COPPE/UFRJ

AVALIAÇÃO PROSPECTIVA DAS ROTAS DE BIO-REFINARIA NO BRASIL, A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA BÁSICA

Rômulo Neves Ely

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

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro

Dezembro de 2009

AVALIAÇÃO PROSPECTIVA DAS ROTAS DE BIO-REFINARIA NO BRASIL, A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA BÁSICA

Rômulo Neves Ely

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

Examinada por:

_____
Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

_____
Prof. Roberto Schaeffer, PhD

_____
Prof. Maurício Cardoso Arouca, D.Sc.

_____
Prof. Peter Rudolf Seidl, PhD

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2009

Ely, Rômulo Neves

Avaliação Prospectiva das Rotas de Bio-refinaria no Brasil, a partir do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica - RJ / Rômulo Neves Ely – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2009.

XV, 215 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 171-180.

1. Bio-refinaria. 2. Planejamento Energético. 3. Biomassa. 4. Economia Industrial. I. Szklo, Alexandre Salem II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Titulo.

Aos meus pais e meu irmão.

"... só porque nenhum pintor conseguiu fazer um retrato inteiramente igual ao modelo, devemos concluir que a melhor pintura é não pintar?"

"Por mais hábil que seja o trabalhador, sua liberdade é sempre limitada pelas propriedades da matéria-prima sobre a qual opera."

"... a história geológica nos mostra que a vida não é mais que um curto episódio entre duas eternidades de morte e que, nesse próprio episódio, o pensamento consciente não durou e não durará mais que um momento. O pensamento não é mais que um clarão em meio a uma longa noite.
Mas este clarão é tudo."

Henri Poincaré em "O Valor da Ciência"

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Alexandre Salem Szklo pela excelente dedicação não só na tarefa de me orientar neste trabalho como em suas aulas no Programa de Planejamento Energético que contribuíram muito para a minha formação durante todo o período do Mestrado. Sua orientação representa exatamente o que eu buscava de um orientador e suas aulas como eu acho que deve ser um professor. Um exemplo a ser seguido.

Devo agradecer também aos professores Roberto Schaeffer, Luiz Fernando Legey e Lúcio Guido, que também contribuíram muito na minha formação neste período. Ao Guido devo especialmente agradecer-lhe por ter-me sugerido o tema deste trabalho, a meu ver, desafiador e, inclusive, incentivado que me candidatasse ao programa de mestrado do IT Promon (Instituto de Tecnologia Promon).

À Promon agradeço por ter me custeado neste período, através do IT Promon. Sua iniciativa em investir em pesquisa é extremamente louvável, pois o país carece de empresas privadas com esta atitude, criando uma ponte entre o meio acadêmico e o mercado. Acredito que o "salto" em desenvolvimento que se espera do Brasil deve ser calcado em ações como essa. Com inovação e planejamento é mais provável elevar o nível de competitividade do país.

Dos profissionais da Promon, agradeço ao Lucas Ribeiro por ter participado desde o inicio do processo de construção desse trabalho. Mesmo que tenhamos conversado menos do que gostaríamos, sempre encarei suas colocações com muita seriedade, como uma oportunidade de estar próximo de um profissional de fora da academia, o que é muito valioso.

Agradeço também aos funcionários do PPE, sempre muito eficientes e dispostos a ajudar. Em especial cito a Sandra, Simone, Paulo, Fernando, Claudia, Mônica e Rita.

À banca por ter aceitado examinar este trabalho.

Aos meus amigos, que ainda bem são muitos, agradeço enormemente, pois sei que vocês contribuíram indiretamente e até diretamente para que esta Dissertação fosse

concretizada (a alguns grandes amigos, continuo repetindo, só atrapalharam, mas isso não tem o menor problema, por favor, continuem assim).

Amigos do Santo Inácio, Faculdade, PPE, “da vida”, agradeço a todos. Em especial devo destacar o Victor e sua família que me deram muita força para que eu ingressasse no PPE em um momento de minha vida que eu havia perdido uma batalha e precisava muito de um incentivo. Saibam que sou eternamente grato.

Ao IMPA (Instituto de Matemática Pura e Aplicada) por me permitir utilizar sua agradável sala de estudos para escrever esta Dissertação.

Por último, mas não menos importante (muito pelo contrário), agradeço a meu pai, minha mãe e meu irmão, por tudo.

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

AVALIAÇÃO PROSPECTIVA DAS ROTAS DE BIO-REFINARIA NO BRASIL, A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA BÁSICA.

Rômulo Neves Ely

Dezembro / 2009

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

Bio-refinarias têm sido apontadas ora como uma alternativa às refinarias de petróleo ora como um complemento. Este trabalho busca compreender essas unidades industriais aplicadas ao caso brasileiro, que tem no setor sucroalcooleiro uma quantidade de material lignocelulósico (bagaço de cana-de-açúcar) sendo produzido em grandes quantidades como resíduo do processo de produção de açúcar e álcool. Neste caso, serão trabalhadas as rotas tecnológicas que têm possibilidade de utilizar esse produto como principal matéria-prima de seus processos industriais. Assim, um modelo com base em um conjunto de variáveis econômicas e tecnológicas é aplicado às rotas. Neste, diferentes perfis de plantas de bio-refinaria são definidos e confrontados com diferentes regiões hipotéticas, as quais são caracterizadas pela combinação tanto de acesso a diferentes quantidades de matéria-prima quanto de tipos distintos de mercado consumidor. Em suma, neste trabalho é realizado um modelo de competição e localização das principais rotas tecnológicas de bio-refinaria que têm o bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica no Brasil.

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

PROSPECTIVE EVALUATION OF BIOREFINERY ROUTES IN BRAZIL, FROM SUGAR CANE BAGASSE AS A BASIC FEEDSTOCK.

Rômulo Neves Ely

December / 2009

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

Biorefineries have been identified either as an alternative to oil refineries or as a supplement. This work seeks to understand these plants applied to the Brazilian case, which has in the *sucroalcooleiro* sector a large number of lignocellulosic material (sugar-cane bagasse) produced in large escale as a residue of the process of sugar and alcohol production. In this case, technological routes that are able to use this product as a basic feedstock for the industrial process will be described. Therefore, a model based on a set of economical and technological variables is applied to the routes. In this model, different profiles of biorefinery plants are described and compared with different hypothetical regions, which are characterized by a combination of both access to different amounts of raw material and different types of consumers. Overall, this work describes a model of both location and competition of the main biorefinery technological routes in Brazil that have the sugar-cane bagasse as the basic raw material.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 8

1.1 - ECONOMIA DE ESCALA 10

1.1.1 - Fontes de economia de escala 13

1.1.2 - Modularidade e economia de escala 20

1.1.3 - Economia de escala em refinarias de petróleo 25

1.1.4- Modularidade na produção de combustíveis líquidos 32

1.2 - ECONOMIA DE ESCOPO 36

1.2.1 - Fontes de economia de escopo 37

1.2.2 - Economia de escopo em refinarias de petróleo 39

1.3 - FLEXIBILIDADE 44

1.3.1 - Flexibilidade no refino de petróleo 46

1.4 – DIFERENCIAÇÃO 49

1.4.1 - Diferenciação no refino (e distribuição) de petróleo 50

1.5 - DIREÇÕES DO PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO 55

CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE RELAÇÃO: VARIÁVEIS ENDÓGENAS E EXÓGENAS À BIOREFINARIA 61

2.1 – RELAÇÃO DO GRAU DE ECONOMIA DE ESCALA COM LOCALIZAÇÃO E COMPETIÇÃO 61

2.1.1 – Construção das "matrizes de relação" baseadas no grau de economia de escala, acesso aos insumos e mercado consumidor 64

2.2 - RELAÇÃO DO GRAU DE ECONOMIA DE ESCOPO COM LOCALIZAÇÃO E COMPETIÇÃO 68

2.2.1 - Construção de "matrizes de relação" baseadas no grau de economia de escopo e perfil do mercado consumidor 69

2.3 – RELAÇÃO DO GRAU DE FLEXIBILIDADE COM LOCALIZAÇÃO E COMPETIÇÃO 70

2.3.1 – A flexibilidade como complementação 72

2.4 – A FUSÃO DAS "MATRIZES DE RELAÇÃO" 74

2.5 – RELAÇÃO DO GRAU DE DIFERENCIAÇÃO COM LOCALIZAÇÃO E COMPETIÇÃO 76

2.5.1 – A contribuição da diferenciação 77

2.6 – RELAÇÃO DA DIREÇÃO DO PROCESSO DE DIVERSIFICAÇÃO COM LOCALIZAÇÃO E COMPETIÇÃO 78
2.6.1 – A contribuição da análise das direções do processo de diversificação..... 80
2.7 – "MATRIZ DE RELAÇÃO" COMPLETA 81
2.8 – A APLICAÇÃO NO REFINO DE PETRÓLEO 83
2.8.1 – Definição das linhas..... 84
2.8.2 – Definição das colunas 86
2.8.3 – Análise da alocação das diferentes configurações de refinarias de petróleo na "matriz de relação" completa..... 87

CAPÍTULO 3 – ROTAS ALTERNATIVAS DE BIO-REFINARIAS A PARTIR DE BAGAÇO DE CANA 90

3.1 – HIDRÓLISE..... 92
3.2 - MIXALCO 108
3.3 – GASEIFICAÇÃO/SYNGAS 113
3.4 – PIRÓLISE/ BIO-ÓLEO 130
3.5 - ROTAS TECNOLÓGICAS 138

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO: ESTUDOS DE CASO 142

4.1 – ETAPAS 1 E 2: DETERMINAÇÃO DE COMBINAÇÕES COMPATÍVEIS 145
4.2 – ETAPA 3: QUANTIDADE DE MATÉRIA-PRIMA E PERFIL DO MERCADO CONSUMIDOR 147
4.3 – ETAPA 4: COMPOSIÇÃO DAS VARIÁVEIS ENDÓGENAS DAS ROTAS SINTETIZADAS NO ITEM 3.5 152
4.3.1 – Grau de economia de escala estática e dinâmica: "Vertente Escala"..... 152
4.3.2 – Grau de economia de escopo e flexibilidade: "Vertente Escopo" 155
5.3.3 – Diferenciação e Diversificação: varáveis relacionadas à competição 157
4.4 – ETAPA 5: SELEÇÃO DE ROTAS MAIS INDICADAS PARA OPERAR NAS REGIÕES HIPOTÉTICAS SELECIONADAS 164

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 168

REFERÊNCIAS 172

APÊNDICE I..... 182

APÊNDICE II 189

APÊNDICE III..... 192

III.1 – PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR: PARTE AGRÍCOLA 193

III.2 – PRODUÇÃO DE AÇÚCAR, ÁLCOOL E ENERGIA: PARTE INDUSTRIAL 199

III.3 – QUANTIDADE DE BAGAÇO DISPONÍVEL..... 205

GLOSSÁRIO

AF – air/fuel

Afex – ammonia fiber explosion

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bio-combustíveis

ATR – reforma autotérmica

CBP – consolidated bioprocessing

CIM – computer integrated manufacturing

CMe – custo médio

CMg – custo marginal

CTR – combined or two-step reforming

DME – dimetil éter

DMF – dimetil furfural

DMFC – direct-methanol fuel-cel

EME – escala mínima eficiente

EUA – Estados Unidos da América

EVL – ethyl levulinate

FBR – fixed bed reactor

FC – fator de capacidade

FCC – craqueamento catalítico fluidizado

FT – Fischer Tropsch

GLP – gas liquefeito de petróleo

GNL – gas natural liquefeito

GTL – gas to liquid

GVL – γ valerolactona

HCC – hidrocraqueamento catalítico

HDA – hidrodesaromatização

HDO – hidrodesoxigenação

HDS – hidrodessulfurização

HDT – hidrotratamento

HFO – óleo combustível pesado

HMF – hidroxi-metil furfural

IAD – índice antidetonante

IGCC – integrated gasification combined cycle

P&D – pesquisa e desenvolvimento

POX – partial oxidation

QAV – querosene de aviação

RFCC – FCC de resíduos

RPT – razão de progresso técnico

RS – Rio Grande do Sul

SBCR – slurry bubble column reactor

SC – Santa Catarina

SHF – separate or sequential, hydrolysis and fermentation

SIG – service de informação geográfica

SMF – flexible manufacturing systems

SMR – steam methane reformer

SSCF – simultaneous saccharification and fermentation

SSF – simultaneous saccharification and fermentation

TFBR – tubular fixed bed reactor

UDA – unidade de destilação atmosférica

UDV – unidade de destilação atmosférica

WGS – water gas shift

WTI – west Texas intermediate

INTRODUÇÃO

A bio-refinaria é uma unidade industrial com capacidade de converter insumos de biomassa em variados e diferentes tipos de produtos finais utilizando-se de também diversos processos de conversão distintos, os quais, como citado em KAMM et al (2006) e TAYLOR (2008), partem de duas principais plataformas: bioquímica e termoquímica. A primeira tem como espinha dorsal a hidrólise enzimática e ácida e produção de alcoóis superiores enquanto a segunda possui a gaseificação e a síntese de Fischer-Tropsch como alicerce fundamental na sua composição, ainda que uma rota baseada em pirólise e desoxigenação, a partir de processos de hidrocraqueamento ou craqueamento catalítico, também deva ser considerada neste caso.

