta.

A rota convencional se dá através da desidratação do metanol originando DME e água. O DME produzido entra numa coluna de destilação onde ocorre a sua separação do metanol. O metanol, por sua vez, é enviado a uma segunda coluna de destilação para remoção da água e é reciclado para a entrada do reator de síntese de DME. A Figura 6.5 mostra um diagrama simplificado.

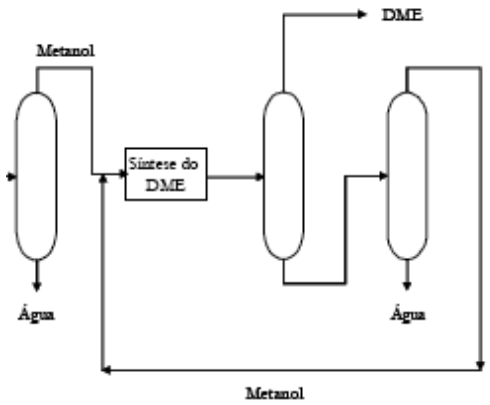


Figura 6.5: Diagrama simplificado da produção de DME pela rota convencional - Fonte: Adaptado de INT, 2005

A rota de síntese direta corre em uma única etapa, onde o gás de síntese é transformado em metanol e posteriormente em DME, em um mesmo reator, com a utilização de catalisadores bifuncionais ou mistura de catalisadores. Tais catalisadores devem apresentar características hidrogenantes, que permitam a síntese do metanol, e ainda características desidratantes, responsáveis pela

formação do DME (OLIVEIRA, 2005). Este processo é concorrente ao foco deste trabalho, pois não produz metanol, porém apresenta desvantagens, que dificultam sua atual utilização. Não aproveita as economias de escala conseguidas nas plantas de 1700 – 3400 MTA para o metanol, pois de acordo com a JFE, empresa que vem investindo nesta tecnologia de forma expressiva, poderá alcançar escala máxima de aproximadamente 1000 MTA (OHNO, 2007). Apresenta ainda menor flexibilidade devido aos inúmeros usos atuais do metanol na química e na energia.

Existe ainda em estágio inicial de pesquisa, a busca de uma terceira rota, considerando a catálise efetivamente direta, na qual o gás natural seria convertido em DME sem passar por gás de síntese. Esta rota é conhecida como rota de catálise direta (INT,2005).

A capacidade produtiva mundial de DME é apresentada no Quadro 6.4. Vale destacar que a principal aplicação de DME, na maioria das empresas identificadas, está voltada para seu uso como propelente em aerossóis, o que justifica as escalas produtivas consideradas pequenas.

Quadro 6.4: Capacidade mundial instalada de produção de DME em 2006 - Fonte: Niemeyer, 2007

EMPRESA	PAÍS	CAPACIDADE (toneladas/ano)
AKZO Nobel [1]	Holanda	10.000
Indisponível [1]	Austrália	10.000
Du Pont [1]	EUA	15.000
Hamburg DME Co [1]	Alemanha	10.000
Indisponível [1]	Taiwan	15.000
Mitsubishi Gas Chemical , Sumitomo [1]	Japão	10.000
Shell/ RWE [1]	Alemanha	60.000
Luthianhua Group Inc / TEC [2]	China	10.000
Shanghai Coking Company [2]	China	5.000 *
Shandong Jiutai Chemical Industry [2]	China	130.000 *
Xinao Group [2]	China	10.000 *

[1] Extraído de du Bourg, 2006.

[2] Extraído de Huang, 2006.

* Plantas para produção de DME com uso combustível.

Recentemente, o mercado de DME voltado para aplicações energéticas observou o aparecimento de projetos e plantas produtivas na Ásia, em especial na China e Japão, respectivamente Luthianhua (2003) e Shanghai (2006) e Kushiro (2002).

A primeira planta mundial para produção comercial de DME com fins energéticos iniciou sua operação em setembro de 2003, com capacidade de 10.000 T/ano na China, licenciada pela TEC e pelo grupo chinês Luthianhua (FERREIRA E SANTOS, 2006). Em abril de 2006, a empresa Shanghai Coking Company iniciou a produção de 5.000 T/ano de DME, para demonstração do seu uso como combustível em ônibus (HUANG, 2006). O processo de desenvolvimento tecnológico da JFE iniciou-se em 1989, com testes de escala laboratorial (produção de 1kg/dia), em seguida, em 1994, os testes passaram a escala de bancada com produção de 50 kg/dia. Em 1997, foi a vez da planta piloto de DME, com produção de 5 T/dia, e em 2002 iniciaram-se as operações da unidade de demonstração em Kushiro (Japão), com a produção de 100 T/dia. As escalas evoluíram e já há construção de plantas de metanol com *single train* de 5000 T/dia, que gerarão 3500 TD de DME (DU BOURG, 2006).

As expectativas de crescimento do mercado de DME, voltado para uso combustível, são reforçadas pelo crescente número de projetos anunciados. O Quadro 6.5 apresenta a empresa ou fornecedora de tecnologia responsável pelo projeto, localização, capacidade divulgada e o ano de entrada em operação.

Quadro 6.5: Projetos anunciados para a produção de DME no mundo - Fonte: Niemeyer, 2007

EMPRESA	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE (toneladas/ano)	ANO
Luthianhua / TEC	China	110.000	2006
Hubei Biocause	China	100.000	2007
Hubei Zhongjie	China	100.000	2007
Shanxi Lanhua	China	100.000	2007
Yuanann	China	150.000	2007
Jiutai	China	100.000	2008
Lurgi	Oriente Médio	269.000	2008
Shandong Jiutai	China	150.000	2008
Shenhua	China	830.000	2008
Zagros / HTAS	Irã	800.000	2008
Lurgi	China	1.180.000	2009
Lurgi	China	1.180.000	2009
Xinao Group	China	400.000	2009
Yankuang	China	200.000	2009
Shandong	China	1.000.000	2010
Indisponível	Japão	2.000.000*	2010
Lurgi	América Latina	1.180.000	2010
Sinopec	China	3.000.000	2010

* Consórcio de 3 empresas (Fleisch, 2006).

É interessante observar o número considerável de projetos em DME localizados na China. As razões para o crescente interesse da China e outros países asiáticos na produção e utilização de DME são atribuídas principalmente à disponibilidade de matéria-prima na região, fatores econômicos e ambientais (NIEMEYER, 2007). O interesse da China na produção de DME é fortemente influenciado pelo aproveitamento das reservas de carvão existentes em sua matriz energética, assim como pela obtenção de uma alternativa energética para o GLP (usos doméstico e industrial). No caso da Coreia do Sul e Japão, onde não existe matéria-prima disponível para produção de DME, o interesse é pela alternativa energética possibilitada, de forma a garantir a segurança de abastecimento de GLP e diesel, essencialmente.

Observa-se, então, que o principal interesse dos países asiáticos, no uso de DME como combustível, está na redução da dependência de importação de GLP para consumo doméstico e de diesel, acompanhado pela farta existência de matéria-prima (carvão) em sua matriz energética (HUANG, 2006), e ainda pela disponibilidade de metanol (cerca de 11 MMTA), originada pelos aumentos recentes de capacidade produtiva na região (WEIDOU *et alii*, 2006).

A preocupação ambiental com os níveis de emissão de materiais particulados oriundos de automóveis, ônibus e caminhões, também desperta a motivação nos estudos sobre o tema, em especial por conta das previsões crescentes da população de veículos (HUANG, 2006).

É estimado que o primeiro grande mercado para DME seja o sudeste asiático em países como Japão, China, Coreia do Sul, Índia e Taiwan, com demanda potencial de 105 MMTA de metanol (TRINIDAD E TOBAGO NEWS, 2007). A Methanex numa apresentação para acionistas, em junho de 2008, previu que esse volume será de 20 MMTA em 2012 (METHANEX, 2008a).

6.3.3) Misturas M15/M100

As M15/M100 são misturas de gasolina com metanol, contendo de 15 a 100%v/v do álcool, utilizadas como combustível na substituição da gasolina pura. Esta tecnologia foi introduzida em cidades na China como Shanghai / Jiangsu e tem um potencial total de aproximadamente 70 MMTA na região (METHANEX, 2007).

Possui previsão de sua utilização em 10% do volume de combustíveis veiculares em 2012, o equivalente a 10 MMTA (METHANEX, 2008a).

O Methanol Institute, após visita a várias regiões da China, observou que a concentração de metanol varia bastante e a tendência é a utilização de M-85 a M-100 em táxis e ônibus, e a M-15 em automóveis e outros veículos (METHANOL INSTITUTE, 2008a).

Uma das maiores dificuldades na aplicação desta tecnologia está na estabilização da mistura numa fase líquida homogênea, sendo a inclusão do etanol, como cosolvente, a alternativa mais viável, pois além de resolver a separação de fases possibilita aumento da concentração do metanol na mistura (QI *et alii*, 2005).

6.3.4) Biodiesel

Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como: craqueamento, esterificação ou transesterificação. Pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais. Existem dezenas de espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como: soja, mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim e pinhão manso, dentre outras. O biodiesel substitui total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores ciclo diesel automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis, entre outros) ou estacionários (geradores de eletricidade e calor), sem necessidade de alterações no motor. Pode ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções. A mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de B2 (atualmente utilizada no Brasil) e assim, sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100.

Os óleos e gorduras são formados de moléculas com três ésteres, ligados a uma molécula de glicerina, o que faz deles triglicerídios. A transesterificação é o processo mais utilizado atualmente para a produção de biodiesel. Consiste numa reação química entre óleos vegetais ou gorduras animais e metanol ou etanol, que substitui a glicerina pelo álcool, dando origem a monoésteres, que são o biodiesel (OLIVEIRA, 2007), como pode ser visto na Figura 6.6.

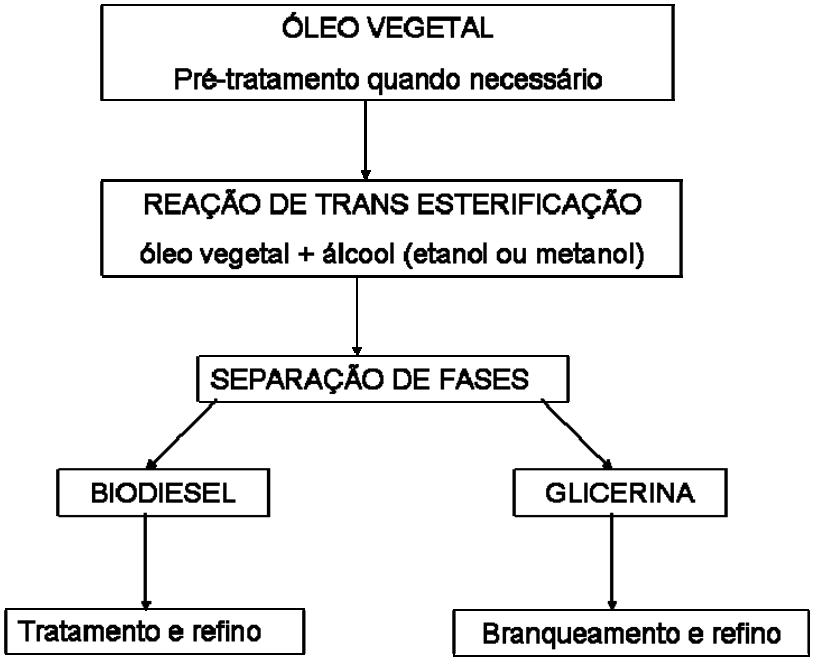


Figura 6.6: Fluxograma simplificado de produção de biodiesel - Fonte: Adaptado de Biodiesel Brasil, 2008

Além da glicerina, a cadeia produtiva do biodiesel gera uma série de outros coprodutos (torta, farelo etc.), que podem agregar valor e se constituir em outras fontes de renda importantes para os produtores.

O biodiesel apresenta vantagens sobre o diesel, pois é de uma fonte renovável, é um ótimo lubrificante e pode aumentar a vida útil do motor. Tem fácil transporte e fácil armazenamento, devido ao seu menor risco de explosão. Seu uso como combustível proporciona ganho ambiental, pois sua combustão gera menos CO2, o que colabora para diminuir a poluição e o efeito estufa. Uma das principais desvantagens é a produção de glicerina que é muito superior à demanda, mas já existem esforços em pesquisas para seu aproveitamento (BIODIESEL, 2007).

O mercado mundial de biodiesel poderá passar por um bom crescimento nos próximos 10 anos. A Europa representa atualmente 90% do consumo e produção, mas o EUA possui taxa de crescimento de produção mais acentuada. Contudo, é esperado que o Brasil ultrapasse EUA e Europa até 2015. É possível que o biodiesel represente aproximadamente 20% do diesel total utilizado no Brasil, Europa e China se as políticas governamentais continuarem agressivas. O mercado de biodiesel nos EUA cresceu dez vezes de 2004 a 2006, passando de 25 milhões de galões por ano, em 2004, para 250 milhões de galões por ano, em 2006, e há

cinquenta novas plantas em construção para entrar em operação (THURMOND, 2007)

Cada metro cúbico de biodiesel produzido exige 300 litros de metanol (Oliveira, 2008). Estima-se que o biodiesel em 2011 exigirá uma demanda de aproximadamente 2,7 MMTA de metanol para sua fabricação, restituindo no consumo mundial o que foi perdido pelo MTBE nos anos 2005-2006 nos EUA (METHANEX, 2008c).

Alan Bullion, vice-editor do Relatório Mundial de Álcool e Biocombustíveis da F.O. Licht, proferiu palestra no 4° Biodiesel Congress, realizado em São Paulo em agosto de 2008, cujo conteúdo agregou as seguintes contribuições para este trabalho (EWING, 2008):

- A produção global de biodiesel deve crescer de 10% a 12% ao ano em relação aos cerca de 10 bilhões de litros, produzidos em 2007. A Europa responde por cerca de 66% da produção total, com 6,5 bilhões de litros, seguida pelos Estados Unidos com 1,5 bilhão de litros. Argentina e Brasil produziram 500 milhões de litros em 2008. Até 2012, a estimativa de produção de biodiesel é de 8 bilhões de litros nos EUA e 15 a 16 bilhões de litros na Europa.
- Os preços para matérias-primas como soja, canola e palma devem se estabilizar nos próximos dois anos já que o plantio vai se igualar à demanda. O óleo de soja continua a dominar o mercado, respondendo por 58 por cento de toda a produção de biodiesel no mundo. Estão em construção, na Comunidade Europeia, 58 usinas de biodiesel, e 62 nos EUA. Cinco estão sendo construídas na Argentina e 15 no Brasil.

Entretanto, a necessidade de extensas áreas para plantações já é, intensamente, colocada como empecilho para o desenvolvimento desta tecnologia, devido a sua concorrência com a também grande área exigida para a obtenção de gêneros alimentícios. Nos dois últimos anos a soja sofreu um aumento de preço de 130%, cuja responsabilidade já é creditada à ainda pequena produção mundial de biodiesel. Essa disputa provocará o aumento do custo da biomassa que poderá inviabilizar a produção maciça de biodiesel.