Na figura 1 é adicionada a rota oleoquímica, baseada em plantas oleaginosas como matéria-prima básica. Suas unidades de conversão estão calcadas basicamente em unidades de transesterificação.

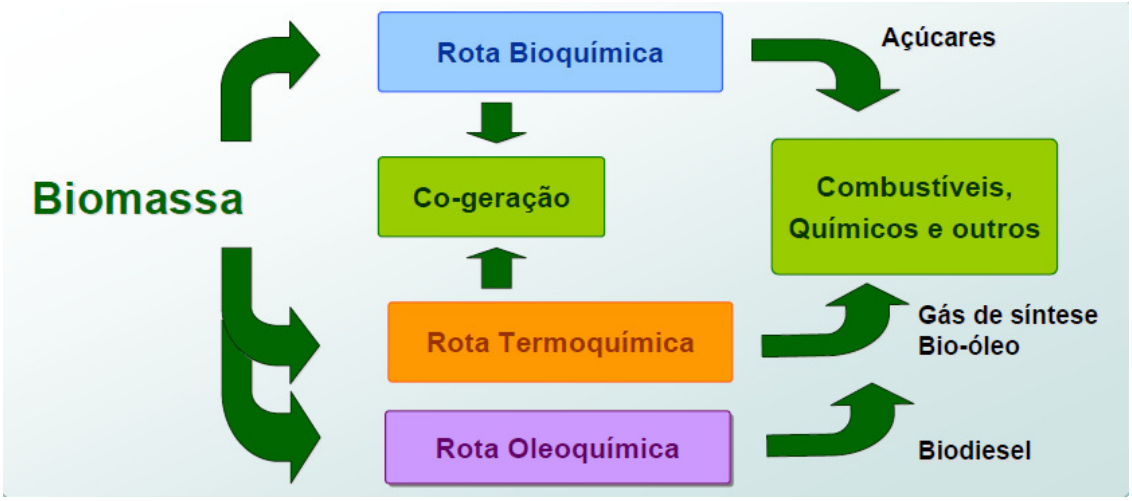


FIGURA 1 – Rotas tecnológicas de bio-refinaria
Fonte: PALOMBO (2008)

Como mostrado em SAMMONS JR. et al (2008), bio-refinarias implicam na produção de diferentes produtos dentro de um mesmo complexo: combustíveis sintéticos, eletricidade, vapor, lubrificantes, metanol, petroquímicos e produtos químicos. Por isso, trata-se de plantas que podem ser compreendidas como similares às refinarias de

petróleo. Tal similaridade se deve pela finalidade e por características físico-químicas dos produtos produzidos, e também, pelos aspectos econômicos e produtivos.

Segundo KAMM et al (2006), um conjunto de diferentes tipos de biomassa podem ser considerados: culturas energéticas, árvores, plantas para alimentação animal, resíduos agrícolas, plantas aquáticas, madeira e resíduos de madeira. Todos podem ser compreendidos como uma matéria-prima similar ao petróleo, com diferentes proporções de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio contidos.

Por isso, a tentativa de se obter múltiplos combustíveis e produtos atualmente produzidos por esta indústria, através de processos industriais que sejam capazes de quebrar e manipular essa composição faz com que sejam criadas plantas industriais com algumas características econômicas e produtivas similares às refinarias, já que podem ser utilizadas unidades de processamento comuns ou parecidas. Como destacado em SZKLO e SCHAEFFER (2006), a indústria de petróleo apresenta enormes economias de escala e escopo, assim como elevado grau de integração vertical, logo, supõe-se que o mesmo possa ser encontrado em bio-refinarias.

Em termos de recursos energéticos, segundo SAXENA et al (2009), a biomassa é o quarto maior do mundo, atrás do carvão, petróleo e gás natural, sendo responsável por prover 14% do consumo de energia primária. Em uma abrangência maior, KAMM et al (2006) mostra que 6 bilhões de toneladas de biomassa são produzidas por ano, mas apenas 1,7 a 2,0 bilhões são utilizadas. Destas, somente 3,0-3,5% é usado para aplicações com fins não alimentícios, o que demonstra o potencial de plantas de bio-refinaria existente com relação ao sistema energético mundial e também todo o escopo de produtos que tem como base a indústria de petróleo.

Como afirma SZKLO e SCHAEFFER (2006), a penetração da indústria do petróleo na sociedade moderna é tão grande que esta não apenas a "alimenta e sustenta", mas também a "constrói". Desta forma, as bio-refinarias teriam potencial de oferecer esta variedade de produtos ao mercado, abrandando a dificuldade encontrada por grandes centros consumidores[1] com relação ao acesso ao petróleo, promovendo também a

[1] Um problema da indústria do petróleo é que os grandes centros de consumo encontram-se em geral distantes dos centros produtores (extração de petróleo).

utilização mais eficiente dos recursos existentes[2] e funcionando como uma ferramenta de combate à questão do aquecimento global causado pelo aumento da emissão de gases causadores de efeito estufa[3].

Este trabalho, porém, está focado nos produtos para fins energéticos no Brasil. Todavia não deixarão de serem mencionadas outras aplicações dos produtos, como petroquímica e indústria química de uma forma geral. Porém, no que diz respeito aos primeiros, pela característica dos combustíveis oriundos de biomassa possuírem a mesma essência dos derivados de petróleo, como mostra NSF (2008), pode-se supor o aproveitamento de uma infra-estrutura já existente, formando escala para seu estabelecimento[4]. De certa forma, a Indústria Sucroalcooleira no Brasil também possibilitaria esse aproveitamento, visto que no país trata-se de um setor competitivo, em que o etanol não mais se configura como um combustível alternativo.

Ademais, este setor produz em grandes quantidades um montante substancial de biomassa lignocelulósica, o bagaço de cana-de-açúcar, como resíduo de seu processo industrial. Segundo cálculos mostrados no APÊNDICE III, o país produziu na safra de 2008/2009 em torno de 150 milhões de toneladas de bagaço, que representou um aumento de aproximadamente 260% com relação à safra de 1990/1991. Esse bagaço, como pode ser verificado em HORTA NOGUEIRA et al (2008) e MARQUES et al (2009), é queimado em grande parte de forma ineficiente em caldeiras de baixa e média pressão para geração de vapor e energia elétrica, com vistas ao consumo próprio e ou ao mercado consumidor (no caso da energia elétrica). Portanto, o Brasil representa uma região propícia à implantação de plantas de bio-refinaria já que possui uma grande oferta de material lignocelulosico a custos baixos[5].

Com isso, percebe-se uma necessidade de pensar na aplicação dos diferentes tipos de rotas tecnológicas de bio-refinaria que tenham como matéria-prima básica o bagaço de

---

[2] Através da utilização do aproveitamento de resíduos de biomassa como insumos para as bio-refinarias.

[3] Dependendo da biomassa utilizada, pode-se verificar um balanço negativo da quantidade de CO_2 emitido, causado pelo seqüestro indireto destes gases através do processo de fotossíntese na fase de crescimento do vegetal.

[4] Neste caso se pode citar o termo cunhado por SZKLO e SCHAEFFER (2006): "Sistemas Energéticos Alternativos".

[5] Por ser um resíduo do processo de produção de açúcar e álcool, seus custos são baixos. Um mercado consumidor deste produto ainda é incipiente, como mostra MARQUES et al (2009). Este assunto é mais bem explorado no APÊNDICE III.

cana-de-açúcar no Brasil. Para isso, torna-se imprescindível identificar os parâmetros existentes para definir a localidade mais indicada destas plantas industriais no país. Acredita-se que tais parâmetros devam estar relacionados com variáveis endógenas à bio-refinaria. Estas variáveis devem ser capazes de captar elementos existentes nestas plantas que pertençam à teoria econômica e relacioná-los com demais variáveis ligadas à questão da localização, exógenas à planta de bio-refinaria a ser instalada.

Acrescenta-se a esta modelagem variáveis relacionadas à competição, buscando encontrar, neste caso, não somente as localizações mais indicadas para uma determinada rota, ou, quais rotas seriam as mais adequadas para operar em determinada região, mas, quais destas teriam maiores chances de serem bem sucedidas. Estabelece-se, portanto um modelo de localização e competição entre as principais rotas tecnológicas de bio-refinaria que têm a cana-de-açúcar como matéria-prima básica.

O objetivo deste trabalho consiste em, através desta modelagem, conseguir identificar as rotas mais interessantes para operar em distintas regiões, e que, através disso, seja possível construir a base para uma futura aplicação do mesmo em todo o território brasileiro. Com isso, espera-se detectar também, compatibilidades existentes entre perfis de rotas tecnológicas e perfis de regiões, impedindo que algumas rotas sejam instaladas em regiões cujo perfil não corresponda ao mais adequado à sua operação.

No fluxograma exposto na figura 2 pode ser observada a relação existente entre os capítulos e apêndices do trabalho e conseqüentemente a importância que cada um exerce sobre o outro. Neste caso, através das setas pode ser verificado que o capítulo 1 possui uma relação direta com o capítulo 2 e 4, assim como o APÊNDICE III possui com o capítulo 3 e 4. Tal relação é expressa também entre os capítulos 2 e 3 frente ao 4, da mesma forma que, o APÊNDICE I e II exercem sobre o capítulo 1 e o capítulo 4 com a conclusão.

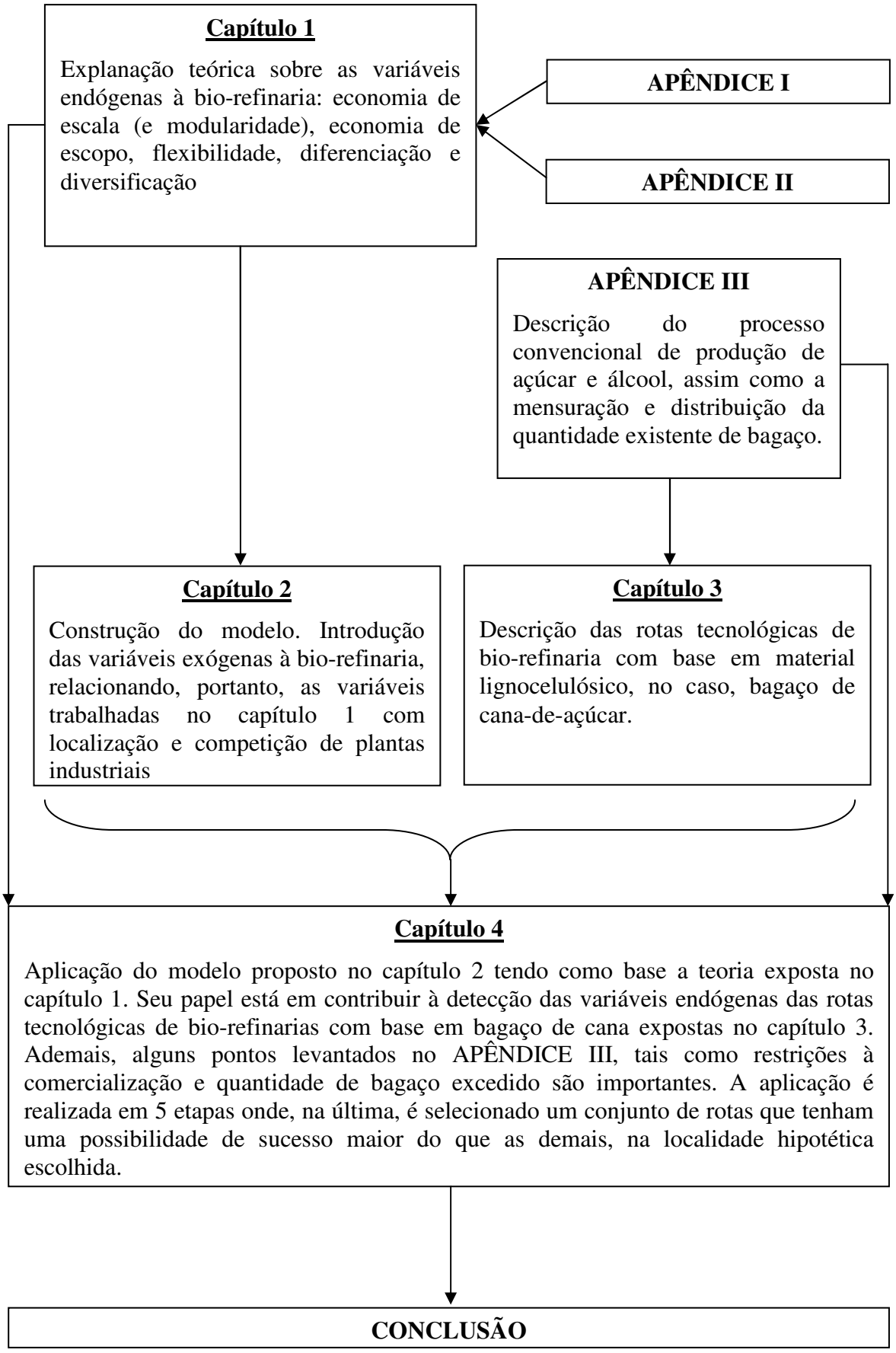


FIGURA 2 – Fluxograma metodológico do trabalho

Assim, no primeiro capítulo serão abordados os fundamentos teóricos referentes às variáveis endógenas que comporão os diferentes perfis de plantas de bio-refinaria a serem avaliadas. Tais fundamentos dizem respeito a basicamente 5 elementos: economia de escala (e modularidade), economia de escopo, flexibilidade, diferenciação e diversificação. As variáveis endógenas geradas com base nestes elementos, com exceção da última, serão aplicadas à indústria do refino de petróleo com intuito de criar um elemento didático com vistas a facilitar a compreensão da aplicação realizada no capítulo 4.

No segundo capítulo será construído o modelo que tem como alicerce as variáveis endógenas dissecadas no capítulo 1. As associações entre estas e variáveis referentes ao acesso a diferentes quantidades de matéria-prima e perfil de mercado consumidor estruturará distintas "matrizes de relação" que, combinadas servirão de apoio às decisões sobre escolha das rotas adequadas para uma região selecionada do território nacional. Somada a estas "matrizes de relação" serão aplicadas também as variáveis ligadas à questão da competição entre as rotas, formando o modelo de localização e competição de plantas de bio-refinaria. Uma aplicação ao refino de petróleo do modelo proposto também será efetuada.

O capítulo 3 trata da descrição de todas as rotas tecnológicas de bio-refinaria com base em biomassa lignocelulósica (no caso bagaço de cana) que são consideradas neste estudo. Portanto, trata-se de um capítulo onde se buscará aprofundar na questão tecnológica e não econômica. É a partir deste "*Roadmap* Tecnológico" que poderá ser definida cada rota a ser aplicada e conseqüentemente, o escopo de produtos finais, determinante na definição dos mercados consumidores das regiões hipotéticas do capítulo 4.

Neste, o modelo construído no capítulo 2 será aplicado com base em informações fornecidas, como mostrado na figura 2, pelo capítulo 1, APÊNDICE III e capítulo 3. A busca está em responder a questão formulada no capítulo 2: "Dado um determinado ambiente (combinação de variáveis exógenas), que características uma planta deveria possuir (combinação de variáveis endógenas) para atuar adequadamente naquele local?"

O ambiente, como mencionado, é composto pelas variáveis exógenas construídas no capítulo 2. Sua aplicação para as regiões hipotéticas se dará com base nos dados

referentes à quantidade de matéria-prima, fornecidos pelo APÊNDICE III[6] e características do mercado consumidor, as quais têm como principal alicerce o escopo de produtos possíveis de se obter nas rotas de bio-refinaria definidos no capítulo 3.

Já as características que a planta deve possuir são compostas pela descrição das rotas tecnológicas no capítulo 3. Por meio desta descrição ("*Roadmap* Tecnológico") poderá ser identificado se a rota deve enquadrar-se ou não na variável endógena adequada para a variável exógena referente à região hipotética selecionada. Após, na identificação da rota ideal para operar na região hipotética destacada, objetivo deste trabalho, serão utilizadas as variáveis endógenas relacionadas à questão da competição.

[6] O APÊNDICE III será inteiramente dedicado à descrever o processo produtivo de açúcar e álcool na Indústria Sucroalcooleira no Brasil, principalmente até a etapa de produção do bagaço, mensurando a quantidade existente e distribuindo-a nas regiões e Estados produtores do país. A quantificação é relevante já que o modelo construído no capítulo 2 tem no acesso a diferentes quantidades de matéria-prima como uma das principais variáveis exógenas à planta de bio-refinaria no quesito localização.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A teoria abordada neste capítulo está inserida em linhas de pesquisa como microeconomia, organização industrial[7] e gerência da produção[8]. Destas, extraiu-se conceitos e aplicações que possibilitam uma melhor compreensão das variáveis chaves envolvidas na questão das bio-refinarias no Brasil, o objeto de estudo desse trabalho, mais especificamente, as que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica de todo seu processo industrial.

Destes conceitos e aplicações, como observado na figura 3, cinco elementos formam o perfil do objeto de estudo, construindo sua base teórica, ditando a direção e foco das análises a que as diferentes rotas tecnológicas dessas bio-refinarias estudadas são submetidas ao longo do trabalho, procedimento exercido especificamente no capitulo 4.

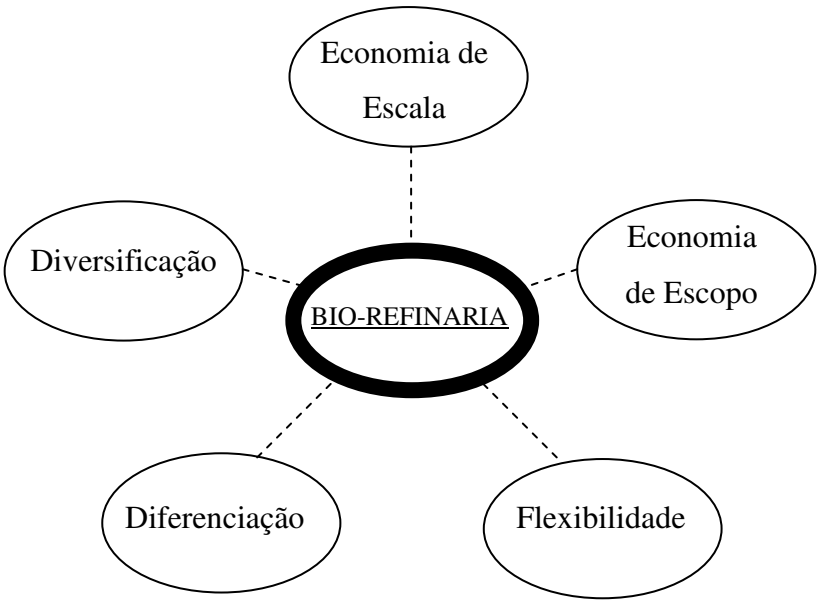


FIGURA 3 – Variáveis chaves relacionadas à questão da localização e competição das rotas de bio-refinaria a serem analisadas

[7] Ambos inclusos no campo da Economia.
[8] Inserido no campo da Engenharia de Produção.

Há uma aparente omissão na figura 3 de um conceito bastante relevante nesse estudo: a modularidade. Ela está contida no grau de Economia de Escala, logo, achou-se razoável utilizar somente a nomeação Economia de Escala. Este procedimento será integralmente compreendido no item "1.1.2 – Modularidade e Economia de Escala".

Também se busca detectar o grau de Economia de Escopo e de Flexibilidade, conceitos que se complementam no quesito avaliação da competição e localização das plantas. Espera-se que após o término do tópico "1.3 - Flexibilidade", esta complementaridade seja assimilada.

Da mesma forma, há a inserção da variável diferenciação, que, possui uma contribuição relevante, pois, apesar de estar muito mais relacionada à questão da competição do que da localização, vem a complementar todos os outros elementos.

Para finalizar, incluiu-se uma análise que se baseia nas direções do processo de diversificação. Contudo, é preciso frisar que esta se baseia em uma visão "externa" à firma. Trata-se de um esforço em detectar as possíveis indústrias progenitoras dessa indústria nascente e seus distintos caminhos, tipos de diversificação a serem efetivados[9]. Por isso, foi explicitado o conceito de "base tecnológica" como pilar de sustentação do critério a ser utilizado na avaliação desse processo de diversificação.

Similar à diferenciação, este conceito vem a complementar todos os outros, traduzindo-se como mais uma ferramenta para a resolução da problemática de localização e competição das plantas de bio-refinaria.

Ademais, ao término de cada explanação, com exceção do tópico "1.5 – direções do processo de diversificação", é acrescida uma aplicação da teoria exposta "em cima" da indústria do refino de petróleo, identificada como uma possível geradora da indústria do bio-refino. Espera-se criar com isso um elemento didático capaz de facilitar a compreensão da aplicação a ser realizada no capítulo 4.

[9] Uma ótica distinta da efetivada na análise de Economia de Escopo nesse trabalho, que se trata de um processo de diversificação "interno" da firma.

1.1 - Economia de escala

A questão da economia de escala é remetida ao longo prazo, onde não há fatores de produção fixos. Com isso, toda a teoria exposta nas relações de curto prazo, onde pelo menos um fator de produção é constante, é exposta no APENDICE I, assim como outros subsídios teóricos, escritos no APENDICE II, ambos formando a base teórica do raciocínio exposto. Caso haja uma necessidade de compreensão de conceitos da teoria microeconômica recomendam-se estes apêndices.

Portanto, tratando-se de longo prazo, define-se economia de escala como um caso geral de rendimentos (ou retornos) crescentes de escala, que é definido quando uma variação em proporções fixas dos insumos provoca uma variação em uma proporção ainda maior na quantidade final ofertada pela firma.

Assim, de uma maneira simplificada, entendem-se rendimentos crescentes de escala como quando é menos custoso aumentar a produção dentro de uma mesma planta, elevando os insumos nas mesmas proporções do que aumentar a oferta do produto final à custa de uma produção em outra planta.

Em Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002) são demonstradas as relações entre as funções de produção e as de custo, no caso, custo médio de longo prazo, no que diz respeito a rendimentos crescentes, decrescentes e constantes de escala.

Tomando, portanto, a função de produção apresentada no APENDICE I, homogênea e com capital e trabalho como insumos, para retornos crescentes de escala tem-se:

1) $f(tK, tL) > t\, f(K, L)$, para $t > 1$

1.1) Onde $q_1 = f(K_1, L_1)$ e os preços de K_1 e L_1 iguais a r e w, respectivamente.

1.2) Com isso: $Cme_1LP = (rK_1 + wL_1)/ q_1$

Ademais,

1.3) $q_2 = f(tK_1, tL_1)$

Assim,

1.4) $Cme_2LP = (rtK_1 + wtL_1)/ q_2 = [t(rK_1 + wL_1)]/ q_2 = (t.Cme_1LP.q_1)/ q_2 = [t.Cme_1LP.f(K_1, L_1)]/ [f(tK_1 + tL_1)]$

2) $Cme_2LP = Cme_1LP . [t f(k_1, L_1)/ f(tK_1, tL_1)]$

2.1) Sendo $\alpha = [t f(K_1, L_1)/ f(tK_1 + tL_1)]$,

2.2) $Cme_2LP = Cme_1LP . \alpha$

Em suma, quando há rendimentos crescentes de escala[10](equação 1):

2.3) $f(tK, tL) > t f(K, L)$, para $t > 1$

[10] Se tratando de funções homogêneas, mencionado no APÊNDICE I, em rendimentos constantes de escala o grau determinará o tipo de rendimento. Assim, para um determinado grau k, se este for menor do que um, há deseconomia de escala. Se for maior que um, há economia de escala. Se for igual a um, como mencionado, os rendimentos são constantes de escala. Pela relação simétrica inversa entre produção e custo, nas funções homogêneas de custo acontece o oposto: para k menor do que um, há economias de escala, enquanto deseconomias acontecem em k maior que um.

2.4) Logo $\alpha < 1$

Analogamente tem-se para rendimentos decrescentes (equação 3) e constantes (equação 4) de escala:

3) b) $f(tK, tL) < t\, f(K, L)$, para $t > 1$, $\alpha > 1$

4) c) $f(tK, tL) = t\, f(K, L)$, para $t \geq 0$, $\alpha = 1$

Complementando, rendimentos decrescentes de escala acontecem quando devido a um aumento na quantidade de insumos na mesma proporção da inicial acarreta em uma elevação menor na quantidade final produzida. O mesmo raciocínio se verifica em rendimentos constantes de escala. Onde, portanto, a variação se dá no mesmo montante.

Neste caso, seria indiferente realizar uma ampliação na fábrica ou construir outra com a mesma quantidade de insumos que seriam utilizados na ampliação. Não se realizariam ganhos nem perdas com relação à quantidade produzida ou a custos de produção. A produtividade média e o custo médio permaneceriam constantes.

Destaca-se que o fenômeno de rendimentos constantes de escala é importante no estabelecimento da teoria da função de produção, como exprime SIMONSEN (1985). Responde a um postulado científico geral de que uma experiência realizada em condições idênticas deve dar resultados idênticos.

Portanto, rendimento constante de escala é uma condição relevante e também única, posto que segundo PINDYCK e RUBINFELD (2002), quando os insumos variam em proporções não fixas, foge-se ao escopo de rendimentos crescentes e decrescentes de escala para entrar em economias e deseconomias de escala, respectivamente.

No entanto, toda a teoria apresentada teve como base o fato das funções de produção e custo serem contínuas e diferenciáveis, não levando em consideração, por exemplo, o fator de indivisibilidade da tecnologia. Assim como o uso de apenas dois fatores de

produção, capital (K) e trabalho (L), esse procedimento é razoável para facilitar o entendimento dos conceitos apresentados.

Contudo, a própria existência de indivisibilidades explica economia de escala, da mesma forma que economias geométricas, economia relacionada à lei dos grandes números e ganhos de especialização, todas de caráter estático. Ademais, existem outras fontes importantes, de caráter dinâmico, como a economia de reinício (*set-up cost*) e a de aprendizado. O fato é que a demonstração de todas estas se constitui na base, para a detecção de economia de escala neste trabalho. Destaca-se que umas terão mais influência na localização das rotas de bio-refinarias, enquanto outras exercerão maiores influências na competição entre as mesmas.

1.1.1 - Fontes de economia de escala

Ganhos de especialização é uma fonte de economia de escala que está relacionada com o aumento de produtividade adquirido com a divisão do trabalho[11]. Já economia relacionada com a lei dos grandes números diz respeito ao fato do crescimento da equipe de manutenção e conseqüentemente dos materiais ser inferior proporcionalmente ao aumento de máquinas em operação[12]. Todas as duas fontes geram, naturalmente, reduções no custo médio de longo prazo das firmas.