Os combustíveis possuem demanda muito maior que os produtos químicos, portanto suas previsões otimistas ou pessimistas de crescimento têm grande interferência no consumo mundial de metanol. O Gráfico 6.6 apresenta uma previsão conservadora da CMAI, avaliando em 4,5% a taxa de crescimento anual da

demanda e uma taxa mais otimista da Methanex que, em função do emergente mercado de combustíveis na Ásia, projeta uma evolução superior à da CMAI em 10%, até 2012.

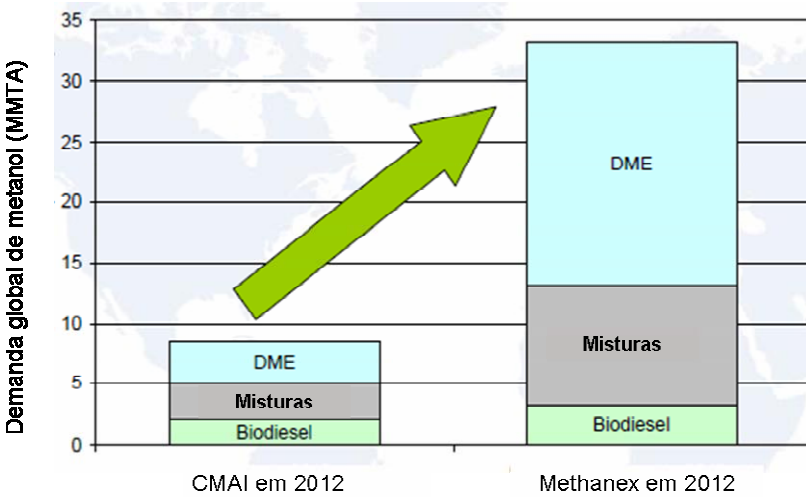


Gráfico 6.6: Evolução mundial da demanda de metanol para produção de combustíveis - Fonte: Methanex, 2007

Observando os projetos em construção em DME, misturas combustíveis e biodiesel, vemos que a evolução da demanda de metanol é mais próxima da previsão da Methanex, que foi a adotada nos itens subsequentes deste trabalho.

6.3.5) Produção de hidrocarbonetos combustíveis

6.3.5.1) MTG

O processo de produção de gasolina via metanol foi desenvolvido pela Mobil Oil Corporation. Ocorre em dois passos, inicialmente o metanol (17%v/v em água) é superaquecido a 300°C, e sofre desidratação parcial, com catalisador de alumina, a 27 atm, para obtenção de mistura de metanol, DME e água. Este efluente é misturado com gás de síntese reciclado aquecido, e introduzido em reator, que contém ZSM-5 como catalisador, a 350-366°C e 19-23 atm, produzindo hidrocarbonetos (44%) e água (56%) (HANCOCK, 1985).

Devido à necessidade de regeneração da ZSM-5, em função do coque formado durante a reação e nele depositado, são utilizados reatores múltiplos, em paralelo, para que a regeneração não gere paradas do processo produtivo (KAM *et alii*, 1984). A seletividade para hidrocarbonetos na faixa da gasolina é de 85%,

sendo o restante principalmente GLP. A gasolina produzida tem alta octanagem, pois aproximadamente 40% são de hidrocarbonetos aromáticos, com a seguinte constituição típica: 4% benzeno, 26% tolueno, 2% etillbenzeno, 43% xilenos, 14% benzenos trimetilados, mais 12% de outros (WENDER 1996). A legislação Clean Air Act Amendments, de 1990, da Califórnia (EUA) impôs um limite máximo de 25% de aromáticos totais na formulação final da gasolina, o que acarreta uma desvantagem na gasolina de MTG, que possui 40% deles (OWEN E COLEY, 1995).

A primeira planta comercial de MTG foi construída em 1985 na Nova Zelândia, e produziu metanol e gasolina de alta octanagem, a partir do gás natural. Em 1997, a produção de gasolina foi descontinuada. Não há informação oficial das causas do abandono, mas provavelmente foram em função do aumento do custo do gás natural e do preço do metanol. Atualmente esta unidade produz 240 MTA por ano de metanol para exportação.

Uma planta de demonstração com reator de leito fluidizado operou na Alemanha de 1982 a 1995 pela associação de Mobil Research and Development Corporation, Union Rheinische Braunkohlen Kraftstoff AG e Uhde Gmb (KEIL, 1999).

Em julho de 2008, foi anunciado que a Consol Energy, maior produtora de carvão betuminoso dos EUA, está trabalhando com a Synthesis Energy Systems para investir US$ 800 milhões na construção de unidade, que produzirá, na Virgínia, a partir do carvão, 720 MTA de metanol, que serão convertidas em 360 milhões de litros de gasolina por ano. Será utilizada a tecnologia desenvolvida pela ExxonMobil Research & Engineering (MCCOV, 2008).

6.3.5.2) MtSynfuels – Lurgi

A Lurgi é uma empresa detentora de tecnologias para produção de gás de síntese e metanol. Na continuidade desta verticalização, desenvolveu este processo, baseado em oligomerização, que é concorrente ao processo de Fischer Tropsch, na produção de hidrocarbonetos para combustíveis líquidos. O MtSynfuels consiste na obtenção de olefinas a partir de metanol, com posterior oligomerização, produzindo GLP, gasolina e diesel (LURGI, 2005):

A oligomerização consiste em transformar as olefinas leves, normalmente gasosas, produzidas a partir do metanol, em olefinas com cadeias mais longas, líquidas. Esta reação ocorre a temperaturas 150°C - 350°C e a pressões 35 - 85

bar, usando zeólita como catalisador. O efluente é separado por destilação e a fração do diesel é hidrogenada.

Este processo tem eficiência de 67%, o que corresponde a uma vantagem sobre o Fischer Tropsch cuja eficiência é 63%. Produz também uma gasolina de qualidade superior à de Fischer Tropsch (VOLKSWAGEN, 2008).

Não foram detectados projetos comerciais em estudo ou construção.

6.3.6) Célula a combustível

Uma célula a combustível é uma célula eletroquímica, que converte continuamente a energia química de um combustível e de um oxidante, em energia elétrica e calor, através de processo que envolve um sistema eletrodo/eletrólito, conforme Figura 6.7 (SILVA, 2005).

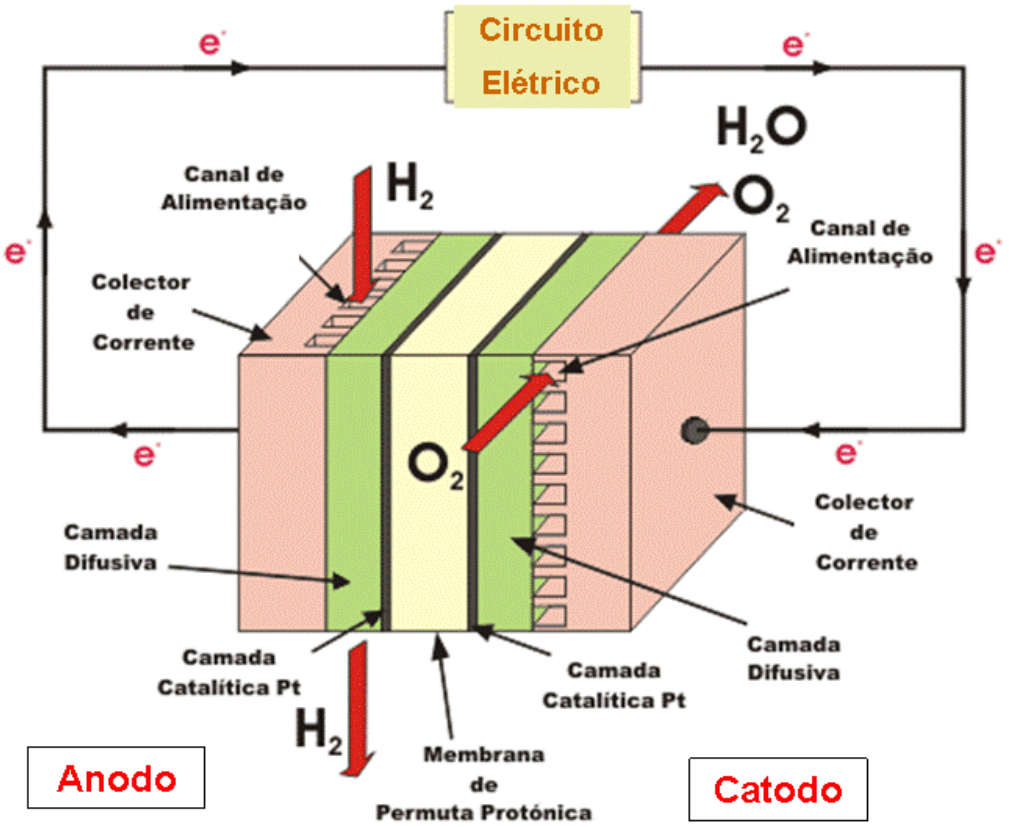


Figura 6.7: Esquema simplificado de uma célula a combustível - Fonte: Células de Combustível, 2008a

As células a combustível são constituídas por dois elétrodos, um positivo e outro negativo, o catodo e anodo, respectivamente. Entre eles há um eletrólito, cuja

função é de transportar os íons produzidos no anodo, ou no catodo, para o elétrodo contrário, e um catalisador, que acelera as reações eletroquímicas nos elétrodos. A reação eletroquímica no anodo produz elétrons enquanto a do catodo os consome. Portanto, a ligação do anodo ao catodo através de um fio proporcionará a transferência de elétrons de um para o outro, produzindo uma corrente elétrica (LARMINIE, 2002). A Figura 6.7 apresenta o seu funcionamento.

Uma célula a combustível pode converter mais do que 90% da energia contida num combustível em energia elétrica e calor. Na prática, cada uma das células a combustível pode produzir uma diferença de potencial inferior ou igual a 1 V. Isto significa que, para se obterem níveis úteis de potência elétrica, têm-se que associar diversas células a combustível, em série. Deste modo, um sistema de células a combustível apresenta a vantagem de ser modular e, por isso, tem a possibilidade de ser construído para uma ampla gama de potências elétricas, podendo ir dos milewatts até aos megawatts.

Existem vários tipos de tecnologias de células, baseadas em combustíveis diferentes, principalmente em hidrogênio, sendo a proton exchange membrane fuel cells (PEMFC), um exemplo. Essa é uma das alternativas em desenvolvimento, para utilização em veículos, por ser relativamente mais leve, ter baixa temperatura de operação e alta potência elétrica de saída.

Uma variante da PEMFC, atualmente desenvolvida para aplicações portáteis, é a direct methanol fuel cells (DMFC), onde não há geração de hidrogênio. Nesta célula uma mistura de metanol e água reage diretamente com o ar e produz água, CO2 e energia elétrica. A Figura 6.8 mostra seu funcionamento esquematicamente:

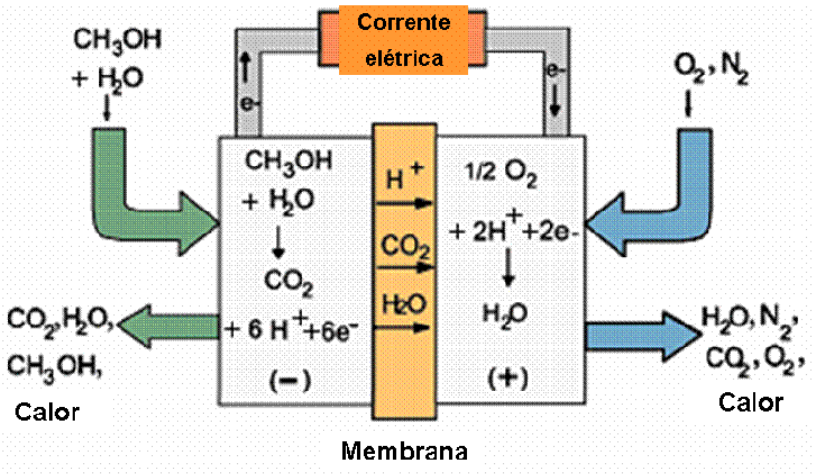


Figura 6.8: Funcionamento esquemático de DMFC - Fonte: Braz, 2003

Uma DMFC apresenta as seguintes reações:

Reação geral: $CH_3OH + 3/2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O$ (1)

Reação anódica: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ (2)

Reação catódica: $3/2\ O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$ (3)

No anodo ocorre a oxidação do metanol a CO2 e no catodo a redução em meio ácido do oxigênio à água. Há geração contínua de calor em ambos os elétrodos, portanto depois de atingida a temperatura de operação será necessária a retirada de calor excedente para evitar superaquecimento.

A tecnologia DMFC proporciona várias vantagens sobre a PEMFC:

- não utiliza hidrogênio, eliminando os perigos na sua estocagem e manuseio, aumentando a segurança do sistema. Em se pensando em combustíveis veiculares, observa-se que o metanol exigirá um menor investimento, já que os veículos poderão ser abastecidos pelas atuais redes de postos de combustíveis, pois o metanol tem total compatibilidade com ela. A necessidade de construção de nova infraestrutura de distribuição para hidrogênio, de altíssimo custo, é uma grande barreira de entrada para novas tecnologias.
- o metanol apresenta uma maior densidade energética que o hidrogênio líquido, pois há 98,8 g de hidrogênio em 1L de metanol na temperatura ambiente, e 70,8 g em 1 L de hidrogênio a -253ºC (OLAH, 2006).
- o metanol possui menor custo e maior facilidade de manuseio e transporte, pois na temperatura ambiente encontra-se na forma líquida.

As aplicações da célula a combustível podem ser divididas em baixa potência (menor que 5,0 kW) utilizada em equipamentos eletroeletrônicos, média potência (5,0 – 50 kW) para carros, caminhões, trens e barcos e alta potência (acima de 50 kW) para estações centrais de geração de energia (PRAKASH, 2008). As DMFCs estão sendo desenvolvidas, no momento, principalmente para baixa potência.

Atualmente, as apostas para a utilização de energia elétrica em veículos vão em direção da alternativa de baterias à base de lítio, com capacidade de serem recarregadas diretamente (THE ECONOMIST, 2008b).

Um automóvel para se movimentar, precisa de um motor com potência de 50W, se ele é de combustão interna tem custo aproximado de US$ 800, e se de DFMC US$ 200.000 - 250.000. Portanto, o motor à pilha combustível atualmente é mais de 200 vezes mais caro, o que leva a sua inviabilidade econômica. Pode ainda

ocorrer uma outra possibilidade, que é a utilização do metanol puro como combustível veicular, já que ele possui um rendimento energético superior aos hidrocarbonetos, sendo exigidas poucas mudanças no motor atual. A concretização de qualquer uma dessas duas alternativas levará o metanol a um patamar de demanda completamente distinto ao existente hoje. Caso, futuramente, a DFMC tenha custo competitivo, ou passe-se a utilizar o metanol em motores de combustão interna, sua demanda será de até 15 vezes superior à atual (PRAKASH, 2008). É necessário lembrar que essas alternativas estão em competição com todas as outras atualmente pesquisadas para combustíveis veiculares.

O grande mercado de energia para eletroeletrônicos portáteis como laptops, telefones celulares e máquinas de fotografar e filmar, entre outros, vem utilizando novas tecnologias baseadas na DMFC. Essas células são abastecidas com cartuchos de metanol, trocados sem interrupção de energia, o que permite o uso contínuo do equipamento, em locais onde não haja a possibilidade de utilização de adaptador de corrente alternada, o que não é possível com pilhas alcalinas.