O fato é que especificamente para este estudo devem ser aprofundados os conceitos de indivisibilidades tecnológicas e economia geométrica. Estes permitirão identificar se há economia de escala ou não em unidades de bio-refinaria, proporcionando, portanto, auferir a escala dessas firmas e conseqüentemente discutir as hipóteses mencionadas no início deste capítulo.

Assim, tomando o que foi dito anteriormente sobre o fato de as funções de produção e custo, serem contínuas e diferenciáveis, afirma-se que este se trata de mais um procedimento utilizado para facilitar a compreensão da teoria, como foi mencionado em

[11] Ver TALAYSUM et al (1986), Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), SIMONSEN (1985) e PINDYCK e RUBINFELD (2002).
[12] Para maiores detalhes consultar Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002).

SIMONSEN (1985). Em realidade, as unidades de processamento de uma planta industrial são definidas discretamente e, portanto, o tamanho dos equipamentos industriais influencia na quantidade de produtos finais ofertada.

Por isso, tomando que a função de produção seja discreta, todos os fatores sejam explicitados e seus preços sejam fixos, de acordo com SIMONSEN (1985), o produto final ofertado pode ser produzido n vezes, porém, talvez não seja possível pegar essa quantidade total produzida, dividi-la por n e conseguir o produto final pela maneira mais econômica, mais eficiente[13].

Esta maneira mais eficiente se trata da melhor combinação dos fatores de produção e conseqüentemente dos menores custos. Destaca-se que este fenômeno também pode ser descrito como a subaditividade da função de produção e ou a subaditividade da função de custos, respectivamente. No caso do primeiro, ele pode ser observado na representação 1 e 4, onde é identificada uma situação na qual a combinação mais eficiente ocorre nas duas formas. Quanto à subaditividade de custos, esta é formalizada logo a seguir, na inequação 5.

5) $\sum_{i=1}^{n} \varphi(q_i) \geq \varphi(\sum_{i=1}^{n} q_i)$

Basicamente esta inequação expressa que o custo de produzir em plantas separadas é maior ou igual ao custo de produzir numa mesma planta. Da mesma forma, na subaditividade da função de produção, com a combinação das representações 1 e 4, tem-se a situação onde a produção em plantas separadas é inferior ou igual, em quantidade, à produção em uma mesma planta.

Atrelado a isso e, não menos importante para a detecção de economia de escala neste trabalho, existem as economias geométricas, fruto da expansão das unidades processadoras. Segundo HALDI e WHITCOMB (1967), estas são oriundas das próprias

[13] Em VARIAN (1992) é escrito que muitas vezes torna-se impossível dividir o processo de produção, descrevendo este fato como um caso de violação dos retornos constantes de escala. Trata-se do caso de indivisibilidade tecnológica.

indivisibilidades tecnológicas e da força de trabalho além da citada economia relacionada à lei dos grandes números, que se traduz na relação entre o material requerido para a fabricação dos equipamentos e a capacidade dos mesmos. A soma do material requerido depende em grande medida da área da superfície, enquanto a capacidade depende do volume, gerando naturalmente, economia de escala nos processos industriais. A seguir, na equação 6, essa relação é expressa através de uma função exponencial:

6)[14] $C = \alpha.q^{\beta}$

Sendo α = constante; β = fator de escala; C = custo de investimento;

$\beta < 1$, gera economia de escala (retornos crescentes de escala)

$\beta = 1$, gera retornos constantes de escala

$\beta > 1$, gera deseconomia de escala (retornos decrescentes de escala)

Com isso, é justificada a afirmação feita em PINDYCK e RUBINFELD (2002) de que o elevado investimento em equipamentos[15] é um fator gerador de economia de escala, particularmente na indústria da transformação, área em que as bio-refinarias assim como refinarias de petróleo, como analisado em HALDI e WHITCOMB (1967), estão inseridas.

Devido a isso, pode-se concluir que economia de escala existe quando um aumento dos insumos, em proporções fixas ou não, acarretam uma elevação superior na quantidade produzida. Analogamente, um aumento na quantidade produzida ou, no caso de

[14] Repare que nestes casos a função retratada se trata de uma função homogênea mostrada no APÊNDICE I. Segue, portanto o que foi indicado na nota de rodapé 5, que exprime o fato do fenômeno economia de escala poder ser observado pelo seu escalar, ou grau k, mas que, neste caso é representado pelo β.
[15] Uma relação importante entre complexidade e economia de escala.

indivisibilidades técnicas e economia geométrica, na compra de equipamentos (ou aumento das plantas), como explicitado em Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), reduzem o custo médio de forma que ficou mais barato produzir uma unidade de produto adicional. Isto é, quanto maior for a capacidade de produção da unidade processadora ou da planta industrial, menores serão os custos associados a elas.

Ademais, destaca-se que todas as relações de custos apresentadas não levaram em consideração o fator tempo. Isso não impede as funções de custo das firmas de possuir vantagens derivadas de processos dinâmicos e estocásticos, como afirma HALDI e WHITCOMB (1967), e Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002). As duas referências citam as curvas de aprendizado e economias de reinício (*set-up costs*), mas HALDI e WHITCOMB (1967) ainda acrescentam que existe a presença de certos processos estocásticos associados às invenções.

Nas curvas de aprendizado são expressos ganhos de produtividade oriundos de um aprimoramento das técnicas utilizadas onde ajustes são necessários tendo em vista que segundo Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), os custos iniciais de produção de cada unidade são geralmente mais altos. Isso pode gerar vantagens às primeiras entrantes, visto que vencendo etapas iniciais de "tentativa e erro", possuem custos mais baixos resultantes do processo de aprendizado.

Em HALDI e WHITCOMB (1967) é ressaltada a relevância que esta fonte de economia de escala dinâmica possui com relação a processos industriais contínuos, como no caso de refinarias de petróleo. O mesmo é verificado em ENOS (1958), que enfatiza que o estudo de ganhos de aprendizado de uma nova tecnologia é oriundo de estimações de dados de engenharia, e divide sua evolução em duas fases, onde a primeira se refere à introdução de um novo processo, enquanto a segunda trata do melhoramento deste.

Assim, enquanto na primeira consistem as fases de laboratório, a planta piloto e a primeira unidade comercial, a segunda é dividida em três fases pelo autor[16]. No caso, a primeira é referente a ganhos obtidos com o aumento de escala, enquanto a segunda fase com a adoção de fatores de produção mais eficientes e a terceira com ganhos na

[16] As quais na realidade são difíceis de serem detectadas separadamente, como afirma ENOS (1958).

engenharia de processo, melhoramento na arquitetura de todo o sistema gerando uma elevação na eficiência da operação (*know-how*) e eliminação de "gargalos".

Na tentativa de mensurar, assim como em economias de escalas estáticas, o autor também atribui uma função exponencial, só que relacionando as possíveis reduções no custo ao fator tempo. A função ser exponencial é devido à necessidade de se mensurar uma tendência de redução dos custos maior no início do processo, não podendo haver um comportamento linear no que diz respeito às reduções do custo ao longo do tempo. Esta função pode ser mostrada a seguir, na equação 7.

7) $r = e^{-kt}$

Onde:

r = fração do custo de capital da unidade melhorada com a original

t = tempo em anos

k = constante

A mesma idéia é traçada em DUTRA (2007), porém, este coloca as reduções de custo não em função do tempo e sim da quantidade, a qual pode ser expressa em quantidade produzida, potência ofertada ou energia gerada, isto é, toma como variável independente a capacidade da planta industrial (ou da indústria analisada). O que não difere em essência da análise anterior, visto que quanto mais longa (tempo) for uma atividade, maiores quantidades acumuladas de matéria-prima ela terá trabalhado assim como maiores quantidades acumuladas de produtos terão sido ofertados, aumentando a experiência, criando possibilidades de aprendizado e conseqüentemente reduções de custo.

A função utilizada por DUTRA (2007) é mostrada a seguir, na equação 8:

8) $C_t = C_0 X^{-E}$

Onde:

C_t = custo da tecnologia no ano t

C_0 = custo da tecnologia no ano inicial

X = valor acumulativo da produção, potência produzida, energia gerada, ...

E = parâmetro de aprendizagem

O mesmo autor salienta que o parâmetro E é utilizado para calcular uma redução relativa dos custos frente uma duplicação da produção acumulativa. Por exemplo:

Sendo $X_2 = 2X_1$

$(Ct_1 - Ct_2)/ Ct_1 = 1 - \{[C_0 (2X_1)^{-E}]/ [C_0 (X_1)^{-E}]\} = 1 - 2^{-E}$

Com isso:

2^{-E} = razão de progresso técnico = RPT

$1 - 2^{-E}$ = taxa de aprendizagem

O importante é que DUTRA (2007), quando inclui o fator quantidade em vez de tempo, como variável exógena à equação 8, traz à superfície o fato de que economia de escala pode ser um fator que favorece reduções de custo, logo, ganhos de aprendizado. Este fato também está presente na equação 7, porém não é tão fácil visualizá-lo.

Além de economia de escala, segundo IBENHOLT (2002) apud DUTRA (2007), o montante de investimentos em P&D, políticas públicas para alavancar tecnologias novas, mudanças nas variáveis que definem os investimentos e competição nos mercados, são fatores estimulantes à RPT. Conseqüentemente, elevam a taxa de aprendizagem e possuem influência sobre o processo de redução dos custos.

Foi mencionado anteriormente que os autores costumam citar as economias de reinício (*set-up costs*) como fonte de economia de escala dinâmica. A título de exemplo, é mostrado em HALDI e WHITCOMB (1967) que existe uma relação entre o tempo que uma máquina opera e seu tamanho. E, para complementar, segundo Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), é sabido que uma máquina de grande porte comparada com uma de pequeno, trabalha mais tempo no processamento de sua matéria-prima, reduzindo seu tempo de parada.

Porém, entende-se que o fator tamanho da unidade de processamento não pode ser o único a ser levado em consideração como conclusão de que economia de reinício se trata de uma fonte de escala dinâmica. Em realidade, existem outros fatores que contradizem essa afirmação, tornando-a uma simplificação que, quando generalizada, pode induzir a erros.

Isso pode ser observado em processos contínuos, onde, as paradas ocorrem de forma rara, tendo, com isso, um impacto marginal na produção. Em suma, o tamanho entre as máquinas neste caso, é indiferente.

O mesmo acontece com equipamentos de característica modular[17], em que os reparos e manutenção, possíveis causas das interrupções, se fazem nos módulos e, portanto

[17] Estes têm suas funções de custo e produção mais próximas de funções contínuas, como será mostrado a seguir. Portanto, este tópico terá um tratamento mais detalhado no tópico seguinte: modularidade e economia de escala.

possuem um poder inferior ao de grandes equipamentos, no que diz respeito a afetar o andamento do processo, causando elevações dos custos[18].

Ademais, entende-se que o tempo de parada é muito mais função da qualidade da manutenção, do sistema tecnológico nela empregado, do que, do tipo de processo, ou da característica do tamanho do reator, por exemplo. Com isso, neste trabalho não será dada relevância às economias de reinício como fontes de economia de escala dinâmica.

Assim, para finalizar as fontes de economia de escala dinâmicas, destacam-se retornos crescentes estocásticos ligados a invenções, fonte esta mencionada por HALDI e WHITCOMB (1967). Sua dificuldade de detecção não diminui sua importância, visto que de fato existem e possibilitam, quando bem sucedidos, a redução dos custos unitários de uma firma.

Todavia, para conseguir quantificá-los é preciso estimar uma função de probabilidade que exprima estes eventos, isto é, o invento, o tempo necessário de sua aparição e o de redução do custo e outros fatores pertinentes. Contudo, destaca-se que os inventos relacionados ao melhoramento de um determinado processo já estão embutidos nas curvas de aprendizagem estimadas, fazendo com que esta fonte possa estar inserida na análise de ganhos de aprendizado, demonstrada anteriormente.

A seguir, será discutido sobre a questão economia de escala versus modularidade e sua relação com possíveis ganhos de aprendizado. Somado a isso, tecer-se-ão os pontos de ligação entre estas variáveis e a localização e competição, relevantes para o estudo das rotas de bio-refinarias, objetivo deste trabalho.

1.1.2 - Modularidade e economia de escala

A questão da modularidade também pode ser analisada com base nos preceitos teóricos apresentados anteriormente. Isto é, tomando as definições de economia geométrica e indivisibilidades técnicas expostas, principalmente na equação 6, compreende-se que

[18] Antecipando o tópico seguinte, "1.1.2 – modularidade e economia de escala", sistemas de produção modulares se aproximam mais de funções continuas (portanto, com processos contínuos).

modularidade é um conceito aplicado a plantas ou unidades de processamento que tendem a hipotética situação de retornos constantes de escala, quando em uma função homogênea o k é igual a 1 (um), exposto no APENDICE I.

Para isso, compreende-se que nestas situações há uma tendência da escala mínima eficiente ser a mesma para qualquer nível de produção[19], tendo em vista que os custos médios tenderiam a não se alterar com relação a variações na quantidade produzida. Neste caso, a curva de custo médio de longo prazo da firma, apresentada no APENDICE I, seria próxima de uma reta horizontal e a inequação 5 tenderia a transformar-se em uma equação.

Com a inclusão de unidades de processamento modulares, há naturalmente uma compactação de unidades que operam em larga escala, reduzindo conseqüentemente a diferença na relação do volume que é relacionado à capacidade, com a área, relacionada com os materiais utilizados na construção da unidade, e, conseqüentemente, aos custos envolvidos na sua construção e operação. Tal fato acarreta, evidentemente, numa aproximação em valor, da taxa de crescimento dos custos com relação à taxa de crescimento da capacidade, traduzindo-se no que foi nomeado anteriormente de economia geométrica, uma das fontes de economia de escala estática.

Da mesma forma, tomando a afirmação feita por VARIAN (1992) e SIMONSEN (1985), que enfatizam a dificuldade de se dividir o processo de produção, quando se trata de funções de produção discretas, se pode dizer que este problema é atenuado com unidades de processamento de características compactas, modulares. Isso acontece porque, estas, ao produzirem conjuntamente uma quantidade n de produtos e terem estas divididas por n, têm uma possibilidade de obtenção do produto final de forma mais eficiente, ou seja, a custos médios mais próximos dos custos médios mínimos, portanto, escala mínima eficiente, do que em unidades de processamento que trabalham em grandes escalas. Em conclusão, ao trabalhar com funções de custo de uma planta formada com um conjunto de unidades modulares, esta é mais próxima de funções de custo contínuas do que em plantas de larga escala.

---

[19] Outra forma de compreender, que talvez seja a mais correta, é que não há uma escala mínima eficiente e sim qualquer escala de produção é considerada eficiente.

E é na junção destes dois pontos, ou seja, na aproximação com rendimentos constantes de escala através dos conceitos de economia geométrica e indivisibilidades tecnológicas, que a modularidade pode ser mais bem compreendida. O que permitiu incluir no primeiro e segundo parágrafo deste tópico, o termo "tendência", pois, entende-se que ela é uma aproximação do que se caracteriza como rendimento constante de escala.

Neste caso, uma comparação entre economia de escala e retornos constantes de escala, pode ser aplicada a economia de escala e modularidade. Com isso, aproximando estes dois conceitos, compreende-se que, no tocante à localização das unidades industriais, a modularidade segue a idéia de retornos constantes de escala e afasta-se, portanto, do conceito de economia de escala estática, como observado na figura 4.

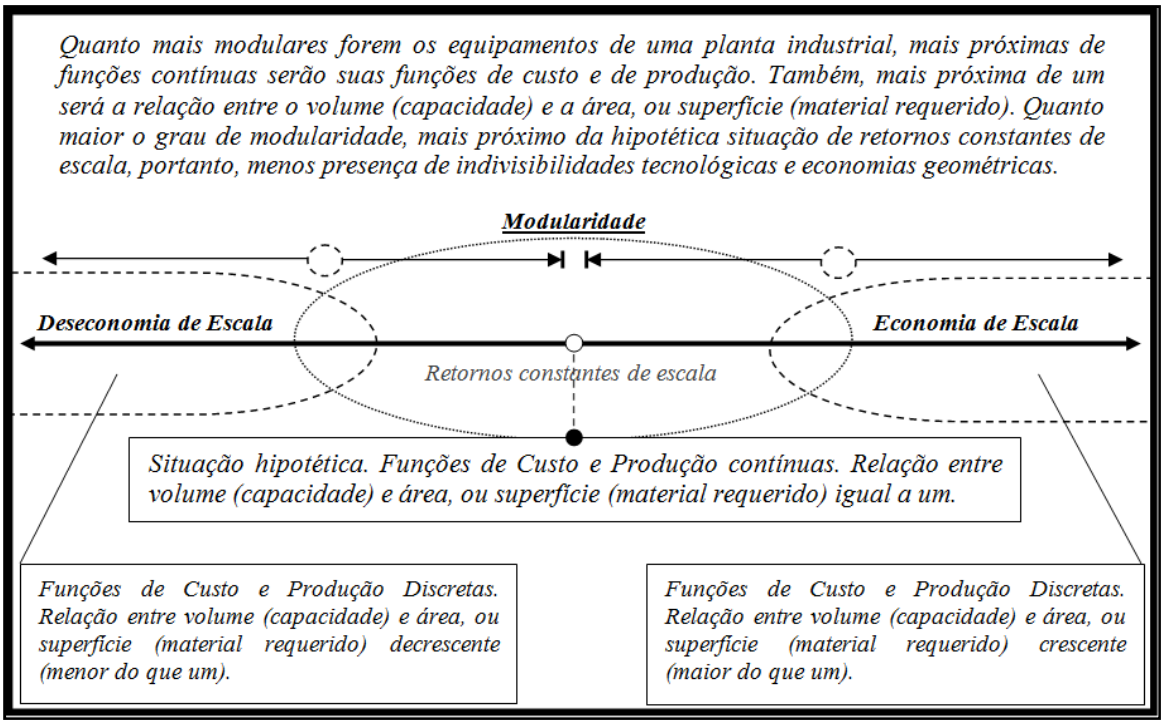


FIGURA 4 – Graus de economia de escala estática

Nesta, também é expressa a relação existente entre indivisibilidades tecnológicas e economias geométricas perante os conceitos em foco. Tudo isso pode ser traduzido como grau de economia de escala, permitindo que modularidade esteja contida em economia de escala, como feito na figura 3.

Todavia, com relação à economia de escala dinâmica, como exposto em ENOS (1958) e DUTRA (2007), ganhos relacionados à economia de escala estática influenciam no

aprendizado, devido ao fato de plantas industriais com esta característica trabalharem com um número elevado de insumos, acarretando numa possibilidade maior de haverem inovações tecnológicas que provoquem reduções de custos, portanto, economia de escala dinâmica.

Assim, no tocante a este ponto, plantas ou equipamentos modulares sofrem uma desvantagem competitiva com relação a plantas ou equipamentos que operam em grande escala. Contudo, como exposto nas equações 7 e 8, as curvas de aprendizado se aplicam a qualquer tipo de tecnologia, independente de suas características de escala, fazendo com que nos primeiros anos de atividade os ganhos ocorram de forma mais acentuada, provando que nas análises de economia de escala dinâmica, os casos devem ser analisados com particularidade, evitando generalizações.

E com isso, entende-se que mesmo com o fato de a economia de escala estática ter influência em ganhos de aprendizado, não há como afirmar com precisão quais equipamentos ou plantas industriais, modulares ou de grande escala sofrerão maiores reduções em seus custos médios ao longo do tempo e, portanto, quais delas terão maiores ganhos, que acarretarão em elevação de seus níveis de competitividade.

Uma forma de detectar futuros ganhos de aprendizagem e conseqüentemente comparar as rotas tecnológicas através de níveis de competitividade é identificando em qual dos estágios expostos em ENOS (1958) cada processo se encontra. Através disso é possível detectar se uma determinada tecnologia é promissora em relação às reduções de seus custos médios ou não. Este fato pode acontecer quando esta for recente, integrante da primeira classificação exposta pelo autor, e caso contrário, quando for considerada uma tecnologia já madura. Ou seja, para um estágio maduro, as inovações tecnológicas ocorrem com menos freqüência, tornando cada vez mais difícil realizar uma redução nos custos médios de determinada tecnologia.

Assim, este fato independe desta ser uma tecnologia modular ou que opere em grande escala. Com isso, a busca pela existência de economia de escala nas diferentes rotas tecnológicas de bio-refinarias analisadas nesse estudo estará baseada na análise de funções exponenciais, que expressam o custo de equipamentos industriais, similares à equação 6, e no caso de curvas de aprendizado, buscando fatores que exprimam ganhos de aprendizado, similares as equações 7 e 8.

Concluindo, a maior dificuldade está em encontrar, por exemplo, parâmetros β e α adequados, para a equação 6, e um fator que expresse algum ganho de aprendizagem, como nas equações 7 e 8.

Portanto, toda a captação de economia de escala será uma análise das funções de custo de equipamentos típicos das unidades industriais estudadas. Será por isso, em termos de fontes de economia de escala, uma investigação baseada nas indivisibilidades técnicas e economia geométrica das bio-refinarias[20].

Quanto à presença de economia de escala dinâmicas, haverá uma análise dos possíveis ganhos que equipamentos industriais das unidades, assim como suas rotas tecnológicas, podem ter ao longo do tempo (ou à capacidade, à quantidade produzida e etc.).

Uma aplicação dos conceitos supracitados, isto é, de economia de escala estática, dinâmica e modularidade, "em cima" da indústria do refino de petróleo, é feita a seguir. Quanto à aplicação destes conceitos "em cima" das rotas de bio-refinaria com base em cana-de-açúcar, para posterior análise, foco deste estudo, realizar-se-á somente no capítulo 4.

[20]Para uma compreensão teórica do que seria uma quantificação padrão de economia de escala, isto é, o uso de índice de economia de escala através de funções de custo de plantas industriais e algumas restrições, recomenda-se ir ao APENDICE II.

1.1.3 - Economia de escala em refinarias de petróleo

Em GARY e KAISER (2007) é relacionado o custo de capital das unidades de refino com uma função de capacidade e escala exposta logo a seguir (equação 9):

9) $C(U1, Q1)/ C(U1, Q2) = (Q1/ Q2)$

C = custo de investimento

U = unidade de processamento

Q = capacidade de processamento (barril/ dia)

x = fator de escala

Segundo os autores, x varia[21] entre 0,5 e 0,7, o que exprime ganhos de escala dos equipamentos, já que com estes coeficientes, uma capacidade de processamento superior reflete custos inferiores, seja ela a Q1 ou Q2. Somado a isso, destaca-se que não há, nem se deseja obter, uma exatidão nas funções de custo. Estima-se que há um intervalo de confiança de ± 25% para os valores de custo calculados.

Com isso, detalhando mais as funções de custo de unidades de processo de uma refinaria, GARY e KAISER (2007) baseiam-se em uma função exponencial idêntica a 6, apresentada anteriormente. Expuseram os parâmetros β e α e os dados de capacidade de cada unidade de processamento de uma refinaria real, a Baton Rouge, da Exxon Mobil, em Louisiana, Estados Unidos. Portanto, seguem a equação utilizada assim como os parâmetros β e α e os dados de capacidade (Q) de unidade da destilação atmosférica (UDA), do craqueamento catalítico fluidizado (FCC) e do hidrocraqueamento catalítico (HCC), da refinaria mencionada, observados na Tabela 1.

[21] Na estimação de *x*, os dados são extraídos de unidades com desenho e tecnologias comparáveis. Em seguida, seu valor é determinado empiricamente através de análises de regressão.

$$C = \alpha.Q^{\beta}$$

Tabela 1- Parâmetros da função de custo da UDA e FCC e suas respectivas capacidades (Q)

	α	β	Q (b/d)*
UDA	8,20	**0,510**	501.000
FCC_d **(destilados)**	24,67	**0,461**	229.000
FCC_r **(resíduos)**	32,98	**0,510**	229.000
HCC_1	15,65	**0,719**	24.000
HCC_2	26,18	**0,714**	24.000

Fonte: Elaboração própria baseada em GARY e KAISER (2007)
*Baton Rouge
HCC_1 = 1.000 scf/bbl H_2
HCC_2 = 3.000 scf/bbl H_2

Portanto,

$C(UDA) = 8{,}20 \times (501.000)^{0,510}$

$C(FCC_d) = 24{,}67 \times (229.000)^{0,461}$

$C(FCC_r) = 32{,}98 \times (229.000)^{0,510}$

$C(HCC_1) = 15{,}65 \times (24.000)^{0,719}$

$C(HCC_2) = 26{,}18 \times (24.000)^{0,714}$

Como mencionado, os valores precisos de C, a variável dependente, endógena, pouco tem importância nesta análise, e sim o seu comportamento frente a variações no Q, a variável independente, exógena. Enfim, como já foi explicitada, a economia de escala é identificada quando variações positivas na capacidade, Q, provocam no custo, C, variações positivas, mas em proporções inferiores da verificada em Q. Além disso, facilita a visualização do fenômeno tomando o fato desta função ser homogênea, já que observando o β, sendo este menor do que 1, caracteriza-se economia de escala. Este fato

foi observado em todas as unidades de processamento da refinaria analisada em GARY e KAISER (2007).

Uma visualização de ganho de escala para cada unidade de processamento é realizada tomando o logaritmo da função de custo número 6, como pode ser visto na equação 10 e transformando-a num gráfico di-log, exposto na figura 5, a seguir.

10) $\log C = \log \alpha + \beta \log Q$

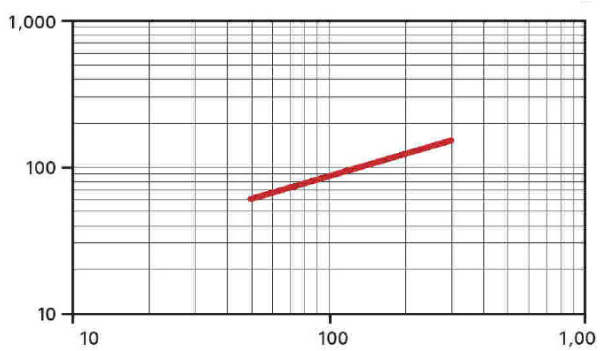


Figura 5 – Costa do Golfo dos EUA: custo de investimento de uma UDA, em milhões de dólares (eixo vertical) versus capacidade em mil barris por dia (eixo horizontal).

Fonte: GARY e KAISER (2007).