Outra vantagem das DMFC é o baixo custo do cartucho de recarga de metanol que é análogo ao das atuais baterias alcalinas. Entretanto um cartucho contendo apenas 50ml de metanol pode suprir um computador portátil por aproximadamente 5 horas, enquanto uma bateria alcalina pode ser usada por apenas 10 minutos. Esse mesmo pequeno cartucho pode prover de energia um telefone celular por 3 semanas. Direct Methanol Fuel Cell Corporation (DMFCC) desenhou e desenvolveu cartuchos de plástico contendo de 5 a 100 ml de metanol, que podem ser inseridos nos eletroeletrônicos portáteis (DFMCC, 2008).

Em maio de 2008, o Departamento de Aviação dos EUA autorizou o uso de baterias de DMFC em aeronaves com voos domésticos (KARMALIC, 2008), o que provocou um maior interesse nesse desenvolvimento. A empresa MTI micro, nos EUA, já fabrica o produto Mobion, que é uma DFMC para ser utilizada em equipamentos eletrônicos (MTI micro, 2008).

Um protótipo de laptop construído pela Toshiba, em 2007, foi operado durante 5 horas e gastou 70 ml de metanol (TOSHIBA, 2008). Em outro teste, um tocador de multimídia, também da Toshiba, gastou 10 ml de metanol para funcionar 10 horas (KEMSLEY, 2007).

A empresa Polyfuel apresentou, em julho de 2008, também um protótipo de célula para laptops que é muito mais leve, e ocupa menor volume que as baterias de

lítio, necessárias para o mesmo fim. Esse computador trabalhou 10 horas com apenas um pequeno cartucho de recarga com 50 ml de metanol. Dezenove empresas, entre Sanyo e NEC, já demonstraram interesse em constituir parceria com a Polyfuel para a construção de seus laptops (POLYFUEL, 2008).

O número de aparelhos eletrônicos portáteis, tanto domésticos como industriais, vem aumentando a cada dia, o que comprova a tendência crescente dessa aplicação. Um relatório recente sobre baterias recarregáveis, feito pela Specialists in Business Information (SBI), estima que haja um crescimento de 4% nesse mercado nos EUA, até 2012, sendo seu valor aproximado nesse ano de US$ 9 bilhões (SBI, 2008).

Uma pesquisa de 2005 da Wintergreen Research (*appud* GEORGI, 2008) projeta para 2012 uma demanda anual de 10 bilhões de unidades de células a combustível de baixa potência para eletroeletrônicos.

Num exercício de potencial pode-se fazer a seguinte previsão para 2012: considerando-se que 10% da demanda de pilhas combustíveis de baixa potência sejam DMFC (uma estimativa conservadora em função dos protótipos construídos e do investimento em pesquisa dos principais atores interessados no uso dessa tecnologia), e que cada unidade utilizasse 10kg por ano, ter-se-ia uma demanda de 10 MMTA de metanol. Esse número é uma ordem de grandeza factível, pois, além das aplicações em eletroeletrônicos, estão sendo anunciados ainda produtos finais e protótipos como:

- O SFC A50, fabricado pela empresa Udomi, é utilizado em sistemas remotos e de emergência para equipamentos industriais em geral, em estações de monitoramento de clima e tempo, em estações de monitoramento de trânsito, camping, luz de emergência residencial, entre outros. Tem consumo de 1,3 litros de metanol por kilowatt/hora em operação contínua (UDOMI, 2008);
- A firma Smart Fuel Cells já produziu 7.500 unidades de energia auxiliar, utilizadas em veículos tipo trailers (motohomes ou RVs) e em aplicações militares. Essas unidades produzem de 600 a 1.600 Watt/hora (Wh) e custam de EUR 2.000 – 4.000 (DIKEMAN, 2008);
- IdaTech fabrica o *250-watt iGen*, uma unidade que produz a metade da energia requerida para um domicílio com um habitante, com um consumo de 1,0 litro de metanol por KWh produzido (GLASKOWSKY, 2007);

- A Mitsubishi desenvolveu DFMC capaz de gerar 300W para a Suzuki utilizar em suas cadeiras de rodas. Um protótipo consumiu 4 litros de metanol para rodar 60 km à baixa velocidade (GOOD CLEAN TECH, 2008).

As inúmeras variáveis e incertezas presentes dificultam a indicação de um dado significativo do potencial de utilização de metanol em DMFC. Entretanto, considerando-se a estimativa de crescimento da utilização de baterias, pode-se afirmar que provavelmente haverá grande demanda de metanol para essa aplicação. Neste trabalho então, será usada a previsão de consumo para 2012 do exercício feito anteriormente, ou seja, 10 MMTA de metanol, cerca de 1/3 da atual demanda.

6.4) China, a propulsora das aplicações de metanol

No transcorrer deste trabalho, a China foi citada muitas vezes em situações distintas. Nesta seção vamos concentrar essas informações, de forma a mostrar a importância desse país para a economia do metanol, e para a possibilidade de utilização do modelo aqui discutido de utilizar esse álcool como reestruturante das cadeias da química e da energia.

A partir de 2007, a China se estabeleceu firmemente como dirigente da indústria mundial do metanol, sendo seu maior produtor e consumidor. É projetada a produção de metanol baseada em carvão de 20 MMTA em 2010, 38 MMTA em 2015 e 66 MMTA em 2020. Também lidera consumo nas aplicações do metanol como combustível veicular alternativo e DME. Caso 5% dos carros utilizarem M-100 a M-85 e 15% usarem M-15 o consumo será de 13 MMTA (CHINA BUSINESS, 2008).

Possui a terceira reserva mundial de carvão, 126 bilhões de toneladas, ficando atrás apenas de Rússia e EUA. Importa 47% do seu consumo de petróleo, sendo o segundo importador mundial, atrás apenas também dos EUA, daí a sua necessidade de investir no carvão como matéria-prima. Por mais de uma década, locais de grande produção de carvão (Xinjian, Shanxi, Henan, Inner Mongolia, Beijing Shi, Hebei, Anhui, Guangdong e Sichuan) desenvolveram programas de desenvolvimento de metanol. Isso levou o governo a aprovar que o National Development and Reform Commission (NDRC) explorasse o metanol como combustível, e que considerasse esse uso como estratégico (METHANOL INSTITUTE, 2008a).

A China possui mais de 150 plantas de metanol a partir do carvão, com capacidade produtiva de 11 MMTA. Possui um custo de produção competitivo de US$ 110-165 por tonelada de metanol. Conclui-se então, que esta indústria está em alto grau de maturidade, demonstrando que é o país com maior experiência tecnológica na produção com essa matéria-prima. Adiciona-se ainda 40 MMTA de metanol, que poderão ser produzidos a partir de 80 bilhões de metros cúbicos de CO2 gerado em suas fornalhas, contribuindo para a melhoria do meio ambiente (METHANOL INSTITUTE, 2008a).

A China possui dois grandes desafios na continuidade do desenvolvimento da economia do metanol. O primeiro deles é a baixa qualidade do metanol produzido, que não pode ser usado pelos consumidores internacionais, o que está sendo atualmente atacado, já que a conversão de metanol para DME e outros produtos, no próprio país, exige uma melhor qualidade do álcool (METHANEX, 2008c). A segunda grande tarefa é relativa à preservação do meio ambiente. Até então a China possuía legislações brandas quanto à regulação das emissões de CO2 e particulados. O que se está vendo atualmente é um esforço para o desenvolvimento sustentado, com aumento do rigor nas exigências para aprovação de novos projetos e maior fiscalização nas unidades existentes, o que tem provocado o fechamento das plantas mais poluidoras (ICIS, 2008i). Houve grande investimento e aumento de poder no órgão regulador ambiental, State Environmental Protection Administration (SEPA), e já se cogita na possibilidade de essa entidade se tornar um ministério (RICHARDSON, 2008).

6.5) Consolidação das aplicações

Nesta seção será apresentada e discutida a previsão das demandas do metanol em 2012 e 2020 baseadas nas considerações feitas neste capítulo para cada uma de suas aplicações.

O consumo de 2007 foi apurado principalmente a partir de informações de fontes como Methanex, a principal produtora mundial de metanol, e de organizações que estudam especificamente esse produto, como o Methanol Institute e MMSA (Methanol Market Service Asia), já referenciadas em cada uma das citações utilizadas na análise das aplicações apresentadas nos itens anteriores. O Quadro

6.6 mostra sua consolidação, com a respectiva distribuição e contribuições individuais, assim como sua totalização.

Segundo Samuel Goldwyn, pensador e importante produtor cinematográfico dos EUA, não se deveriam fazer previsões. Numa previsão tecnológica as pessoas quase sempre erram pra cima ou pra baixo (THE ECONOMIST, 2008b). Um bom exemplo é a impossibilidade de previsão do comportamento dos preços das matérias-primas fósseis, nos últimos tempos. Qual será o combustível mais usado em automóveis? Qual será a velocidade da internet, ou de outra rede advinda de inovação radical, ou qual a capacidade de armazenamento de dados num *drive* portátil, em 2020? Ninguém consegue prever com exatidão.

Apesar da dificuldade de acerto na previsão, esse trabalho criará e desenvolverá metodologia que permita chegar a um número indicativo do consumo de metanol, em 2012 e 2020. Com esse objetivo, inicialmente as aplicações foram distribuídas em dois grandes grupos, segundo seu potencial de crescimento. No primeiro estão as convencionais: formaldeído, ácido acético, MTBE e outros, e no segundo as novas: MTO/MTP, DME, misturas M15/M100, biodiesel e MTG. A seguir são mostrados os parâmetros utilizados para as previsões de 2012 e 2020.

Em 2012 e 2020, para as convencionais, foram utilizadas as taxas de crescimento de 3,5% ao ano para formaldeído, ácido acético e outros, e de 3% ao ano para o MTBE, já anteriormente discutidas.

As novas, onde a previsão é muito mais difícil, têm números distintos. No Gráfico 6.5, já anteriormente comentado no item 6.3.4, são apontadas duas análises das taxas de crescimento anual da demanda para 2012. A primeira, de 4.5%, mais conservadora, da CMAI, que avalia igualitariamente todos os usos, sem levar em conta o maior potencial das novas aplicações. A segunda mais otimista, realizada pela Methanex na ultima apresentação para investidores, em junho 2008, que considera o maior potencial das novas aplicações em combustíveis. À primeira vista haveria uma desconfiança de superdimensionamento, pois o maior produtor de metanol poderia ter como objetivo a propaganda do seu negócio, para captação financeira através da entrada de novos investidores. Por outro lado, essa empresa precisa ter confiança dos seus investidores, e não pode ser irresponsável a esse ponto. Acredita-se na consistência dessas informações, também por terem sido baseadas nos inúmeros projetos em construção de novas unidades de DME e metanol, e pela concordância com as avaliações das entidades governamentais

chinesas, que admitem uma participação de 10% de metanol nas misturas combustíveis utilizadas em 2012 (METHANEX, 2008c). Portanto, apesar da incerteza presente, utilizaremos os números apresentados pela Methanex.

Já para 2020, o grau de dificuldade para previsão no consumo em novas aplicações é ainda maior. Na mesma apresentação para investidores, em junho de 2008, a Methanex defendeu a continuidade do crescimento em 10% ao ano. Esse número é de difícil defesa, pois já vem precedido de grande crescimento, e tanto tempo com essa taxa altíssima torna-o de baixa credibilidade. Por outro lado, o crescimento histórico do metanol de 1995 a 2007 não foi pequeno, sendo em média 4,5% ao ano, sem contar com a provável grande demanda das novas aplicações em combustíveis. Observa-se que as novas aplicações não são tecnologicamente e mercadologicamente maduras, e que poderão ter uma evolução com grande crescimento continuado, considerando-se as seguintes pré-condições:

- pressupõe-se um cenário mundial com ausência de grandes perturbações no período;
- não haverá o surgimento de nenhuma tecnologia concorrente, que se torne modelo dominante.

Pode-se então supor que 10% ao ano de crescimento de demanda é uma taxa possível de ser alcançada, e será a utilizada neste trabalho.

Baseando-se nessa metodologia foi construído o Quadro 6.6 que apresenta os consumos individuais de metanol por aplicação, assim como suas totalizações para 2012 e 2020.

Quadro 6.6: Demanda mundial de metanol por aplicação em 2007 e sua previsão para 2012 e 2020
Fonte: Elaboração própria

Aplicação	2007		2012		2020	
	Consumo MMTA	Participação %	Consumo MMTA	Participação %	Consumo MMTA	Participação %
Formaldeído	15,0	37,5	17,8	17,9	22,7	12,7
Ác Acético	10,5	26,3	12,6	12,7	16,1	9,0
MTBE	6,0	15,0	7,0	7,0	8,9	5,0
MTO/MTP	0,0	0,0	15,0	15,1	32,2	18,0
DME	1,5	3,8	20,0	20,1	42,9	24,1
Misturas	2,7	6,8	10,0	10,1	21,4	12,0
Biodiesel	2,0	5,0	3,5	3,5	7,5	4,2
MTG	0,0	0.0	0,8	0,8	1,7	1,0
DMFC	0,0	0.0	10,0	10,1	21,4	12,0
Outros	2,3	5,8	2,7	2,7	3,5	2,0
Total	40,0		99,4		178,2	

O Quadro 6.6 mostra que o consumo de metanol em 2012 e 2020 será de aproximadamente 99,4 MMTA e 178,2 MMTA, representando um crescimento de 249% e 446% se comparado com as 40 MMTA gastas em 2007. Observa-se ainda a participação crescente das aplicações em energia em detrimento da produção de insumos químicos, mesmo considerando a grande contribuição dos novos usos em MTO/MTP. Já o Gráfico 6.7 apresenta a evolução do consumo total de metanol, assim como o que é previsto para os usos convencionais e os novos. Observa-se um grande crescimento das novas aplicações na demanda global de metanol, o que demonstra a sua importância para o desenvolvimento dessa economia.

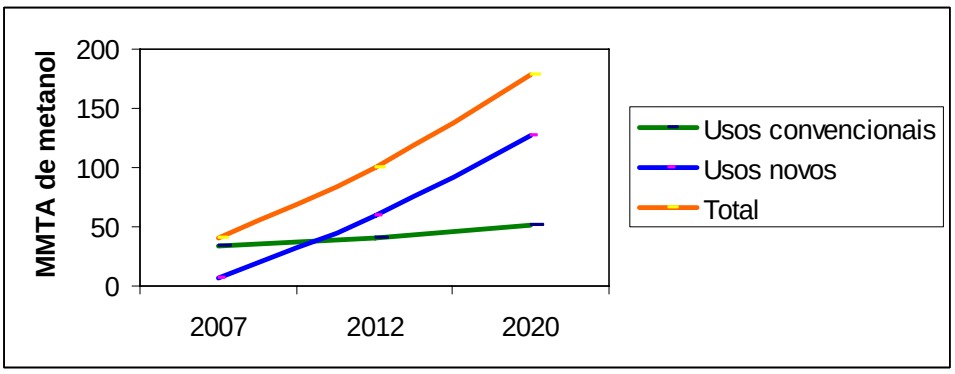


Gráfico 6.7: Evolução da participação das novas aplicações na demanda global de metanol - Fonte: Elaboração Própria

A comparação entre o potencial das aplicações será feita como no Capítulo 5, baseada na metodologia de análise qualitativa por critério de pontos, de acordo com a escolha feita no Capítulo 3. Cada um dos usos do metanol possui diferentes graus de incerteza, devido à distinção presente na sua maturidade tecnológica e mercadológica, e à possibilidade de surgimento de novas tecnologias concorrentes, que se tornem modelos dominantes. Partindo-se então dos consumos, para cada aplicação, apontados no Quadro 6.6, é possível traçar cenários pessimista e otimista, levando-se em conta esses diferentes graus de incerteza.

As incertezas serão apuradas a partir da avaliação dos seguintes indicadores que podem traduzi-la: grau de desenvolvimento tecnológico, grau de desenvolvimento do mercado e potencial de mercado, aos quais foram atribuídos pesos comparativos e são assim definidos:

- *Grau de desenvolvimento tecnológico*: é estágio em que se encontra a tecnologia em relação ao seu amadurecimento, sendo o grau “1” a menos desenvolvida, e o grau “5” a já em estado maduro;

- *Grau de desenvolvimento do mercado*: é o quanto o mercado potencial previsto já foi ocupado. Quando estiver todo ocupado será grau “5”, e se houver muita demanda a conquistar será grau “1”;

- *Potencial de mercado*: considerando-se as tecnologias existentes, qual o potencial de crescimento do mercado? O grau “5” indica uma grande possibilidade de crescimento e, o grau “1” uma pequena.

O Quadro 6.7 mostra os graus auferidos a cada uma das aplicações para esses parâmetros:

Quadro 6.7: Graus dos indicadores de incerteza por aplicação de metanol – Fonte: Elaboração própria

Aplicação	Grau de desenvolvimento tecnológico	Grau de desenvolvimento do mercado	Potencial de mercado
Formaldeído	5	5	2
Ác Acético	5	5	2
MTBE	5	5	1
MTO/MTP	2	2	4
DME	2	2	5
Misturas	3	3	4
Biodiesel	4	4	3
MTG	1	1	4
DMFC	1	1	5

A seguir são mostradas nos Quadros 6.8, 6.9 e 6.10 as justificativas dos graus atribuídos, com base nas informações aqui apresentadas para cada uma das fontes, para desenvolvimento tecnológico, desenvolvimento mercadológico e potencial de mercado, respectivamente;

Quadro 6.8: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento tecnológico na apuração comparativa de incertezas para aplicações Fonte: Elaboração própria

Aplicação	Pontos	Justificativa
Formaldeído Ác Acético MTBE	5	produtos químicos tradicionais com tecnologia madura
Biodiesel	4	estão em plena utilização, com maturidade inferior as anteriores
Misturas	3	estão em início de utilização, podem sofrer inovações incrementais
MTO/MTP DME	2	suas primeiras plantas de grande escala começam a entrar em operação
MTG	1	exige desenvolvimento para diminuição do teor de aromáticos
DMFC	1	seus protótipos estão em pleno desenvolvimento

Quadro 6.9: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de desenvolvimento do mercado na apuração comparativa de incertezas para aplicações Fonte: Elaboração própria

Aplicação	Pontos	Justificativa
Formaldeído Ác Acético MTBE	5	produtos maduros com mercados desenvolvidos
Biodiesel	4	produto com mercado em desenvolvimento em todo mundo
Misturas	3	produto com mercado em desenvolvimento, porém a nível regional, principalmente na Ásia
MTO/MTP DME	2	em início de desenvolvimento com muito mercado a desenvolver, necessitando ainda evoluções em processo para MTO/MTP e em processos e produto para DME,
MTG DMFC	1	em início de implantação com todo mercado a ser desenvolvido

Quadro 6.10: Justificativa da atribuição de pontos para o indicador de potencial do mercado na apuração comparativa de incertezas para aplicações Fonte: Elaboração própria

Aplicação	Pontos	Justificativa
DME	**5**	grande potencial, pode substituir diesel e GLP
DMFC	5	grande potencial, inúmeras possibilidades dos seus usos em eletroeletrônicos
MTO/MTP Misturas	4	bom potencial, com menor potencial de demanda que DME e DFMC
MTG	4	bom potencial, permite produção de gasolina de diferentes fontes, aumentando a flexibilidade
Biodiesel	3	bom potencial, mas já sofre críticas na concorrência da área plantada
Formaldeído Ác Acético	2	baixo potencial de mercado, elevada maturidade
MTBE	1	menor potencial, está sendo substituído

Pode-se observar o comportamento entre esses parâmetros através de três gráficos, plotando-se dois a dois, ficando: grau de desenvolvimento tecnológico x grau de desenvolvimento mercadológico, grau de desenvolvimento tecnológico x potencial de mercado e grau de desenvolvimento mercadológico x potencial de mercado, sendo respectivamente apresentados a seguir no Gráfico 6.8, Gráfico 6.9 e Gráfico 6.10.

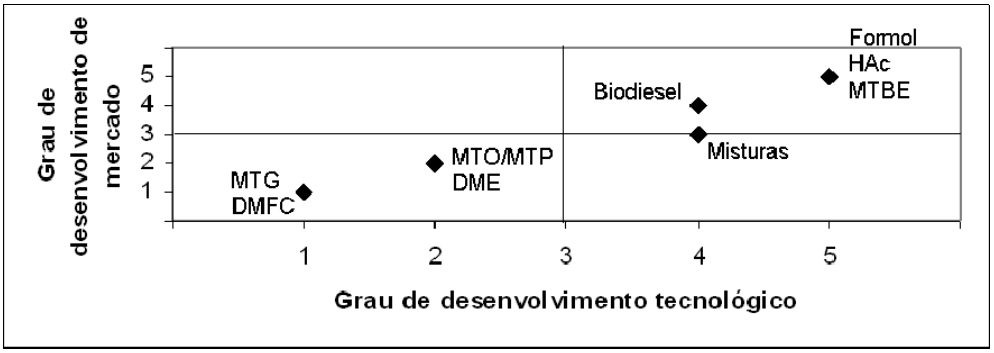


Gráfico 6.8: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento tecnológico em função do grau de desenvolvimento de mercado - Fonte: Elaboração própria

Observa-se que o Gráfico 6.8 praticamente divide as aplicações em dois grupos. O primeiro engloba as que estão com maior maturidade e consequentemente já ocupam boa parte do seu mercado potencial, e menos contribuirão para a evolução futura da economia do metanol. O segundo grupo é o que mais participará, mas ainda tem boa estrada tecnológica a percorrer, antes de ocupar a maior fatia do seu uso total. É bom notar que as contribuições são ordenadas ao longo da curva de extrapolação, sendo a maior MTG/DMFC e a menor formol, MTBE e ácido acético (HAc). As tecnologias com maior desenvolvimento de mercado são as mais maduras tecnologicamente. Isso significa que as novas tecnologias têm muito mercado a conquistar, mas para que isso aconteça, será preciso desenvolvimento tecnológico. Parece óbvio, mas observa-se que poderia ocorrer um cenário onde tecnologias maduras ainda tivessem mercados a desenvolver, o que não é esse caso.

A seguir, o Gráfico 6.9 mostra que as novas aplicações são as que apresentam maior potencial de mercado, mas ainda estão atrasadas no seu desenvolvimento. Comparadas com as aplicações tradicionais, elas é que serão as maiores responsáveis pelo aumento do mercado atual, já que contribuirão com maior volume. Portanto, o desenvolvimento mercadológico dessas novas tecnologias proporcionará um grande aumento na demanda mundial de metanol. Pode-se afirmar, nesse contexto, que o metanol tende a evoluir de um produto aplicado num pequeno nicho de mercado para um produto novo, direcionado a mercados emergentes, de potenciais muito superiores aos atuais. A distribuição da contribuição é similar à do Gráfico 6.8, sendo maior a da DMFC e menor a do MTBE.

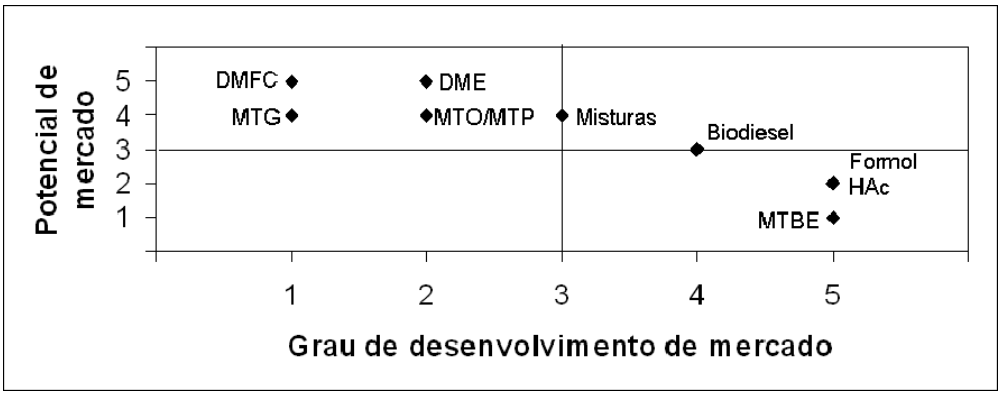


Gráfico 6.9: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento de mercado em função do potencial de mercado – Fonte: Elaboração própria

Já o Gráfico 6.10 identifica que, apesar da liderança das novas aplicações no desenvolvimento do mercado, elas ainda têm muito P&D requerido, principalmente em DMFC, MTG, MTO/MTP, que são os de maior contribuição. O processo de desenvolvimento tecnológico pode resultar em aplicações que terão um impacto muito grande no mercado de metanol, pois exigirão uma demanda muito superior à atual, mudando sua ordem de grandeza.

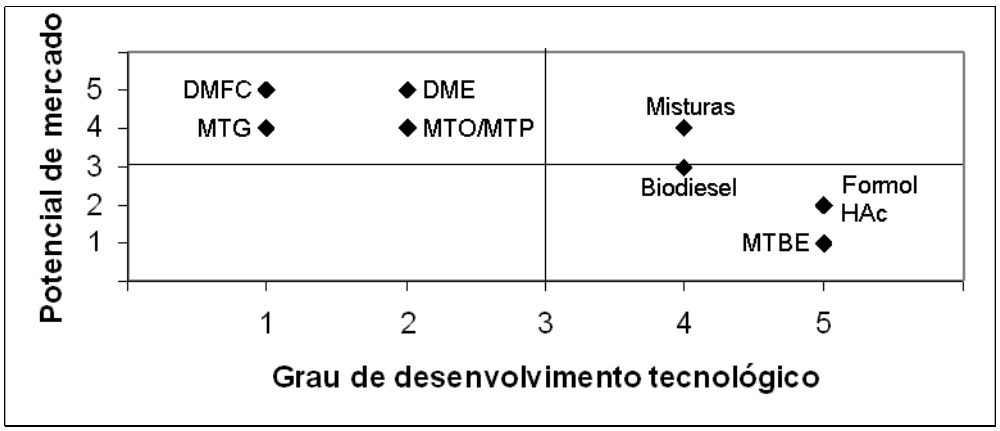


Gráfico 6.10: Variação do comportamento do grau de desenvolvimento tecnológico em função do potencial de mercado - Fonte: Elaboração própria

Os três gráficos anteriores enriqueceram a análise das aplicações de metanol, mas não sugeriram nenhum modelo para se apurar as incertezas. Considerando que elas estão dispersas no grau de desenvolvimento tecnológico, no grau de desenvolvimento de mercado e no potencial de mercado, pode-se assumir que tais

graus são indicadores de incerteza. Seu somatório reúne grande parte das incertezas de cada uma das aplicações individualmente, e foi chamado de grau de desenvolvimento e inserido no Quadro 6.11. Observa-se que esse grau de desenvolvimento é inversamente proporcional ao grau de incerteza. Quanto maior a incerteza, menor o grau de desenvolvimento. Portanto, ao grau máximo de desenvolvimento, “15”, arbitrou-se a incerteza mínima de 10%, e ao grau mínimo “1”, a incerteza máxima, igual a 50%. As incertezas intermediárias foram calculadas segundo esse critério e inseridas no Quadro 6.8, onde se vê a equivalência entre os graus de desenvolvimento e as incertezas.

Quadro 6.11: Equivalência entre os graus de desenvolvimento e incerteza - Fonte: Elaboração Própria

	Grau de desenvolvimento	**Grau de incerteza (%)**
Formaldeído	12	18,0
Ác Acético	12	18,0
MTBE	11	20,7
Misturas	11	20,7
Biodiesel	11	20,7
DME	9	27,0
MTO/MTP	8	29,7
DMFC	7	32,3
MTG	6	35,0

Utilizando-se dos graus de incerteza do Quadro 6.8, é possível traçar dois cenários. Um otimista que acrescenta o valor da incerteza na demanda prevista no Quadro 6.6, para um determinado período (2007-2012 ou 2007-2020), e outro pessimista, que o diminui.

O cenário otimista, limite superior, e o cenário pessimista, limite inferior, assim como sua memória de cálculo, para o período 2007-2012, são apresentados no Quadro 6.12. As aplicações classificadas em outros são consideradas tradicionais e, portanto, será utilizado o grau de incerteza de 18%, obtido para formaldeído e ácido acético para o seu cálculo.

Quadro 6.12: Previsão dos cenários otimista (limite superior) e pessimista (limite inferior) da demanda de metanol, por aplicação, em 2012 - Fonte: Elaboração própria

Aplicação	2007 Consumo MMTA	2012 Consumo MMTA	Diferença 2007-2012 MMTA	Fator de Incerteza	Incerteza MMTA	Limite Superior MMTA	Limite inferior MMTA
Formaldeído	15,0	17,8	2,8	18,0%	0,5	18,3	17,3
Ácido Acético	10,5	12,6	2,1	18,0%	0,4	13,0	12,2
MTBE	6,0	7,0	1,0	21,7%	0,2	7,2	6,7
MTO/MTP	0,0	15,0	15,0	29,7%	4,5	19,5	10,5
DME	1,5	20,0	18,5	27,0%	5,0	25,0	15,0
Misturas	2,7	10,0	7,3	21,7%	1,6	11,6	8,4
Biodiesel	2,0	3,5	1,5	21,7%	0,3	3,8	3,2
MTG	0,0	0,8	0,8	35,0%	0,3	1,1	0,5
DMFC	0,0	10,0	10,0	32,3%	3,2	13,2	6,8
Outros	2,3	2,7	0,4	18,0%	0,1	2,8	2,6
TOTAL	**40,0**	**99,4**	**59,4**		**16,0**	**115,4**	**83,4**

A partir do Quadro 6.12 é possível afirmar que, em 2012, o consumo mundial provável de metanol estará entre 83,4 e 115,4 MMTA, e apresentará distribuição das aplicações conforme o Gráfico 6.11.