Como uma tentativa de detectar algum ganho de escala ao longo tempo, uma análise histórica dos β`s é uma solução plausível. Assim, tendo em vista que os autores têm seus dados baseados com GARY et al (2007), buscou-se aproximações de curvas expostas em edições passadas deste mesmo livro[22]. Esta se fez por meio do cálculo dos coeficientes angulares das mesmas. Com isso, pôde ser observado, tomando como exemplo a UDA, que no ano de 1973 e 1999, o β desta encontrava-se com valores aproximados de 0,66 e 0,54, respectivamente, indicando que houve uma redução ao longo do tempo, conseqüentemente, houve ganhos de escala desta unidade. As curvas

[22] Já que os autores não forneceram os β`s

da UDA dos anos de 1973 e 1999 podem ser observadas respectivamente na figura 6 e figura 7 a seguir.

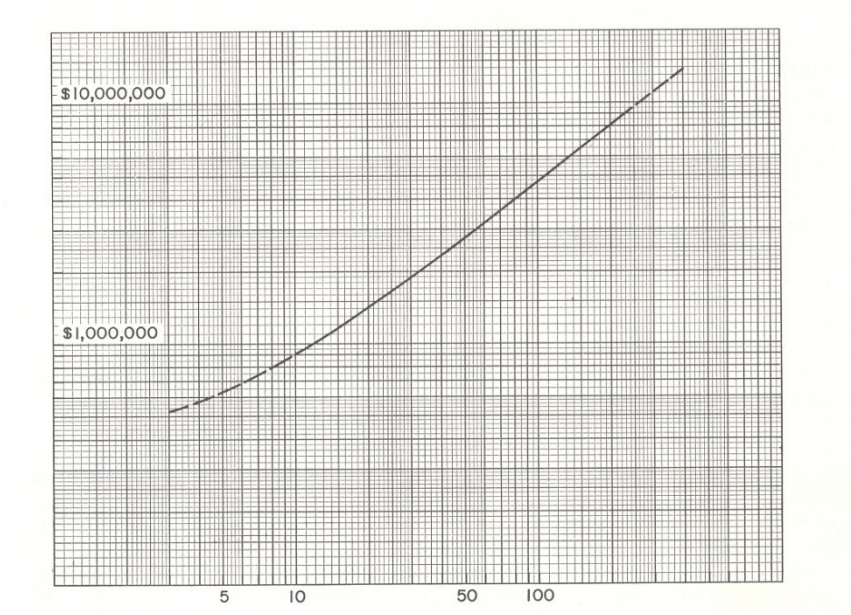


Figura 6 – Costa do Golfo dos EUA: custo de investimento de uma UDA, em milhões de dólares (eixo vertical) versus capacidade em mil barris por dia (eixo horizontal), ano de 1973.

Fonte: GARY e HANDWERK (1975).

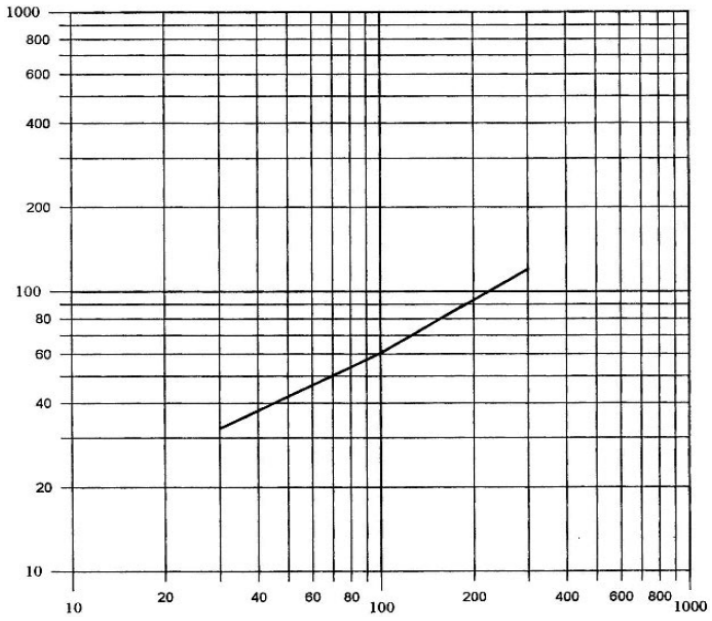


Figura 7 – Costa do Golfo dos EUA: custo de investimento de uma UDA, em milhões de dólares (eixo vertical) versus capacidade em mil barris por dia (eixo horizontal), ano de 1999.

Fonte: GARY e HANDWERK (2001).

No caso das unidades de FCC, não entende ser representativo e coerente utilizar o valor calculado[23], tendo em vista que em GARY e HANDWERK (1975), os autores não distinguiram FCCr de FCCd, agregando todas as informações em uma mesma curva. Com isso, o que já é uma aproximação grosseira torna-se mais ainda com este empecilho. O que não impede de reproduzir esta metodologia para outras unidades como o HCC_1 e HCC_2, os quais tiveram seus valores também superiores em 1973, ou seja, em torno de 0,79 e 0,85, respectivamente[24], caracterizando possíveis ganhos de escala ao longo do tempo.

Possivelmente estas reduções se deveram a inovações tecnológicas. Assim, estas alteraram ou alteram o parâmetro β da função de custo, como foi mostrado nas curvas de aprendizado. Materiais que suportam maior pressão assim como maior controle nos

[23] O valor encontrado foi 0,625, para o ano de 1973.

[24] No caso do HCC, decidiu-se fazer os cálculos com base na capacidade citada em KAISER e GARY (2007), isto é, 24.000 b/d. O objetivo foi tornar a função analisada mais linear e também, mais similar à analisada no artigo exposto, com objetivo da comparação ser feita de forma mais correta possível, dentre as ferramentas existentes. Facilitando a captação dos ganhos de escala.

processos são exemplos de ferramentas que podem ter contribuído para reduções deste parâmetro.

Destaca-se que poderiam ser construídas curvas de aprendizado para cada uma das unidades de processamento analisadas. Esta curva poderia ser embasada na equação 8, tendo como base o parâmetro de aprendizagem, e conseqüentemente a taxa de aprendizagem e a RPT. Porém, sua construção não é trivial e pode acabar por produzir conclusões equivocadas.

Por exemplo, diferentes tipos de equipamentos podem constituir uma UDA, ou um FCC ou um HCC. A dificuldade de comparação pode inviabilizar que a quantificação dos ganhos de aprendizado de um seja feita corretamente, pois pode acabar por agregar equipamentos distintos dentro de uma mesma especificação. Neste caso, os ganhos de aprendizado mensurados seriam irreais. Da mesma forma, seria complicado auferir a capacidade acumulada de cada unidade ao longo do tempo. Também poderiam gerar grandes equívocos.

Com isso, decidiu-se colocar uma curva de aprendizado exposta em ENOS (1958). Esta é referente às reduções de custos da indústria do refino de petróleo frente a inovações tecnológicas, como a entrada da reforma catalítica, craqueamento catalítico, polimerização e craqueamento térmico. Esta é baseada na equação 7 e está exposta logo a seguir, na figura 8. Como explicado anteriormente, r constitui-se na razão do custo de capital da unidade melhorada com a original.

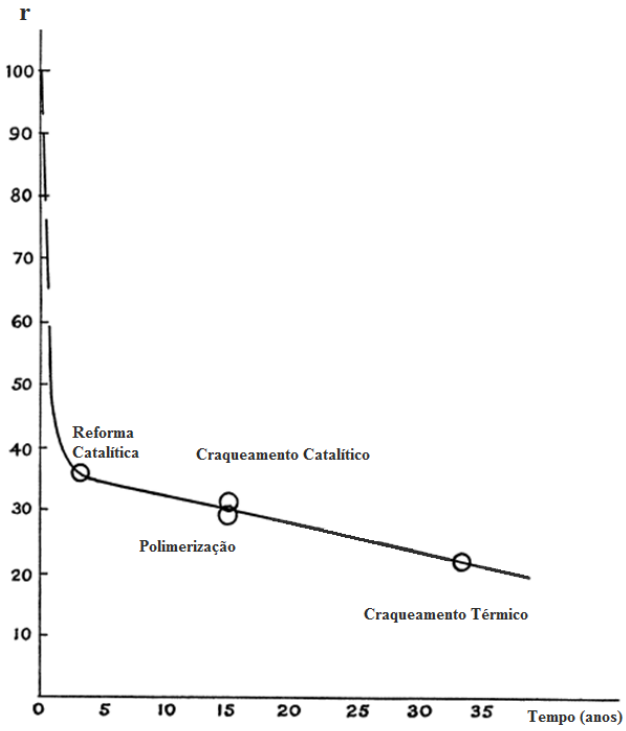


Figura 8 – Evolução dos custos do refino de petróleo ao longo do tempo.
Fonte: ENOS (1958)

Portanto, pelo fato de estar inserido na indústria da transformação, com elevado investimento em máquinas e equipamentos, processo contínuo, refinarias de petróleo são indústrias possuidoras de economia de escala e tiveram ao longo dos anos inovações tecnológicas que ampliaram ainda mais seus ganhos. Estes oriundos de reduções do custo médio frente a aumento de capacidade e frente ao tempo (ou à capacidade acumulada). Com isso, pode-se dizer que esta obteve ganho de economia de escala estática e dinâmica, e encontra-se no segundo estágio exposto em ENOS (1958), que a caracteriza como uma indústria madura e, portanto, tem suas inovações calcadas no melhoramento de um processo já consolidado.

Em suma, citada a indústria do refino de petróleo e o fato de economia de escala fazer parte de seus equipamentos, unidades de processo e plantas industriais, seria interessante destacar algum exemplo de modularidade, caso próximo ou igual, como foi demonstrado, a retornos constantes de escala. Porém, como verificado, este não é presente no refino convencional, mas pode estar em algumas unidades de processamento, como no caso de reatores micro-canais.

1.1.4- Modularidade na produção de combustíveis líquidos

A modularidade na produção de combustíveis líquidos pode ser traduzida na intensificação de processos que comumente são realizados em larga escala. Esses são capazes de converter hidrocarbonetos em produtos finais produzidos pelo refino de petróleo, indústria petroquímica e usinas de cana-de-açúcar. Tais processos serão mais bem abordados, com foco na biomassa como insumo básico, no capítulo 3. Neste item, serão explorados os reatores micro-canais da rota GTL (Gas To Liquid), baseados em processos FT (Fischer-Tropsch).

Esta tecnologia busca transformar o gás natural em gás de síntese (syngas), composto formado em sua maioria por H_2 + CO, pela reforma a vapor (Steam Methane Reformer, SMR) para, em seguida obter o óleo sintético (syncrude)[25] através de um reator FT. Após, o syncrude é direcionado a uma etapa de upgrade, segundo CASTELO BRANCO (2008), responsável por transformar este óleo sintético em derivados sintéticos, os quais podem ser classificados como derivados Premium, de máxima qualidade e valor agregado. Respondem, portanto, aos mais rigorosos níveis de especificação. Todavia, estratégias que consistem em misturar o syncrude com o petróleo, ou produzir o metanol[26], também são exploradas.

Tomando esta explicação, se poderia dizer que esta unidade de processamento não difere tanto dos processos convencionais de GTL[27], porém, não foi mencionado que sua condição de existência está relacionada a alguns aspectos peculiares, os quais são destacados por HOPPER (2009). Este cita que um investimento em GTL micro-canais seria justificado quando a quantidade de gás natural existente no campo é grande demais para ser queimada[28] mas pequena demais para ser criada uma rede de gasodutos assim como uma planta de gás natural liquefeito (GNL).

---

[25] Trata-se de um petróleo sintético, de qualidade superior que de um petróleo convencional (ex.: WTI).
[26] Estas estratégias são conduzidas pelas empresas CompactGTL e Velocys. Ver COMPACTGTL (2009) e VELOCYS (2009).
[27] No GTL tradicional, além da reforma a vapor, há a possibilidade de se utilizar reforma auto-térmica e oxidação parcial. Outra diferença está no objetivo de produzir derivados Premium e não o *syncrude* ou metanol, como foi mencionado.
[28] Segundo HOPPER (2009), atitude ambientalmente e politicamente inaceitável e banida em muitos países.

Com relação à reinjeção do gás em campos maduros, com vistas a gerar um aumento da pressão interna do mesmo, realizando a recuperação do petróleo, além dos custos elevados, tendo como piso[29] US$ 13,00 por barril equivalente de petróleo segundo TONKOVICH (2008), há um limite físico para esta atividade, podendo provocar danos no campo, afetando sua produtividade. Ou seja, não pode ser reinjetada toda a quantidade de gás natural extraída no processo. Parte dela é perdida.

Com isso, sem que haja a possibilidade de queimar o gás extraído, de transportá-lo através de uma rede de distribuição[30] (seja um gasoduto ou plantas GNL) ou reinjetá-lo inteiramente no campo, uma solução seria encontrar uma tecnologia capaz de transformar este gás em derivados, de forma modular (ideal para campos maduros, em declínio), podendo ser aplicada em plataformas offshore[31] e com custos competitivos ao GTL tradicional.