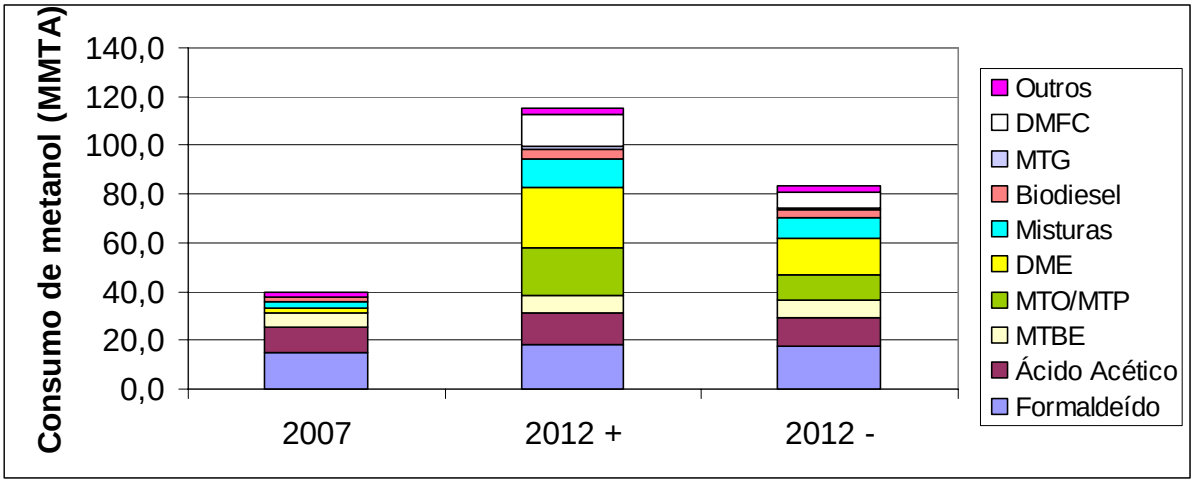


Gráfico 6.11: Previsão da demanda de metanol, por aplicação em 2007, 2012+ (cenário otimista) e 2012- (cenário pessimista) - Fonte: Elaboração própria

Observa-se no Gráfico 6.11 o grande crescimento de 2007 a 2012 para as novas aplicações, que representam um consumo de aproximadamente 16% do metanol em 2007 e passarão para 60%, na média, em 2012.

A mesma metodologia utilizada para 2012 foi feita para 2020 e inserida no Quadro 6.13.

Quadro 6.13: Previsão dos cenários otimista (limite superior) e pessimista (limite inferior) da demanda de metanol, por aplicação, em 2020 - Fonte: Elaboração própria

Aplicação	2007 Consumo MMTA	2020 Consumo MMTA	Diferença 2007-2020 MMTA	Fator de Incerteza	Incerteza MMTA	Limite Superior MMTA	Limite inferior MMTA
Formaldeído	15,0	22,7	7,7	18,0%	1,4	24,0	21,3
Ácido Acético	10,5	16,1	5,6	18,0%	1,0	17,1	15,1
MTBE	6,0	8,9	2,9	21,7%	0,6	9,5	8,2
MTO/MTP	0,0	32,2	32,2	29,7%	9,5	41,7	22,6
DME	1,5	42,9	41,4	27,0%	11,2	54,0	31,7
Misturas	2,7	21,4	18,7	21,7%	4,1	25,5	17,4
Biodiesel	2,0	7,5	5,5	21,7%	1,2	8,7	6,3
MTG	0,0	1,7	1,7	35,0%	0,6	2,3	1,1
DMFC	0,0	21,4	21,4	32,3%	6,9	28,4	14,5
Outros	2,3	3,5	1,2	18,0%	0,2	3,7	3,3
TOTAL	**40,0**	**178,2**	**138,2**		**36,7**	**214,9**	**141,5**

O Quadro 6.13 mostra que o consumo mundial provável de metanol estará entre 141,5 e 214,9 MMTA em 2020, e apresentará distribuição das aplicações segundo o Gráfico 6.12.

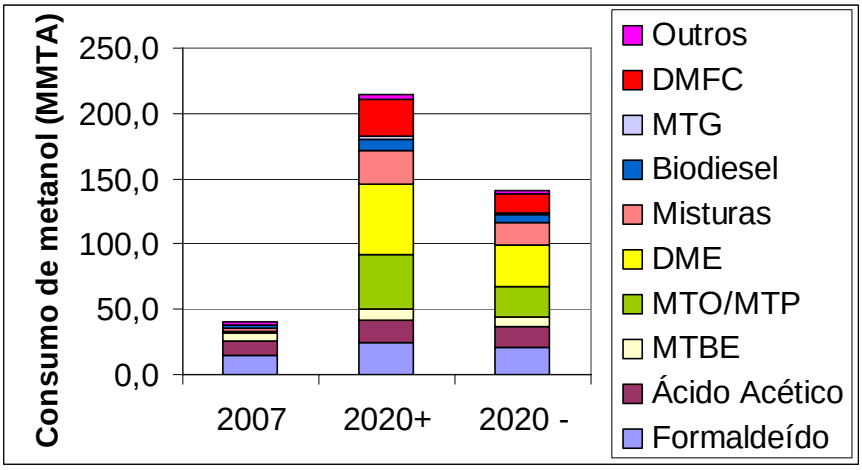


Gráfico 6.12: Previsão da demanda de metanol por aplicação em 2007, 2020+ (cenário otimista) e 2020- (cenário pessimista) - Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 6.12 confirma a previsão do Gráfico 6.11 de que as novas aplicações serão as de maior contribuição na evolução da demanda de metanol. Entretanto, são as que apresentam as maiores incertezas. Essas incertezas podem ser atenuadas através das flexibilidades, que são muito complexas em sua definição e avaliação. O Capítulo 2 apontou a melhor forma de abordá-las em um sistema tecnológico, como o aqui estudado. Portanto, serão analisados os parâmetros de

eficiência e capacidade de resposta para a temporal de longo prazo, e do parâmetro de robustez na preparação para mudanças imprevisíveis.

Avaliando-se as aplicações do metanol em química e energia, com relação a esses parâmetros, observa-se que elas dotam o sistema de grandes flexibilidades, pois apresentam:

- eficiência - em havendo outro produto que se torne modelo dominante no mercado de gasolina, por exemplo, perder-se-ia a demanda de metanol empregada em misturas e MTG, mas ainda seria possível usar metanol em substituição a GLP e diesel, assim como em MTO/MTG e DFMC, permanecendo ainda com enorme potencial de crescimento de consumo;

- capacidade de resposta – se um potencial de determinada aplicação não se concretiza, os outros que se concretizarem poderão absorvê-lo. Um excesso de metanol, oriundo dessa previsão não ocorrida, poderá ser gerado por novas unidades, construídas para esse fim, mas terá grande chance de ser rapidamente absorvido por aplicações de sucesso que superaram as expectativas iniciais;

- robustez – é muito improvável que haja, no futuro, um único combustível capaz de produzir toda energia para qualquer uso. Observa-se que as tecnologias que utilizam metanol estão presentes em grande parte dessas aplicações concorrentes. Portanto, a possibilidade de sua utilização é grande.

O investimento em metanol tem maior probabilidade de sucesso, pois ele é um produto genérico, de múltiplos usos. O fato de se produzir metanol, para biodiesel ou outra aplicação qualquer, não mudará a estrutura de produção, pois o mesmo metanol poderá ser usado em misturas combustíveis, por exemplo, ou em qualquer outro componente do portfólio de aplicações. Portanto, garante segurança de mercado.

Os usos do metanol podem ser concorrentes como DME e biodiesel, que são substitutos do diesel. Alguns podem preferir apostar no biodiesel, pela questão ambiental, outros optarão pelo DME, pois também apresenta outra flexibilidade na substituição do GLP. Mesmo sendo aplicações concorrentes, ambas utilizam metanol.

Atualmente se apresenta um leque de alternativas possíveis para o futuro dos combustíveis veiculares. Constata-se que o metanol tem participação em grande parte delas como em misturas, DME, DMFC e MTG. Fica de fora em tecnologias como a dos veículos com baterias recarregáveis na eletricidade e nos outros tipos

de pilhas a hidrogênio, que se vencedoras não permitirão a grande evolução prevista para o metanol.

Considera-se que haverá um processo de transição no mercado energético, entre o combustível atual e o futuro, ou seja, do combustível fóssil para outro mais evoluído, como hidrogênio ou outro padrão tecnológico. Não se sabe qual será ele, mas certamente é diferente do de hoje**.** Observa-se então, que o metanol é versátil nesse processo, pois pode participar em diversas fases dessa transição. Ele entra em aplicações que são respostas no curto prazo, como biodiesel e misturas, e outras que poderão estar presentes no longo prazo como DMFC. Esse processo de transição é incerto e apresenta alto grau de risco, pois tecnologias podem desaparecer no seu transcurso. Por exemplo, hoje já se rediscute a viabilidade do biodiesel. Não há nada que garanta a participação de qualquer aplicação no cenário futuro.

Essas inúmeras facetas flexíveis mostradas para o metanol permitem concluir que um sistema, que o tenha como *gateway,* é uma boa alternativa para amenizar o alto grau de incerteza encontrado no ambiente sócio-econômico atual.

6.6) Síntese e conclusões do capítulo

A organização do capítulo indicou e comparou as diferenças qualitativas e quantitativas entre as aplicações tradicionais e as novas tecnologias do metanol, assim como diferenças do seu uso na indústria da química orgânica e na indústria da energia, principalmente no que tange à quantidade.

Observa-se que a divisão e forma da abordagem feita para os usos, estão em total consonância com seus resultados. As aplicações apresentam potenciais de crescimento muito diferentes. Existem produtos estagnados, como o ácido acético e o formaldeído, que continuarão com crescimento histórico, e produtos potencialmente decrescentes como o MTBE, devido ao seu banimento na mistura com gasolina, para a utilização em combustível automotivo nos EUA. Entretanto, existem novos produtos e tecnologias com tendência de grande crescimento, muito maior que os tradicionais, como MTO/MTP, as misturas combustíveis com metanol, DME e as DMFC. Está presente ainda o de crescimento incerto, o biodiesel.

A China é a mola propulsora da economia do metanol sendo seu maior produtor e investidor. As aplicações em DME, misturas combustíveis e MTO/MTP já

estão presentes nesse país. Em 2007, contribuíram com aproximadamente 10% do consumo mundial de metanol, e possuem as maiores tendências de crescimento em curto prazo.

É possível constatar que os indicadores escolhidos para avaliar as incertezas, grau de desenvolvimento tecnológico, grau de desenvolvimento do mercado e potencial de mercado, conseguiram cumprir o seu objetivo. Compararam as aplicações e mostraram que os sucessos das novas aplicações, principalmente em energia, provocarão uma mudança na ordem de grandeza da demanda mundial de metanol.

A metodologia utilizada permitiu prever cenários pessimista e otimista, que balizam os limites superior e inferior das faixas da evolução do consumo mundial de metanol. É possível afirmar que ele será em 2012, de 83,4 a 115,4 MMTA e de 141,5 e 214,9 MMTA em 2020.

O metanol é um produto utilizado em diversas aplicações, que estarão presentes na maioria das alternativas previstas, atualmente, para a evolução das indústrias da química e da energia. Qualquer leque de possibilidades de produção futura de energia contém o metanol como matéria-prima, em uma ou mais tecnologias. Por outro lado, a evolução tecnológica se dará em curto, médio e longo prazo. Observa-se a utilização de metanol, já hoje, em misturas combustíveis, e a possibilidade de ser usado futuramente em DMFC, o que mostra sua potencial longevidade. Essa diversidade de usos potenciais permanentes indica a presença de grande flexibilidade do sistema baseado em metanol. Tal flexibilidade minimiza as incertezas econômicas e ambientais presentes e garante a segurança de mercado.

Esses usos crescentes terão inúmeros desafios a serem transpostos e o sucesso nessa trajetória será imprescindível para a viabilização deste sistema tecnológico. O aumento do uso do metanol em grandes volumes, principalmente como energético, onde a quantidade utilizada é muito superior ao uso como intermediário químico, é uma condição primordial para a implementação da nova arquitetura proposta neste trabalho. Essa possibilidade é grande, pois, apenas no sudeste asiático, a nova demanda nas aplicações de metanol como combustível, sua conversão em DME e utilização em misturas M15/100, têm como potencial estimado 170 MMTA. Esse valor representa mais que quatro vezes a demanda mundial de metanol em 2007. Observa-se também que essa quantidade é

infinitamente superior aos projetos de MTO/MTP, o que reafirma o amplo poder do setor energético na decisão dos destinos dessa economia.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

Dadas as incertezas do ambiente socioeconômico atual, esta tese partiu da hipótese de que a atenuação de tais incertezas, para as indústrias da química e da energia, pode ser feita com o rearranjo de ambas, através da construção de um novo sistema tecnológico, que contenha um *gateway,* para onde convergirão matérias-primas e aplicações.

Com o atual grau de incerteza, ao se olhar as indústrias da química e da energia, observa-se que é muito difícil indicar qual a melhor opção de matéria- prima ou que tecnologias e combustíveis serão os mais utilizados a médio e longo prazo. Isso dificulta o planejamento de investimentos, pesquisa e desenvolvimento nessas indústrias, e também torna nebulosa a defesa convicta de apontar a direção a seguir. Portanto, novas arquiteturas das cadeias produtivas estabelecidas precisam ser estudadas como formas de responder a essas incertezas.

Quanto maior o número de opções, em termos de matérias-primas e aplicações, que puderem ser absorvidas pela nova arquitetura, maior a possibilidade de ela responder aos diferentes caminhos, que o desenvolvimento possa tomar. Essa característica é a flexibilidade. Quanto mais forte ela estiver presente, maior será a possibilidade de atenuar as incertezas.

Uma arquitetura que contenha uma tecnologia de rota direta conta apenas uma ou poucas matérias-primas e geralmente um produto ou poucos produtos. Já uma outra configuração poderia ter a participação de um *gateway*, como elemento central. É possível escolher esse ponto focal, de forma que possa ser obtido a partir de muitas matérias-primas, e ser utilizado em grande diversidade de aplicações. Na comparação entre essas duas possibilidades arquiteturais verifica-se que a que

possui um produto focal tem maior flexibilidade, pois absorverá mais facilmente qualquer mudança, tanto nas fontes de obtenção como nos usos. Uma arquitetura constituída por um *gateway* explora melhor as flexibilidades, pois em caso de variações no ambiente poderá comportar as tecnologias existentes, as em desenvolvimento e as que ainda serão pensadas, amenizando assim, também, as incertezas. A arquitetura resultante é composta por módulos, as tecnologias e suas interfaces, e constituem um sistema tecnológico.

Das alternativas estudadas para a posição de *gateway*, o metanol se apresentou como o melhor candidato. O estudo das flexibilidades encontradas no sistema tecnológico nele baseado mostrou que elas estão presentes basicamente em três dimensões: nas escalas de produção, nas matérias- primas e nas aplicações.

A avaliação da evolução das escalas, considerando-se as unidades das plantas atualmente instaladas e dos novos projetos em construção, mostrou que há uma clara tendência de aumento das capacidades produtivas nas plantas de metanol. Essa tendência é facilmente detectada, quando se observa o aumento da participação do metanol produzido nas megaplantas, na demanda mundial. Ressalta-se ainda que as unidades de megaescalas possuem tecnologias competitivas desenvolvidas, para operarem com qualquer matéria-prima disponível.

Entretanto, esse fato não inviabiliza a operação de plantas grandes e pequenas (conforme classificação do Capítulo 4), que continuam competitivas, haja vista que o número dessas unidades permanece sendo maioria, tanto nas atualmente instaladas como nos novos projetos. Essas plantas absorvem as vantagens de atendimento a nichos de mercado e aproveitamento de pequenas jazidas, enquanto as megaplantas extraem suas vantagens da economia de escala.