O GTL micro-canais responde a estes requisitos. Seu funcionamento está baseado em reatores modulares, que segundo HOPPER (2009), produzem em média 200 b/d[32] de syncrude, para cada 2 MM scf/d de gás natural associado extraído. Neste caso, o autor cita um exemplo de um campo em declínio que produza 15 MM scf/d de gás natural. Este precisaria de 7 módulos para produzir em torno de 1.500 b/d de syncrude. Com a produção de gás natural reduzida ao longo do tempo, o número de reatores também seria reduzido, até que se atinja uma unidade do mesmo, utilizado até que a quantidade de gás natural extraída do campo seja nula.

Esta modularidade se deve às características da construção do reator que difere em muito dos reatores tradicionais, que buscam ganhos de escala. Existe um paralelo, segundo TONKOVICH (2008), com a microeletrônica, que revolucionou a indústria da computação. O que fez com que a produtividade do reator fosse elevada devido à

---

[29] Assinala-se que os maiores custos são para *offshore*.

[30] O caso do Mar do Norte é um exemplo em que o GTL microcanais não é recomendável, segundo HOPPER (2009), pois apesar do campo ser *offshore*, em lugares remotos, de difícil acesso e com campos maduros, já existe uma rede de distribuição e um mercado consolidado e acessível para o gás natural.

[31] Em campos distantes *offshore* as condições supracitadas se estabelecem mais facilmente. É citado em TONKOVICH (2008) que 6% dos campos de gás no mundo são suficientes para sustentar uma planta de GTL (planta tradicional) superior a 10.000 b/d (grande escala) enquanto 40% corresponde a plantas de 2.000 b/d (GTL micro-canais). Destes campos, os que se localizam em lugares remotos, longe do acesso a mercados consumidores, incluem-se os campos *offshore*.

[32] Números referentes ao produto fabricado pela CompactGTL.

intensificação da transferência de massa e calor, causada pelo fato de a reação ser realizada em canais estreitos, permitindo um controle ótimo da temperatura e maximizando a atividade e tempo de vida do catalisador.

Com isso, somado ao fato da etapa de fabricação do syngas ser por reforma a vapor, o que, de acordo com BIRUEL JUNIOR (2008), evita que seja necessário a construção de uma planta de oxigênio, promove alta utilização do carbono e alto desempenho técnico somado ao baixo consumo de água, destaca-se que os reatores FT de micro-canais são também menores que os tradicionais, com 1,5 metros de diâmetro e são horizontais, contra os tradicionais, que superam os 60 metros de altura e de característica vertical. Esta diferença pode ser observada na figura 9.

O processo GTL micro-canais consegue ser compacto o que, remetendo à teoria de economia de escala supracitada, em especial economias geométricas, quando se faz uma relação direta entre custos e área do equipamento, assim como capacidade e volume, observa-se que com os reatores micro-canais, há uma redução considerável no volume que é trabalhado, o que, conseqüentemente gera a característica modular destes equipamentos. Em conseqüência, esta modularidade torna sua função de custo discreta mais próxima de uma função de custo contínua, reduzindo o fator indivisibilidade.

Isto também acarreta, com relação à economia de escala dinâmica, segundo TONKOVICH (2008), em evitar os custos relacionados às paradas, citado anteriormente como economias de reinício (*set-up costs*), minimizando o tempo de interrupção para reposição dos componentes dos módulos individuais, como catalisadores. Em comparação com GTL convencional, que requer uma parada no sistema para que sejam efetuados reparos ou mudanças, com relação aos custos vinculados à parada, há uma relativa vantagem neste sentido.

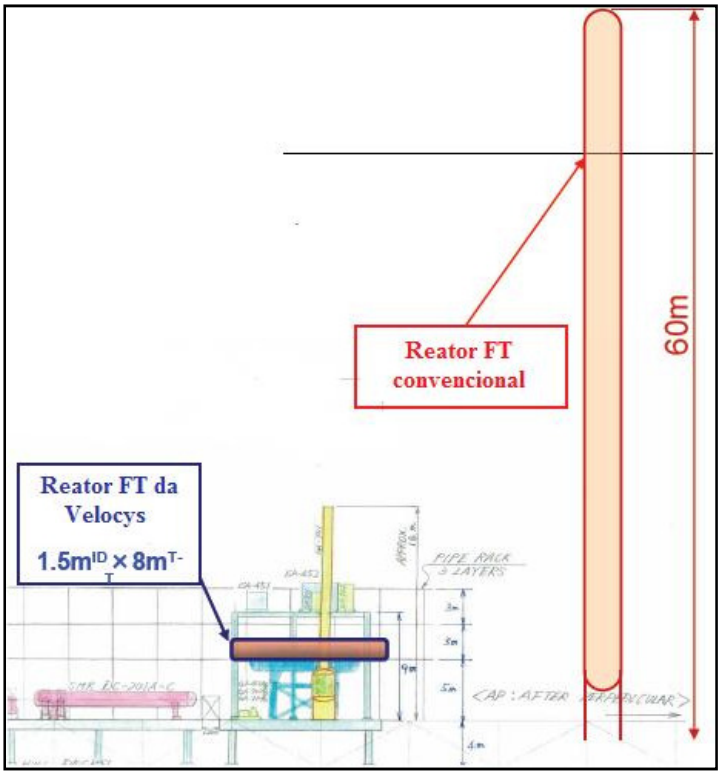


Figura 9 – Comparação de tamanho do reator de FT convencional com tamanho do reator de FT micro-canais
Fonte: TONKOVICH (2008)

Porém, por estas plantas modulares trabalharem com escalas menores, espera-se que estas tenham uma influência menor no que diz respeito a ganhos de aprendizado, do que em plantas que operam em larga escala. Este raciocínio, de que economia de escala contribui para reduções de custo ao longo do tempo, como já foi mencionado, foi exposto em DUTRA (2007) e ENOS (1958).

Contudo, GTL micro-canais encontra-se na primeira fase exposta por ENOS (1958), fase esta relacionada à introdução de um novo processo tecnológico, o qual se espera que obtenha ganhos de aprendizado mais rapidamente do que na segunda fase, em que ocorre um melhoramento deste processo. Com isso, estima-se que nos primeiros anos de atividade ocorram reduções mais acentuadas nos custos médios desta tecnologia, o que acarretará em ganhos de competitividade.

A seguir será inserido o conceito de economia de escopo e flexibilidade, assim como sua relação com a localização e competitividade de plantas industriais. Um exemplo da

indústria do refino de petróleo será mostrado para servir de base comparativa com as rotas de bio-refinaria analisadas no capítulo 3.

1.2 - Economia de escopo

Diz-se que uma firma possui economia de escopo quando para esta, o custo de produzir uma gama de produtos em uma mesma planta é inferior ao custo de produzi-los cada um em plantas separadas.

Segundo TIROLE (1988), as economias de escopo podem ser compreendidas como externalidades econômicas de custo entre linhas de produtos distintos dentro de uma mesma planta. Isto é, quando a produção de um bem reduz o custo de se produzir outro bem[33]. Formalmente, como uma representação do fenômeno, tem-se:

11) $C(q_1, \dots, q_m) < \sum_{i=1}^{m} C_i\,(q_i)$, sendo qi = produto i

Uma forma tradicional de mensurar se há presença de economia de escopo em alguma planta industrial é através de uma fração, mostrada na equação 43, no APÊNDICE II. Porém, existe um fator limitador em sua construção, o qual, como mencionado, é também presente no índice de economia de escala, exposto no mesmo apêndice.

Este fator limitante existe porque é necessário conhecer as funções de custo das plantas industriais que se deseja analisar. Portanto, frisando mais uma vez, para plantas que não existem em escala comercial, caso das bio-refinarias estudadas nesse trabalho, busca-se no estudo das fontes geradoras de economia de escopo a forma de detecção deste elemento em cada rota de bio-refinaria analisada.

[33] Como firma TALAYSUM et al (1986), o custo unitário marginal de longo prazo de um novo produto adicionado deve ser condicional à combinação dos outros bens produzidos pela planta. A idéia de uma curva de custos médios – escopo - de longo prazo, nos moldes da curva teórica de custos médios de longo prazo exposta no APENDICE II, parte desse raciocínio e expõe a complexidade da questão.

Com isso, a seguir são explanadas as fontes geradoras de economia de escopo, as quais servirão de base para a mensuração desse fenômeno posteriormente.

1.2.1 - Fontes de economia de escopo

Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002) explicitou três fontes geradoras de economia de escopo, que também podem ser observadas implicitamente em TIROLE (1988) e TALAYSUM et al (1986). São elas:

1) Existência de fatores comuns;

2) Existência de reserva de capacidade;

3) Complementaridades tecnológicas e comerciais;

Para o caso de existência de fatores comuns, TIROLE (1988) salienta a possibilidade de esta fonte de economia de escopo provocar redução dos custos fixos. Isso ocorre porque há o uso de fatores comuns para a fabricação de produtos distintos, evitando a duplicação de custos fixos em uma planta industrial com esta característica.

Com isso, é importante frisar que estes fatores comuns ou custos fixos, para este estudo, podem ser compreendidos como instalações industriais comuns, como máquinas, unidades processadoras (por exemplo), o que, pode-se acrescentar, demandam pessoal capacitado para operá-las e realizar a sua manutenção, os quais podem ser também de uso comum[34].

Segundo Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), uma vez que determinado fator tenha sido adquirido, sua utilização posterior para que seja produzido outro bem, é praticamente gratuita. Em conjunto, isso reduz os custos médios dos produtos produzidos.

Já no caso da existência de reserva de capacidade, seu papel gerador de economia de escopo está diretamente relacionado à supracitada economia de escala, mais

[34] Neste caso, reduzindo também os custos variáveis.

especificamente, indivisibilidades tecnológicas. Contudo, segundo afirmação de Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), é preciso que haja insumos comuns na produção dos distintos produtos finais.

Em TIROLE (1988), afirma-se que as reservas de capacidade são geradoras de economia de escopo quando uma gama de produtos distintos compartilha de técnicas de produção similares. Nestas, podem estar inclusos o uso de matérias-primas comuns, mas, salienta-se que esta afirmação retoma a questão da existência dos fatores de produção comuns.

Isso pode ser esclarecido em BAILEY e FRIEDLÄNDER (1982) apud TALAYSUM et al (1986), os quais explicam que as indivisibilidades técnicas referentes aos fatores de produção e também aos insumos, frente há uma produção em escala pequena de um ou alguns bens finais, pode provocar um excesso de capacidade dos insumos[35], o que lhes dá propriedades semelhantes a de um bem público, pois seus custos de aquisição são avaliados livremente no processo de produção de outros bens dentro da planta. Esta analogia fortalece o raciocínio que foi exposto no segundo parágrafo do tópico anterior.

Todavia, o relevante nesta explanação é compreender que a indivisibilidade técnica, fonte de economia de escala, tem a possibilidade de gerar economia de escopo, sejam por meio da existência de insumos comuns, fatores de produção comuns, ou os dois. E TIROLE (1988) formaliza essa idéia através de uma generalização, partindo da função de subaditividade de custos, número 5, que representou matematicamente as indivisibilidades no tópico "1.1.1 – fontes de economia de escala".

Assim, tomando a inequação 5, denomina-se 12 como um vetor de produção, para o caso de uma planta, ou um vetor de plantas industriais, para o caso de multi-planta:

12) $q_i = (q_1, q_2, ..., q_m)$

[35] Logicamente estes insumos devem ser comuns nos distintos processos de fabricação dos diferentes produtos finais.

Ou seja, podem existir "m" produtos distintos frente a uma quantidade produzida que varia, de forma discreta, de um até "n" (como verificado na inequação 5)[36]. Assim é formalizada a relação entre economia de escala e escopo, e, o fato de que ambos os elementos provocam reduções nos custos médios dos bens produzidos.

Quanto às complementaridades tecnológicas, estas ocorrem quando, segundo Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), há similaridades quanto às bases tecnológicas e ou de mercado. O que demonstra as sinergias existentes no processo produtivo de diferentes bens dentro da empresa diversificada. Porém, essa fonte de economia de escopo será mais bem analisada posteriormente, quando será discutida a direção do processo de diversificação das firmas.

A seguir, assim como foi realizado na sessão sobre economia de escala, será feita uma aplicação da teoria apresentada, referente às fontes de economia de escopo, direcionada à indústria do refino de petróleo.

1.2.2 - Economia de escopo em refinarias de petróleo

As refinarias são plantas industriais com grande presença de economias de escopo. Nestas estão inseridas as três fontes supracitadas: existência de fatores comuns, existência de reserva de capacidade e complementaridades tecnológicas e comerciais.

Esta afirmação pode ser comprovada analisando as três unidades típicas de uma refinaria que foram expostas na, a UDA, FCC e HCC. Como pode ser observado na tabela 2, cada unidade de processamento citada é produtora de mais de um produto, seja ele final ou semi-acabado.

[36] Neste caso a função de produção exposta na equação 1 (um) do APÊNDICE I pode ser alterada para: $q_i = (K, L)$. Onde q_i é o vetor mostrado na equação 13 (treze) e que representa a cesta de bens diferentes (o mix de produtos) produzidos pela planta.

Como afirma SZKLO (2005), não existe a possibilidade de otimizar uma refinaria para um produto apenas. Com isso, pode-se afirmar que estas plantas industriais têm na exploração da economia de escopo uma característica intrínseca, natural[37].

Assim, ao tomar como exemplo a UDA, observa-se na tabela 2, que esta unidade processa o óleo cru e separa as frações de hidrocarbonetos contidas nele (ou na mistura) após o pré-tratamento (mais especificamente, dessalgação), em distintos produtos. Estas frações são separadas de acordo com seus respectivos pontos de ebulição[38].