As flexibilidades na independência da escolha da matéria-prima e da escala da planta de metanol são pontos positivos na avaliação do sistema que o tem como ponto focal.

Plantas pequenas, grandes e mega, conforme classificação feita no Capítulo 4, possuem modelos de negócio distintos, cujos sistemas individuais apresentam módulos comuns e exclusivos. Essa pluralidade de escalas terá então um maior número de componentes no sistema de produção de metanol, que aumentará a sua complexidade e consequentemente seu custo de administração. Essa é uma desvantagem inerente da operação de qualquer sistema flexível que contenha plantas com diferentes escalas.

Na dimensão de matérias-primas, observa-se que o metanol pode ser obtido de qualquer fonte carbonácea fóssil ou renovável. Tal flexibilidade foi uma das características que permitiram as primeiras visualizações da possibilidade de construção de um sistema tecnológico que tivesse o metanol como *gateway.* Essas inúmeras fontes apresentam evoluções de utilização distintas e são classificadas em três grandes grupos: fontes de uso tradicional (GN e petróleo), fonte de uso tradicional com grande crescimento (carvão) e fontes em desenvolvimento (*oil sands*, petróleo ultrapesado, xisto, *coalbed methane, tight sands e shales*, hidrato de metano, CO2 e biomassa). O maior potencial de crescimento se encontra, a curto prazo, nas de uso tradicional com grande crescimento e, a médio e longo prazo, nas novas em desenvolvimento.

A escolha da fonte a ser usada possui alto grau de incerteza. A análise dos indicadores de incerteza para matérias-primas mostrou que as fontes tradicionais: petróleo, GN e carvão, ainda são as de menor incerteza. Entretanto, o petróleo e o carvão principalmente, têm tendência de diminuição de participação, devido à

geração de CO2. Sendo o primeiro na combustão dos seus derivados atualmente utilizados, e o segundo, principalmente, na gaseificação. Essas emissões já sofrem incidência de taxação de carbono em alguns países do oeste da Europa, provocando aumento de custo.

A versatilidade do metanol em ser obtido, competitivamente, a partir de qualquer fonte carbônica, mostra a grande flexibilidade existente num sistema que se baseie nele, pois terá garantido a matéria-prima necessária para o seu pleno funcionamento. Observa-se, ainda, que essa garantia é sustentável, pois hoje pode ser abastecido por fontes tradicionais, GN ou carvão, e amanhã, pelas em desenvolvimento, CO2 e hidrato de metano.

Em se tratando das aplicações de metanol, verifica-se que elas têm potenciais de crescimento distintos. Há derivados com usos estagnados, como o ácido acético e o formaldeído, que permanecerão com crescimento histórico. Outros tendem a decrescer, como o MTBE. Existem, entretanto, as novas tecnologias MTO/MTP, misturas combustíveis, DME e DFMC, que devem ter crescimento muito superior às tradicionais. O biodiesel pertence a esse grupo, mas seu crescimento é incerto, devido às críticas que vem sofrendo por sua concorrência com área plantada para a produção de alimentos.

A presença do metanol, em inúmeras tecnologias novas para a produção de energia, permite prever que ele também estará presente na produção futura de energia, em uma ou mais tecnologias, o que garante o seu mercado no futuro. A evolução tecnológica não se dá instantaneamente, mas a curto, médio e longo prazo. O uso de metanol, já hoje, em misturas combustíveis e DME e a possibilidade de estar presente futuramente nas DMFC, demonstra sua potencial longevidade. Essa diversidade de usos, perpassando o curto, médio e longo prazo,

demonstra a presença de grande flexibilidade do sistema baseado em metanol. Tal flexibilidade atenua as incertezas ambientais presentes e garante a segurança de mercado.

O centro da análise do sistema tecnológico baseado em metanol está nas flexibilidades. Entretanto existem outros elementos ligados a escalas produtivas, matérias-primas e aplicações que contribuem para a robustez desse sistema, e serão mostradas a seguir.

Um atributo que não é comum nem à indústria química nem à de energia é o aproveitamento competitivo de diferentes escalas. Tais indústrias têm seu desenvolvimento calcado na estratégia de aumento de capacidade produtiva, para aproveitar ganhos de escala, com consequente diminuição de preços e aumento de competitividade no negócio de commodities. Entretanto, o sistema tecnológico baseado em metanol apresenta uma dinâmica de escalas peculiar. Observa-se que ele pode também aproveitar competitivamente os nichos, aumentando assim seu potencial mercadológico, o que vem a ser uma vantagem com relação a outros sistemas que não possam explorá-los.

A operação de megaplantas é um negócio recente de empresas globais, que se dedicam predominantemente à produção e comercialização de metanol. A intensificação do comércio de metanol provoca o aumento do seu grau de comoditização, que leva a uma maior padronização de procedimentos, produzindo consequentemente aumento da agilidade e da eficiência de todo o sistema tecnológico.

A fonte fóssil de maior recurso é o hidrato de metano, cuja extração e produção ainda se encontram em estágio inicial de desenvolvimento. Essa matéria-prima é majoritariamente *stranded* e, portanto, pode ser usada preferencialmente em

GTL nos poços com produção na ordem de 30 m3/dia e na produção de metanol em poços de 5 m3/dia, o que aumenta a segurança de abastecimento de matéria-prima.

O CO2 é um dos maiores responsáveis pelo aquecimento global, entretanto para o metanol é fonte renovável. Essa é uma vantagem ambiental do sistema tecnológico baseado em metanol, pois a utilização do CO2, como matéria-prima, diminui sua concentração no ar, contribuindo para a melhoria do meio ambiente.

O sucesso no desenvolvimento de aplicações na indústria da energia mudará completamente a taxa de crescimento da demanda mundial de metanol. A evolução dos usos em misturas, DME e DFMC definirão o novo patamar, pois o volume de metanol a ser utilizado nessas aplicações energéticas será muito superior aos das químicas, atualmente majoritárias. O metanol deixará de ser um insumo de maior demanda em química e passará a ser de maior consumo energético. Essa mudança de patamar será prioritariamente dependente do grau de substituição nos atuais combustíveis e da introdução e ou evolução de novas tecnologias baseadas em metanol.

Poderá haver quebras de paradigma, como por exemplo, a descoberta de rota direta de produção competitiva de metanol, sem passar pelo gás de síntese. Nesse caso, a diminuição de etapas para a produção de metanol, com consequente e provável diminuição de seu custo de produção, alavancará a viabilidade de utilização do sistema que o tem como *gateway*.

A avaliação do desenvolvimento regional de metanol mostrou que a China é sua maior fomentadora, produtora e investidora mundial. É quem, portanto, possui a maior responsabilidade na tendência de crescimento em curto prazo. A opção por novas aplicações em DME, misturas combustíveis e MTO/MTP vem provocando um grande aumento da demanda desse álcool no país.

A reunião das conclusões anteriores mostra que existem pré-condições, para que um sistema tecnológico, que tenha o metanol como *gateway*, seja viável. Apontam também as características favoráveis e desfavoráveis que esse sistema atualmente possui para combater as incertezas presentes.

A pré-condição para viabilizar a utilização do sistema tecnológico em análise é a evolução das tecnologias que promovam o seu uso na substituição dos combustíveis tradicionais, gasolina, diesel e GLP. A velocidade dessa substituição vai depender de quando e com qual intensidade se dará a incidência mundial da taxação do carbono, e da dinâmica do desenvolvimento tecnológico dessas novas aplicações.

As características favoráveis se encontram principalmente nas flexibilidades de escala, matérias-primas e aplicações. As flexibilidades em escala fornecem ao investidor opção de escolher qualquer tamanho de planta, tendo garantida a competitividade. Observa-se que esta opção terá que ser consonante com o objetivo da empresa de aproveitar os nichos de mercado ou as economias de escala. A flexibilidade em matéria-prima garante a segurança de abastecimento, a flexibilidade nas aplicações e a segurança de mercado.

A principal característica desfavorável é o aumento do número de componentes do sistema quando ele comporta diferentes escalas. Haverá um consequente aumento da complexidade que provocará um maior custo de administração. Um obstáculo que pode também inibir ou inviabilizar o uso dessa nova arquitetura é a ocorrência de possíveis rupturas tecnológicas.

Num mundo com incertezas, um investidor das indústrias da química e da energia não analisa apenas o retorno financeiro, mas avalia e valoriza também as flexibilidades presentes, pois elas conferem menor risco ao investimento. A reunião

desses resultados aponta a robustez do sistema tecnológico baseado em metanol, e mostra que ele tem as condições de ser usado para suprir as exigências futuras das indústrias da química e da energia. A estruturação desse sistema será executada por um conjunto de atores bem diversificado. Não basta que haja capacidade de produção de metanol, mas é necessário que os novos usos em energéticos se difundam. Essa difusão dependerá de investimentos políticos, econômicos e tecnológicos por parte de governos, e instituições públicas e privadas que possam fazer parte desse sistema.

No que se refere à metodologia utilizada na produção desta tese, verifica-se que ela cumpriu os seus objetivos. Primeiramente, permitiu a identificação das tecnologias, os módulos, que poderiam estar presentes num sistema tecnológico baseado em metanol. Possibilitou também a definição de quais eram as inter-relações entre esses módulos, as interfaces, que em conjunto com os módulos constituem a nova arquitetura, que pode reestruturar as indústrias da química e da energia. Posteriormente, observa-se que a metodologia de avaliação escolhida, a análise qualitativa, foi capaz de testar com significância a viabilidade do sistema tecnológico anteriormente identificado, produzindo respostas que permitiram concluir sobre a sua utilização.

Apesar da tentativa de busca de um estudo de viabilidade o mais completo possível, o decorrer do trabalho demonstrou que existem limitações, atualmente, que dificultam fazê-lo. Tais limitações se encontram principalmente nas diferenças entre as dinâmicas das tecnologias tradicionais e das novas. As primeiras se encontram maduras estando há muito tempo em operação comercial competitiva, o que permite o pleno conhecimento e disponibilidade de informações para a sua análise. As segundas, entretanto, estão em estágio inicial de desenvolvimento, e muitas delas

apresentam somente estudos preliminares ou contam apenas com plantas de laboratório ou piloto, portanto a qualidade e disponibilidade das informações para suas avaliações são muito inferiores às das anteriores. Essa discrepância não permitiu, por exemplo, que se incluísse neste trabalho uma análise econômica comparativa entre as matérias-primas, escalas produtivas e aplicações, o que daria maior amplitude para a avaliação do sistema.

Essas limitações do estudo assim como as pré-condições para a viabilidade do sistema baseado em metanol são os eixos fundamentais para a agenda de pesquisa futura nesse tema. A evolução do desenvolvimento técnico e da participação mercadológica das novas aplicações em energia e da exploração e produção de novas fontes carbônicas fornecerão maiores informações sobre essas tecnologias. Isso exigirá e permitirá um estudo mais abrangente e conclusivo do sistema baseado em metanol, já que sua viabilidade será ainda maior. Deve-se buscar, então, refinar as informações e executar uma análise econômica, que facilitará a avaliação do investidor da química e da energia na opção de produção de metanol e seus derivados.

Os sistemas tecnológicos podem ser avaliados de muitas outras formas. Um outro enfoque importante que pode ser analisado na continuidade desta tese é a inovação no sistema baseado em metanol. Os diferentes estágios de desenvolvimento de aplicações e utilização de matérias-primas permitem discutir a evolução da inovação assim como sua dinâmica futura, que contribuirá para apontar características que auxiliarão no planejamento das pesquisas e desenvolvimentos. Os sistemas tecnológicos são constituídos por tecnologias, mercados, atores e instituições. Os dois primeiros foram enfocados neste trabalho, os dois últimos também podem fazer parte do rol de possibilidades de continuidade desta tese.

Como existe uma grande parcela de potenciais matérias-primas e aplicações em desenvolvimento, o monitoramento permanente desse sistema, com certeza, apontará outros eixos que possam fazer parte da agenda futura de pesquisas desse tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCM - Associação Brasileira de Carvão Mineral Dados Estatísticos de 2007 Disponível em: <http://www.carvaomineral.com.br/abcm/gm_estatisticas.asp> Acessado em nov 2008

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química Anuário da Indústria Química Brasileira, 2008

ABREU P. e MARTINEZ J, Gás natural o combustível do novo milênio , Plural Comuninação, Porto Alegre, 1999

AGUIAR A. C. J., COHEN C., SCHAEFFER R. e SZKLO A. Possível Reestruturação do Mercado Mundial de Petróleo diante da Incidência de uma Taxação de Carbono IBP, Rio Oil&Gás and Conference, 2008

ALBERTA ENERGY Oil Sands Disponível em: <http://www.energy.gov.ab.ca /OilSands/585.asp> Acessado em novembro 2008

ALPEROWICZ N. Methanol-to-olefins complex planned for Nigeria. Chemical Week: New York Vol.164, Num. 39, 14-15, Oct 2, 2002

AMBIENTAL BRASIL Artigos carvão Disponível em: <http://www. ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/carvao/index.html&conteudo= ./energia/carvao/artigos.html> Acessado em outubro 2008

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica Atlas de Energia Elétrica - 2ª Edição -2005 Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download .htm> Acessado em agosto de 2008

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Anuário Estatístico de 2008. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2008 .asp#secao_2> Acessado em novembro 2008

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres – Legislação de transporte de produtos perigosos. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/carga/ pperigoso/pperigoso.asp> Acessado em dez 2007

AUDRETSCH D. B., PRINCE M. Y. e THURIKA. R. Do Small Firms Compete with Large Firms? Atlantic Economic Journal, 27v, 2n,June, 1999

AYCOCK J. Chemical and Power Co-production by Gasification from Iliinois coal 2006 Conference Technology, Washington, 2006 Disponível em: <www.gasification.org/Conference/2006%20Gasification%20Technologies%20Confe rence%20Final%20Program.pdf> Acessado em maio 2008

BAKER J. Stranded Gas Options European. Chemical News, março, 1-7p, 2004

BANISTER J Eliminating smaller flares Global forum flare reduction and gas utilization, Paris, 13-15 dez 2006 Disponível em: <worldbank.org/html/fpd/ggfrforum06/> Acessado em maio 2008

BARNEY J. B. Gaining and Sustaining Competitive Advantage Addison-Wesley, 592p, 1996

BEUREN, I. M. Conceituação e Contabilização do Custo de Oportunidade. Caderno de Estudos da Fipecafi. FEA-USP: São Paulo, abril de1993. Disponível em: <http://www.eac.fea.usp.br/cadernos/completos/cad08/conceituacao.pdf> Acessado em dez 2007

BIODIESEL O que é Biodiesel Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/vantagens/vantagens-biodiesel.htm> Acessado em dez 2007

BIODIESEL BRASIL Produção de Biodiesel Disponível em: <http://www.biodieselbrasil.com.br/ladetel.asp> Acessado em outubro 2008

BOMTEMPO J. V. M., Innovation et organisation, le cas de l'industrie des polymères, Tese de doutorado, Ecole des Mines Paris, 1994

BP (Britsh Petroleum), Statistical Review of World Energy, 2008 Disponivel em: <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622> Acessado em nov 2008a

BRANCO D. A. C. Análise técnica e econômica da aplicação da tecnologia GTL de pequena escala para monetização do GN associado remoto offshore no Brasil. Dissertação de mestrado COPPE/UFRJ, 2008

BRAZ J. Electrochemical energy conversion – methanol fuel cell as example, São Paulo, Chem. Soc.,14v, 4n, 2003

BRUSONI S. Authority in the Age of Modularity DRUID Summer Conference, Copenhagen, 2003

CARLSSON B. e STANKIEVICZ R. (1991), On the Nature, Functions and Composition of Technological Systems, Journal of Evolutionary Economics, vol. 1, pp. 93-118.

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL O que são? Disponível em: < http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/oquesao.html> Acessado em março 2008ª

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL Como funcionam Disponível em: <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/comofuncionam.html> Acessado em março 2008b

CHECKBIOTECH Wageningen Scientists Develop Potato Plants that sustainably Produce 'Platform Chemicals' Disponível em <http://greenbio.checkbiotech.org/news/wageningen_scientists_develop_potato_plants_sustainably_produce_platform_chemicals> Acessado em março 2009

CHEN J.Q., BOZZANO A., GLOVER B., FUGLERUD T., KVISLE S. Recent Advancements in Ethylene and Propylene Production Using the UOP/Hydro MTO Process. Catalysis Today, nº 106, 103–107p, 2005

CHINA BUSINESS Boost for China's coal-chemical sector Disponível em: <http://www.atimes.com/atimes/China_Business/HL21Cb01.html> Acessado em outubro 2008

CHOO C. W., BONTIS N. The Strategic Management of Intellectual Capital and Organizational Knowledge Oxford University Press, 768 p, 2002

CLARK K. B., FUJIMOTO The power of product integrity Harward Business Review, 68v, 107-118p, 1990

CMAI (Chemical Market Associates, Inc.) 2006 World Methanol Analysis Disponível em: <http://www.cmaiglobal.com/Marketing/News/WMA2006.pdf> Acessado em março 2008

CORTEZ, L. A. B.; BAJAY, S. V.; BRAUNBECK, O. Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 66-81, jan./ jun. 1999

DAVENPORT, B., GUBLER, R., AND YONEYAMA, M. Gasoline Octane Improvers Chemical Economics Handbook Marketing Research Report, SRI International, Menlo Park, CA, 2002

DAVID P. Path dependence: putting the past into the future of economics Institute for Mathematical Studies in the Social Sciences Technical Report 533, Stanford University, 1988

DEMIRBAS A.H., DEMIRBAS I. Importance of rural bioenergy for developing countries Energy Conversion and Management, 48, 2007

DMFCC (Direct Methanol Fuel Cell Corporation) The Coming Fuel Cell Revolution Dsponível em: < http://www.viaspace.com/page_energy.php?id=51> Acessado em setembro 2008

DIKEMAN N. The best fuel cell company you've never seen, em abril 2008 Disponível em: <http://news.cnet.com/greentech/?keyword=%22methanol%22> Acessado em novembro 2008

DU BOURG, H.M. Future prospective of DME. In: 23rd World Gas Conference.Amsterdam, Jun. 2006. Disponível em: <http://www.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10696.pdf> Acessado em março 2008

DUNHAM, F. B., BOMTEMPO, J. V., ALMEIDA, E. L. F, BICALHO, R. G. Processos de Produção de Combustíveis Sintéticos: Análise das Trajetórias Tecnológicas. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2002

DURNING A. Other carbon tax shifts: A quick survey of carbon taxes outside of Cascadia – março 2008 Disponível em: http://gristmill.grist.org/story/2008/3/12/10245/6155 Acessado em ,março 2009

EIA (Energy Information Administration) The Role of Renewable Energy Consumption in the Nation's Energy Supply, 2007 Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/cneaf/alternate/page/renew_energy_consump/reec_080514.pdf > Acessado em novembro, 2008a

EIA (Energy Information Administration) Biomass for Electricity Generation Disponível em:< http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biomass/> Acesado em novembro, 2008b

EIA (Energy Information Administration) International Energy Outlook 2008 Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html> Acessado em novembro 2008c

EPA (Environmental Protection Agency) Federal Register 63v, 176p, 48800, 1998

EPPINK J. D. Planing for Strategic Flexibility Long Rande Planing, 11v, 9-15p, 1978

EWING R., Produção global de biodiesel deve crescer 12% ao ano--F.O Licht, Disponível em: <http://br.reuters.com/article/businessNews/idBRN2637632120080826?sp=true> Reuters, 26, 08, 2008

FERREIRA, L. M. e SANTOS, A. C. B. Estudo tecnológico e análise econômica para o uso combustível do DME. Projeto Final de Curso. UFRJ, Escola de Química. Rio de Janeiro, 2006.

FIEDLER, E., GROSSMANN, G., KERSEBOHM, D. B., WEISS, G., AND WITTE, C. "Methanol." Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Release 2003, 6th Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2003.

FLEISCH, T. Promoting new markets for methanol. In: World Methanol Conference.Italy, Dec. 2002. Disponível em: <http://www.spegcs.org/attachments/studygroups/11/2.22.07%20Dr.%20Theo%20Fleisch%20slideshow%20.ppt> Acessado em dezembro 2007

GARCIA R. Combustíveis e Combustão Industrial Interciência: Rio de Janeirp, 2002p, 2002

GARUD R. e KUMARASWAMY A. Technological and Organizational Designs for Realizing Economies of Substitution Strategic Management Journal; 16v, 93p, 1995

GEELS F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case study, forthcoming in Research Policy, 2001

GEORGI S Medis Presents its Micro Fuel Cell as“ready-to-go” for the Retail Market at the 2006 Consumer Electronics Show Disponível em: <http://www. batteriesdigest.com/fuel_cell_micro_medis.htm> Acessado em novembro 2008

GLASKOWSKY P. Methanol fuel cells-- how cost-efficient are they?, dezembro 2007 Disponível em: <http://news.cnet.com/greentech/?keyword= %22methanol%22> Acessado em novembro 2008

GOLDEN W. E POWELL P. Towards a Definition of Flexibility: in Search of the Holy Grail? Omega 28, 373-384p, 2000

GONZALES R Biofuel feedstock: ís there enough. PTQ – Petroleum Technology Quarterly, 9-10, Q1 2008a

GONZALES R Are refiners ready for gasification. PTQ – Petroleum Technology Quarterly, 9-10, Q1 2008b

GOOD CLEAN TECH, Mitsubishi's 300W Portable Fuel Cell Can Power Electric Wheelchairs Dispojível em: <> Acessado em novembro 2008

HACKMAN, J. R. e OLDHAM, G. R.. Work Redesign. Reading, MA: Addisom-Wesley, 1980

HAHN A. V. G. The Petrochemical Industry Markets and Economics New York: Mc Graw-Hill, 620p,1970

HANCOCK, E. G. The manufacture of gasoline and the chemistry of its components. Critical Reports on Applied Chemistry, 10(Technol. Gasoline), 20-56p, 1985

HARIHARAN M. Assam's mini methanol project ICIS, June 4, 2008 Disponivel em: <http://www.icis.com/blogs/india-chemicals/2008/06/assams-mini-methanol-project.html> Acessado em Janeiro 2009

HEYDORN E.C., STEIN V. E., STREET B. T., KORNOSKY R.M. Liquid Phase Methanol (LPMEOH™) Project Operational Experience. Disponível em: <http:// www.gasification.org/Docs/1998_Papers/gtc9807p.pdf> Acessado em março 2008

HENDERSON R. M. e CLARK K. B. Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms Administrative Science Quarterly, Vol. 35, No. 1, Special Issue: Technology, Organizations, and Innovation , 9-30, 1990

HENRIKSEN A. P. E TRAYNOR A. J. A Practical R&D Project-Selection Scoring Tool IEEE Transactions on Engineering Management, 46v, nº 2, maio 1999

HOLLANDA E. Nos campos do Pré-sal Disponível em: <http://www. revistabrasileiros.com.br/edicoes/14/textos/282/> Reuters, Edição 14 de setembro de 2008

HUANG, Z. An overview of DME activities in China. In: 2nd International DME Conference. London, maio 2006

HUGHES T. The Evolution of large technological System MIT Press, 51-82p, 1987

ICIS Plants and Projects Search Disponível em: <http://www.icis.com/v2/directory/default.aspx> Acessadp em dezembro 2008ª

ICIS Methanol Prices and Pricing Information Disponível em : <http://www.icis.com/v2/chemicals/9076034/methanol/pricing.html> Acessado em: dezembro 2008b

ICIS Alberta, Canada could be the next petrochemical hub thanks to its oil sands, 173v, issue 19, 05 de maio, 2008c

ICIS Mitsui bilds CO2 based methanol line, 174v, issue 1, 01 de julho de 2008d

ICIS Formaldehyde Uses and Market Data Disponível em : http://www.icis.com/v2/chemicals/9076013/formaldehyde/uses.html Acessado em setembro 2008e

ICIS Acetic Acid Uses and Market Data Disponìvel em: < http://www.icis.com/v2/chemicals/9074779/acetic-acid/uses.html> Acessado em outubro 2008f

ICIS Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) Uses and Market Data Disponível em: <http://www.icis.com/v2/chemicals/9076054/methyl-tertiary-butyl-ether/uses.html > Acessado em outubro 2008g

ICIS , Industry seeks alternative feedstocks as oil price continues to surge Chemical Business, 173v, issue 11, março 2008h

ICIS China's economic boom causes environmental crisis Black cloud over China, 173v, issue 5, 30 Janeiro 2008i

IMPCA - International Methanol Producers and Consumers Association Methanol Disponível em: <http://www.impca.be/en/about_methanol>. Acessado em nov 2007

INT (Instituto Nacional de Tecnologia). DME: O combustível do futuro. Cadernos de Tecnologia, número 01, 2005

JACOBSSON E BERGEK, Transforming the Energy Sector: The Evolution of Technological Systems in Renewable Energy Technology Governance for Industrial Transformation. Proceedings of the 2003 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change, Environmental Policy Research Centre: Berlin. pp. 208 - 236, 2003

JACOBSSON, S. e JOHNSON, A.- The Diffusion of Renewable Energy Technology: Analytical Framework and Key Issues for Research. Energy Policy, 28, 2000, 625-640p, 2000

KAM, A. Y., SCHREINER, M., AND YURCHAK, S.. Chapter 2-3: Mobil Methanol-to-Gasoline (MTG) Process Handbook of Synfuels Technology, R. A. Meyers, ed.,McGraw-Hill Book Company, New Tork, 1984

KARMALIC J. US Rule Change Open Door for Methanol, ICIS Chemical Business, 5-11 maio, 2008

KEIL, F. J. Methanol-to-hydrocarbons: process technology Microporous and Mesoporous Materials, 29, 49-66p, 1999

KEMSLEY J, Methanol's allure Chemical & Engineering News , 85v, 49n, 55-59p, 2007

KING D. L., GRATE J. H.. Look what you can make from methanol.Chemtech, 15(4), 244-51, 1985

KLINE C. H. Maximizing costs in Chemicals Chemtec, 110-117, fevereiro 1976

KORDESCH K., SIMADER G., "Fuel Cells and their applications", VCH Publishers, (1996), G. Fuel Cells and their applications VCH Publishers, 1996

KUMAR B. V. R. Gasification Technology for Substitution of Furnace Oil in Reheating Furnaces of Rolling Mills Disponível em: <http://www.bee-india.nic.in/sidelinks/Useful%20Downloads/Presentation%20seminars/G%20T%20for%20Rolling%20Mills/Gasification%20Technology%20for%20Rolling%20Mills.pdf> Acessado em maio 2007

LARMINIE J., "Fuel Cells", Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2002

LEFFLER W.L. Petroleum Refining PennWell Corp: Oklahoma, 3rd edition, 309p, 2000

LEPRINCE P. Petroleum Refining: Conversion Process Edition Technip: Paris, 668p, 2001

LERNER I. Methanol's big squeeze ICIS Chemical Business Americas; Sep 11-Sep 17, pagina 30, 2006

LIEBNER W., SCHLICHTING H. (Lurgi AG) B, C, G, XtL - what else? Lurgi's Routes to Transportation Fuels International Conference on IGCC & XtL, Freiberg, 16-18th June, 2005 disponível em:< http://www.tu-freiberg.de/~wwwiec/ conference/ conference_05/pdf/05_Schlichting.pdf?PHPSESSID=d59188a61c78259c4f43838c7aa5353d Acessado em Jan 2008

LINDE Electricity without carbon dioxide Disponível em: < http://www.linde.com/international/web/linde/like35lindecom.nsf/repositorybyalias/pdf_lindetechnology_1_2006/$file/Linde_Technology_1_2006_EN.pdf > Acessado em dez 2008

LOOTTY M. e SZAPIRO M.. “Economias de Escala e Escopo”, em: Kupfer D., Hasenclever L. (org.), Economia Industrial: Fundamentos Teóricos e Práticas no Brasil. 1ª Edição, Capítulo 3, Rio de Janeiro, Ed. Campos, p. 43-70, 2002

LURGI B, C, G, XtL - what else? Lurgi’s Routes to Transportation Fuels International Conference on IGCC & XtL Freiberg, 16-18th June, 2005 Disponível em: <> Acessado em maio 2008

LURGI Methanol Disponível em: <http://www.lurgi.com/website/fileadmin/user_upload/pdfs/17 Methanol-EN.pdf> Acessado em março 2008ª

LURGI Methanol-to-Propylene-MTP Disponível em: <http://www.lurgi.com/website/fileadmin/user_upload/pdfs/19_Methan-Propylen-E_rev060707.pdf> Acessado em março 2008b

MACKENZIE, D. e WAJCMAN, J. - "The Social Shaping of Technology", Second Edition. Open University Press: Buckingham, 420 p, 1998

MCCOV M., Coal-To-Methanol Plant Planned For West Virginia Chemical & Engineering News, 85v, 31n, 30 julho, 2008

MCKENDRY P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass Bioresource Technology, 83v, 37–46p, 2002

MESSIRI T. Mini-Methanol Plant Presentation in Global Fórum: Flaring Reduction and Gás Utilisation, 2006 Disponível em: <www.worldbank.org/html/fpd/ggfrforum06/belguedj/messiri.ppt> Acessado em janeiro 2009

METAPROCESS Metaprocess utilizes associated petroleum gas beyond the polar circle Disponível em; http://www.metaprocess.ru/eng/news/articles/metaprocess_utilizes_associated_petroleum_gas_be.html> Acessado em Janeiro 2009

METHANEX Annual Report 2003, Fevereiro 2004 Disponível em:< http://www.methanex.com/investor/annualreports/03_anrpt.pdf#search=%22evolution%20of%20prices%22> Acessado em abril 2008

METHANEX Investor Presentation, September 2007 Disponível em:< http://www.methanex.com/investor/documents/Q3complete_handouts.pdf> Acessado em abril 2008

METHANEX Investor Presentation, Jun 2008 Disponível em: <http://www.methanex.com/investor/documents/June2008.pdf> Acessado em outubro 2008a

METHANEX Methanex Monthly Average Regional Posted Contract Price History Disponível em: <http://www.methanex.com/products/documents/MxAvgPrice_Oct302008.pdf> Acessado em novembro 2008b

METHANEX Annual Report 2007, Fevereiro 2008 Disponível em: <http://www.methanex.com/investor/documents/2007AnnualReport.pdf#search=%22Anual%20report%202007%22> Acesso em abril 2008c

METHANOL INSTITUTE Milestones 2008 Disponível em <http://www.methanol.org/pdf/2008Milestones.pdf> Acessado em outubro 2008ª

METHANOL INSTITUTE Technical Information & Safe Handling Guide for Methanol Disponível em: <http://www.methanol.org/pdf/MethanexTISHGuide.pdf> Acessado em julho 2008b

METHANOL INSTITUTE Health Effects Fact Sheet Disponível em: <http://www.methanol.org/pdf/67-56-1_SIAP%20Final.pdf> Acesso em Jan/2008c

METHANOL INSTITUTE World Methanol Plants Disponível em: <http://www.methanol.org/pdf/WorldMethanolPlantsEndOf2006.pdf> Acessado em dezembro 2008d

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA (MJ) Portaria nº 1274/2003 disponível em: <http://siproquim.dpf.gov.br/spq/index.html Acessado dez 2007

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTB) Portaria nº 3.214/78 - NR 15 – anexo 11 Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15.pdf> Acesso dez 2007

MMSA (Methanol Market Service Ásia) Formaldehyde Disponível em :http://www.methanolmsa.com/exec/sam/view/id=189/node=116/ Acessado em out 2008ª

MMSA (Methanol Market Service Ásia Acetic acid Disponível em :< http://www.methanolmsa.com/exec/sam/view/id=194/node=117/> Acessado em out 2008b

MTI micro Mobion Disponível em: <http://www.mtimicrofuelcells.com/technology/ > Acessado em outubro 2008

NATIONAL ENERGY BOARD (Canadá). Canada's oil sands, opportunities and challenges to 2015: na update, 2006. Disponível em: http://www.neb 9 one.gc.ca/energy/EnergyReports/EMAOilSandsOpportunitiesChallenges2015_2006/EMAOilSandsOpportunities2015Canada2006_e.pdf> Acessado em novembro 2007

NATIONAL ENERGY BOARD Energy Conversion Tables Disponível em; <http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/sttstc/nrgycnvrsntbl/nrgycnvrsntbleng.html#a_s_04_ss_02> Acessado em novembro 2008

NELSON, R. e WINTER, S. In search of a useful theory of innovations. Research Policy, 6v, 36-76p, 1977

NETL (National Energy Technology Laboratory). Oil Shale Development in the United States. Disponível em: http://www.netl.doe.gov/energyanalyses/pubs/Oil%20Shale%20Development%20in%20the%20United%20States%20%20RAND%20August%20200.pdf, 2005 . Acesso em julho 2008ª

NETL (National Energy Technology Laboratory). The National Methane Hydrates R&D Program. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oilgas/FutureSupply/MethaneHydrates/MH_ReferenceShelf/RefShelf.html.> Acesso: julho 2008b

NEVES, C. Análise de investimentos: Projetos Industriais e Engenharia Econômica Rio de Janeiro: Guanabara, 1981

NIEMEYER M. A. L. Utilização De Publicações Científicas em Estudos de prospecção da Inovação – Caso Dimetil Éter (DME) e sua Aplicação como Combustível Dissertação de mestrado EQ/UFRJ, 2007

NOOTEBOOM, B. "Innovation and Diffusion in Small Firms: Theory and Evidence," Small Business Economics, 6, 1994, pp. 327-47

OHNO, Y. YAGI, H. INOUE, N. OKUYAMA, K. AOKI, S. Slurry phase DME direct synthesis technology. Em: Natural gas conversion symposium, Brasil, Maio, 2007.

OLAH G.A., GOEPPERT A., PRAKASH G. K. S. Beyond Oil and Gás: The methanol economy. WILEY- VCH: Weinheim, 290p, 2006

OLIVEIRA M. Biodiesel em ascensão, 2007, Disponível em: http://www.agencia.fapesp.br/boletim_dentro.php?id=7013 Acessado em maio 2008

OLIVEIRA, T. Um estudo de prospecção e de estratégias de inovação: O caso dimetil éter (DME) e seu uso como combustível. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Escola de Química. Rio de Janeiro, 2005

OWEN, K., COLEY , T. Automotive fuels reference book, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1995

PAVITT K., TIDD J., BESSANT J. - Managing Innovation John Wiley & Sons: New York, 1997

PDVSA Faja Petrolífera del Orinoco. Disponível em: http://www.pdvsa.com. Acessado em agosto 2008

PEREZ, C. Technological Revolutions, Paradigm: Shifts and Socio-institutional Change Disponível em:<http://www.carlotaperez.org/papers/basictechnological revolutionsparadigm.htm#comienzo> Acessado em março 2008

PERROW, C. Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. New York: Basic Books, 1984

PETERS, U., NIERLICH, F., SCHULTE-KÖRNE, E., SAKUTH M., DEEB R., LAUGIER M., SUOMINEN M., AND KAVANAUGH M. "Methyl tert-Butyl Ethyl." Ullmann's Encyclopedia ofIndustrial Chemistry Release 2003, 6th Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2003

PETROBRÁS, Manual de Procedimentos de Estimativas de Reservas Disponível em: < http://www2.petrobras.com.br/ri/port/DestaquesOperacionais/ ExploracaoProducao/ ManualProcedimentos_EstimativasReservas.asp> Acessado em setembro 2008

PHILIPS J. Coal Gasification. disponivel em: <http://www.gasification.org/ Docs/Bismarck%2006/01Phillips.pdf> Acessado em dezembro 2007

PINDYK R. S. e RUBINFELD D. L. Microeconomia Printice Hall: São Paulo, 5ª ed, 711p, 2002

POH K. L., ANG B. W. e BAI F. A Comparative Analysis of R&D Projects Evaluation Methods R&D Managemente, 31, 1v, 2001

POLY FUEL Polyfuel Discloses Prototype Notebook Computer Fuel Cell Power Supply Disponível em: <http://www.polyfuel.com/pressroom/ press_pr_071608.html> Acessado em novembro 2008

PORTER, M. E e CAVES, R. E. "From Entry Barriers to Mobility Barriers," Quarterly Journal of Economics, 91, 1977, pp. 241-61

PORTER M. Clusters and Competition. New agendas for companies, governments and institutions. In: Porter, M. (ed.): On Competition. A Harvard Business Review Book, Boston, 197-287P, 1998

PRAKASH S. G. K. Entrevista realizada durante o 48º Congresso Brasileiro de Química, patrocinado pela Associação Brasileira de Química (ABQ), no Rio de Janeiro, Brasil em 30 de setembro de 2008

QI D.H., LIU S. Q., ZHANG C.H., BIA Y. Z. Properties, performance, and emissions of methanol-gasoline blends in a spark ignition engine Journal of Automobile Engineering Volume 219, Number 3, 2005

REUSS, G., DISTELDORF, W., GAMER, A. O., AND HILT, A. (2003). "Formaldehyde." Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Release, 6th Edition, Wiley-VCH VerlagGmbH & Co.KGaA, 2003

REUTERS UOP Technology Licensed to Eurochem to Convert Methanol to Olefins in New Nigerian...Disponível em:<http://www.reuters.com/article/ pressRelease/idUS183557+30-Jan-2008+BW20080130> 30 janeiro, 2008

RICHARDSON G. B. The Organization of Industry Re-visited DRUID Summer Conference, 2003

RICHARDSON J. China's government tightens environmental enforcement Chemical Business, 273v, 9i, 2008

ROCHA J. D. Gaseificação de Biomassa - Histórico e Conceitos Básicos Disponível em: < http://www.cenbio.org.br/pt/index.html> Acessado em fevereiro 2008

ROSCOE J. Methanol Industry Overview and Prospects for Offshore Methanol Global Forum Flare Reduction and Gas Utilization, Paris, 13-15 dez 2006 Disponível em: <worldbank.org/html/fpd/ggfrforum06/pariente/roscoe.ppt> Acesso em maio 2008

ROSENBERG N. Exploring the Black Box: Technology, economics and history Cambridge University Press, 274p, 1994

ROSENBERG N., Por dentro da Caixa Preta Editora Unicamp, Campinas, 430p, 2006

ROSTRUP-NIELSEN, J. R; e NIELSEN R. Catalysis Reviews Science and Engineering, 46v, 3-4i, 247-270, 2004

SANCHES R The Strategic Management of Intellectual Capital and Organizational - Cap 13: Modular Product and Process Arquiteture: Frameworks for Strategical Organization Learning Oxford University Press: London, 2002 Disponível em:<http://books.google.com/books?id=n57fm9fO7woC&printsec=titlepage&dq=Garud+and+Kumaraswamy,+1995&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_toc_s&cad=1#PPR3,M1> Acessado em fevereiro 2008

SBI (Specialists in Business Information) U.S. Market for Batteries Disponível em:< http://www.sbireports.com/Batteries-1740972/> Publicado em 01 de maio 2008

SCHERER F. M. e ROSS D. Industrial Market Structure and Economic Performance Boston : Houghton-Mifflin, 713p,1990

SCHUMPETER, J.S. Business Cycles, McGraw-Hill, New York, 1939

SHEPERED, W. The economies of industrial organization.New Jersey: Prentice-Hall, 560p, 1996

SILVA V. S. C. F. Direct methanol fuel cell: Analysis based on experimentation and modeling Tese de doutorado em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto – Portugal, 2005

SILVA C. M. S. O Papel da Flexibilidade na Integração dos Mercados Agrícola e Energético Tese de doutorado IE/UFRJ, 2008

SMITH A. An Inquiry Into the Nature and Causes of the Wealth of Nations Ed W. Strahan and T. Cadell: Londres, 1776 Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/The_Wealth_of_Nations> Acessado em abril 2008

SPATH, P. L. AND DAYTON, D. C. Preliminary Screening — Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas NREL/TP-510-34929, 2003

SPE (Society of Petroleum Engineers) Glossary of Terms Used in Petroleum Reserves/Resources Definitions Disponível em: <http://www.spe.org/spe-site/spe/spe/industry/reserves/Glossary PetroleumReserves-ResourcesDefinitions_2005.pdf> Acessado em novembro 2008

SPITZ P. H. Petrochemicals: The rise of na industry New York: John Willey e Sons. 586p, 1988

SRI CONSULTING Chemicals from Biomass Disponível em: http://www.sriconsulting.com/SSC/Public//biomass/BiomassPop.html Acessado em novembro 2008

STOKES R. G.Opting for oil: The political economy of Technological Change in the West German Chemical Industry, 1945-1961, Cambrige University Press, 259p, 1994

SYNETIX Technology Disponível em: <http://www.jmcatalysts.com/pct/marketshome.asp?marketid=26&id=305&toolbar=> Acessado em março 2008

SZKLO A. S. e ULLER V. C. Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia Ed Interciência: Rio de Janeiro, 285p, 2008

TECNON ORBICHEM The Renaissance of Coal-based Chemicals: Acetylene, Coal-to-Liquids, Acetic Acid, 2006 Disponível em: <http://www.tecnon.co.uk/gen/uploads//syezuu55kgu0ok55epcqomjf12052006115942.pdf> Acessado em março 2008

THE ECONOMIST Coal Bed Methane: Canary in a Coal Mine 28 de junho, 2008a

THE ECONOMIST The power and the glory: A special report on energy, 21 de junho de 2008b

THACKERAY F., LECKIE G. Stranded gas: a vital resource Petroleum Economist, 69 no5, 10-12, 2002

THOMAS J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo Interciência: Rio de Janeiro, 267p, 2001

THURMOND W. Biodiesel 2020: A Global Market Survey, Vol. 2, 2007 Disponivel em: <http://www.emerging-markets.com/biodiesel/default.asp> Acessado em dezembro 2007

TOSHIBA Frequently Asked Questions about Toshiba Fuel Cell Technology Disponível em: <http://toshiba.com/taec/components/Generic/DMFC_FAQ.pdf> Acessado em out 2008

TRINIDAD AND TOBAGO NEWS, Methanol as fuel, 2007 Disponível em: <http://www.trinidadexpress.com/index.pl/article_archive?id=161174087> Acessado em maio 2008

UDOMI Fuel Cell Systems Disponível em: <http://www.udomi.de/products/fuelcellsystems-e.html> Acessado em novembro 2008

UOP UOP/HYDRO MTO Process Methanol to Olefins Conversion Disponível em: < http://www.uop.com/objects/MTO.pdf> Acessado em março 2008ª

UOP ATOFINA/UOP Olefin Cracking Process for Ethylene and Propylene Production Disponível em: http://www.uop.com/objects/ATOFINA_Olefin_Cracking_process.pdf> Acessado em março 2008b

US DEPARTAMENT OF ENERGY Hidrato de metano overview 2007 Disponível em: http://fossil.energy.gov/programs/oilgas/publications/methane_hydrates/MHydrate_overview_06-2007.pdf> Acessado em novembro 2008

USGS (U.S. Geological Survey) Energy Resources Disponível em: < http://energy.usgs.gov/energysources.html> Acessado em outubro 2008

USHIMA A. D. Aspectos tecnológicos de Gaseificadores e Sistema de Limpeza de Gases Disponível em: < http://www.cenbio.org.br/pt/index.html> Acessado em fevereiro de 2008

UTTERBACK J. M. e ABERNATHY W. J. Patterns of Industrial Innovation Technology Review 80 (7), pp. 40–47,1978

UTTERBACK, J. M Mastering the Dynamics of Innovation. Harvard Business School Press, Boston, Mass USA. pp.79-144, 176-187, 1994

VERNERET H. Solventes Industriais: Propriedades e Aplicações São Paulo: Ed Toledo, 146p, 1984

VOLKSWAGEN MTSynfuels® (Methanol-to-Synfuels)Process Disponível em: <http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/content/en/innovation/fuel_and_propulsion/production/putting_the_sun_into_your_fuel_tank/mtsynfuels_process.html> Acessado em março 2008

WEIDOU, N.; LIJIAN, T.; DEWEI, F. Rational cognition of DME market in China.In: 2nd International DME Conference. London, May 2006

WENDER, I. Reactions of synthesis gas Fuel Processing Technology, 48(3), 189-297P, 1996

WITTCOFF H. A., REUBEN B. G., PLOTKIN J.S. Industrial Organic Chemicals New Jersey: Jonhn Willey & Sons, 662p, 2002

WITTEVEEN M. Coal in a new, carbon constraint era: How the markets adjust.Barclays Capital, 2005 Disponível em: <http://www.cass.city.ac.uk/ conferences/ energy/files/meindert%20witteveen.pdf Acessado em novembro 2008

WORLD BANK Global Gas Flaring Reduction Partnership Disponível em: http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTOGMC/EXTGGFR/0,,menuPK:578075~pagePK:64168427~piPK:64168435~theSitePK:578069,00.html> Acessado em Dezembro 2008

WORLD COAL INSTITUTE. Coal and the Environment. Disponível em: <http://www.worldcoal.org/assets_cm/files/PDF/coalminingandtheenvironment.pdf.> Acessado em maio/2007

WORLD ENERGY COUNCIL Survey of Energy Resources 2007 Natural Bitumen - Economics of Production, Transportation, and Refining Technology Disponível em: <http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/natural_bitumen_and_extraheavy_oil/655.asp Acesso em outubro 2008a

WORLD ENERGY COUCIL New Technology for Tight Gas Sands. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/wecgeis/publications/default/tech_papers/17th_congress/2_1_16.asp#top>. Acesso em agosto 2008b