Devido ao aquecimento, as frações mais leves sofrem vaporização o que resulta no fracionamento. Após a condensação estas são coletadas no topo da coluna e, segundo SZKLO (2005), as mais pesadas, que são coletadas no fundo, às vezes nem se vaporizam. Estes produtos citados na tabela 2, por vezes podem ser reconhecidos como produtos finais ou utilizados como insumo em algum outro processo à jusante (podendo ser ainda na separação, como em unidades de destilação a vácuo, UDV), como produto semi-acabado.

Com isso, hidrocarbonetos de longa cadeia de carbono, que não conseguiram ser separados nestas unidades de separação, precisam ser transformados em produtos de maior valor agregado. Isso pode ocorrer pela redução de suas cadeias, transformando-as em menores, ou pela combinação, pelo rearranjo molecular, visando construir cadeias mais complexas, objetivando produtos de maior valor agregado.

Portanto, esta etapa mexe com as estruturas das moléculas de produtos como gasóleo leve e pesado, assim como resíduos, com cadeias ainda maiores de carbono, todos oriundos de unidades à montante da unidade em foco, o que, justifica o fato desta etapa ser denominada de "fundo de barril", pois processa os produtos de fundo de barril das

[37] Neste caso torna-se impossível uma relação do tipo que foi expressa na inequação 11, e também, estabelecer um índice de escopo do tipo 27, expresso no APENDICE II.

[38] Segundo SZKLO (2005): Gás residual <40°C; GLP <40°C; Gasolina 40 – 175°C; Querosene 175 – 235°C; Gasóleo leve 235 – 305°C; Gasóleo pesado 305 – 400°C; Lubrificantes 400 – 510°C; Resíduos >510°C;

unidades anteriores. Destaca-se também que, especificamente para as unidades expostas, FCC e do HCC, as reações ocorrem na presença de catalisadores[39].

TABELA 2 – Carga processada e produtos produzidos da UDA, FCC e HCC.

CARGA	UNIDADE	PRODUTOS
Carga de cru (após a dessalgação)	**UDA**	Gás residual ($C_1 – C_2$)
		GLP
		Gasolina
		Querosene
		Gasóleo leve
		Gasóleo pesado
		Lubrificantes
		Resíduos
Gasóleos leves e pesados (UDA, UDV (a vácuo), unidade de coqueamento, operações de desasfaltação)	**FCC**	Coque
		Butanos
		Gasolina
		Gasóleo leve
		Gasóleo pesado
De resíduos a gasóleos (gasóleo de vácuo, óleo leve de reciclo, gasóleo pesado de coque, óleo desasfaltado e etc.)	**HCC**	Butanos
		Frações leves (gasolina)
		Frações pesadas (nafta)
		Querosene

Fonte: Elaboração própria baseada em SZKLO (2005).

No FCC, pode-se observar na tabela 2, que este processa basicamente gasóleos leves e pesados, e, produz basicamente cinco produtos distintos: gasolina, butanos, coque, gasóleo leve e gasóleo pesado. Destes, os dois primeiros são oriundos da quebra das

[39] Possuem uma maior capacidade de "agregar valor" à carga. Segundo GARY et al (2007), os gases leves produzidos pelos craqueadores catalíticos contém mais oleofinas do que os produzidos pelos craqueadores térmicos.

cadeias de carbono das moléculas da carga e os outros são produtos similares ou de cadeia ainda maior, traduzida pela produção de coque.

Descrito por SZKLO (2005), este processo tem início com um pré-aquecimento da carga (250 – 425°C) seguido de um contato desta, no riser, com o catalisador aquecido (700°C). Após a adição de vapor, o craqueamento, realizado em temperaturas de 500 – 540°C e 1,5 – 2,0 bar, é otimizado no reator. Assim as reações, que se iniciam no riser, são finalizadas no topo desta unidade e os produtos seguem para uma unidade de fracionamento mecânico, via ciclone, onde os produtos são novamente separados. O resíduo produzido é utilizado para o aquecimento da carga e o catalisador para uma unidade de regeneração.

No caso do HCC, como pode ser observado na tabela 2, este consegue processar uma amplitude maior de cargas, as quais são transformadas em um conjunto de produtos finais que lhe concede um grau considerável de agregação de valor. De acordo com GARY et al (2007), seu uso tem se estabelecido pois há uma demanda maior por produtos como gasolina, diesel e querosene de aviação (QAV) em relação a outros. Todavia, é importante frisar que nesta unidade, o consumo de hidrogênio é intenso[40].

Segundo SZKLO (2005), suas etapas se iniciam com o pré-aquecimento da carga, a qual é misturada com H_2 e gás reciclado (rico em H_2) e, já no reator, há a conversão de 40 – 50% do volume. Seu efluente destina-se até um separador de alta pressão, com objetivo de extrair gases ricos em H_2, reciclá-los e enviá-los para o início deste estágio. O produto resultado desse processo é enviado para uma unidade de fracionamento, onde se extraem as frações leves e se destinam as pesadas para um segundo estágio, similar ao primeiro em etapas, mas que, porém, à temperatura e pressão específicas, permitem uma conversão de 50 – 70% em volume do insumo, adicionando estes produtos à cesta de bens finais produzidos pelo HCC.

Logo, dependendo da carga de cru processada, os rendimentos de distintos produtos observados são diferentes. Todavia, os processos e a composição das cestas de produtos produzidos por estas unidades não sofrem alterações.

---

[40] Não só durante o processo mas também anterior a ele, com processos de hidrotratamento (HDT) para evitar a formação de H_2S, NH_3 e H_2O

A “duplicação” de seus custos fixos é evitada, portanto, através dos processos explanados de obtenção da gama distinta de produtos pelas unidades processadoras supracitadas. Esta característica, como demonstrado, é adquirida pela existência de fatores comuns, nitidamente detectados em UDA, FCC e HCC.

Assim como a presença desta fonte de economia de escopo é evidente, o mesmo acontece com as reservas de capacidade e complementaridades de produção. Na primeira, a presença de indivisibilidades tecnológicas é inegável, da mesma forma que a existência de insumos e técnicas de produção comuns.

Quanto às complementaridades tecnológicas, processos de fundo de barril, permitem alcançar produtos distintos dos adquiridos nas unidades de separação, porém, como um exemplo mais determinante, pode-se citar o fato de que, devido à demanda de hidrogênio por unidades de HCC e ou de HDT, como mencionado, plantas para geração de hidrogênio via gaseificação[41] de carvão, coque, gás natural e ou biomassa são demandadas, podendo gerar diversificação, como será aprofundado no capítulo quatro e cinco.

Destaca-se que a economia de escopo observada nas três unidades é presente em diversas outras unidades, como pode ser observado na tabela 3, que expressa os produtos adquiridos pelas unidades básicas de uma refinaria de petróleo. Nesta, há presença de graus elevados de economia de escopo em suas unidades, com exceção de unidades como alquilação, produção de betumem, eterificação, geração de hidrogênio[42] e recuperação de enxofre.

Portanto, conclui-se que refinarias de petróleo são plantas industriais com elevado grau de economia de escopo, porém, como foi mencionado no fim do tópico “1.2 – economia de escopo

[41] A qual sendo por oxidação parcial demandaria também a contrução de uma planta para geração de oxigênio.
[42] Que, por gaseificação, como mencionado, pode produzir uma gama variada de produtos.

1.2 - Economia de escopo", para uma análise mais completa exige-se a presença de outro elemento, a flexibilidade. Esta variável será analisada a seguir, assim como a presença desse elemento em refinarias de petróleo.

TABELA 3 - Principais produtos obtidos nos processos básicos de uma refinaria

	GLP (C_3-C_4)	Gasolina (C_4-C_{12})	QAV/ nafta (C_{11}-C_{17})	Diesel/gasóleo pesado (C_8-C_{25})	Óleo combustível (HFO) (>C_8)	Coque/betu-mem (>C_{30})	Especial
Alquilação		■					
Betumen – produção						■	
Craqueamento FCC	■	■	■	■	■		
Craqueamento RFCC	■	■	■	■	■		
Coqueamento retardado	■	■	■	■	■	■	
Destilação atmosférica	■	■	■	■	■		
Destilação a vácuo				■	■	■	
Eterificação							MTBE
Flexi-coqueamento			■	■	■		
Geração de Hidrogênio							Hidrogênio
Hidrocraqueamento HCC		■	■	■	■		
Isomerização		■					
Recuperação de enxofre							Enxofre
Reforma catalítica	■	■					Hidrogênio
Termo-craqueamento/visco-redução	■	■	■	■	■		

Fonte: SZKLO e ULLER (2008)

1.3 - Flexibilidade

Pode-se afirmar que a flexibilidade está na capacidade da firma alterar sua operação respondendo rapidamente à demanda. Esta é uma definição resultante das combinações das definições expostas em GAITHER e FRAZIER (2001) e SLACK et al (2008). Pode-se acrescentar também que, quanto maior for essa capacidade e também quanto mais rápida for essa resposta, maior será o grau de flexibilidade de uma planta.

As alterações no processo produtivo referente à flexibilidade, segundo SLACK et al (2008), podem estar relacionadas aos bens produzidos, a como estes são produzidos e por último, quando estes são produzidos. Com isso, o autor constrói "quatro tipos de exigência" que essas alterações na produção podem responder. São elas: flexibilidade de produto, de composto (mix de produtos), de volume e de entrega.

Já GAITHER e FRAZIER (2001), citaram apenas duas: a flexibilidade de produto e a de volume. Neste caso, a de produto, citada por estes autores pode ser compreendida como uma combinação da primeira e da segunda "exigência" descrita em SLACK et al (2008).

Na primeira das quatro "exigências", o relevante é a capacidade da firma de empreender novos produtos ao mercado, o que liga essa flexibilidade à área de inovação e comercialização dos novos produtos. Já a segunda relaciona-se à habilidade de fornecimento de uma variedade de produtos finais, o que, liga essa flexibilidade à diversificação, à economia de escopo.

São casos diferentes da "flexibilidade de volume", diretamente relacionada à capacidade, à escala, ou seja, na habilidade da firma adequar sua oferta a oscilações de demanda. E para finalizar, há a "flexibilidade de entrega" onde o que é observado é a capacidade da firma em reprogramar seus tempos de entrega.

O foco neste estudo está, naturalmente, na flexibilidade de produto, mais precisamente à de composto (mix de produtos), que se complementa ao grau de economia de escopo, como foi mencionado. No caso da flexibilidade de volume, entende-se que esta já é percebida quando o grau de economia de escala da planta for detectado[43].

Portanto, detectar o grau de flexibilidade de produto de um sistema produtivo neste trabalho é uma tarefa mais árdua do que detectar a flexibilidade de volume[44]. Para flexibilidade de produto, é preciso compreender como funciona o sistema produtivo, a sua arquitetura, descrevendo cada etapa de produção e a sua possibilidade de alternar a composição da cesta de produtos finais ao longo do processo produtivo.

Esta alternância refere-se à capacidade de alteração mencionada no primeiro parágrafo deste tópico. Quanto mais próxima das últimas etapas de fabricação dos bens finais ela pode ocorrer, maior será o grau de flexibilidade de produto desta planta, pois a planta

---

[43] Isso acontece porque um conjunto de equipamentos compactos, modulares, representa uma maior flexibilidade de volume, pois sua capacidade de ajustamento da oferta com a demanda, conseqüentemente, sua resposta a oscilações da mesma é em geral superior a de equipamentos que operam em larga escala.

[44] Visualizada, como foi mencionado, quando são expostos os fatores de escala e se há presença ou não de modularidade.

pode interromper a fabricação de um produto final quase no término de sua concepção e destinar aquele produto semi-acabado para a concepção de outro produto distinto.

Quanto à rapidez dessa alteração, ela também está ligada à questão da arquitetura do sistema, porém, pode ser potencializada caso haja espaço para automatização do processo produtivo, elevando rapidez de resposta da planta a estímulos externos. Isso pode ser observado em TALAYSUM et al (1986), que cita o elevado grau de flexibilidade em plantas CIM/SMF, conhecidas como "manufaturas integradas por computador / sistemas flexíveis de manufatura (*computer integrated manufacturing / flexible manufacturing systems*).

Portanto, dependendo da arquitetura do sistema produtivo de uma planta diversificada e a possibilidade de automatização de seu processo produtivo, estabelece-se o grau de flexibilidade de produto da planta industrial.

A seguir tenta-se enxergar, tomando como ponto de partida a aplicação anterior de fontes de economias de escopo, o grau de flexibilidade de uma refinaria de petróleo. Que variável é responsável por tornar uma refinaria de petróleo mais ou menos flexível frente aos diversos produtos finais que esta pode ofertar?

1.3.1 - Flexibilidade no refino de petróleo

A refinaria de petróleo é constituída na combinação das diversas unidades de conversão existentes, frente ao acesso a cargas heterogêneas bem como, distintos mercados consumidores[45]. Por isso, em SZKLO (2005) é afirmado que inexistem duas refinarias iguais no mundo.

No caso das unidades de conversão, apenas analisando a tabela 3, em que são expostos os processos básicos, conclui-se que suas possibilidades de combinação podem compor inúmeras plantas diferentes. E, é no seu conjunto, ou seja, na refinaria como um todo, que poderão ser visualizados os graus de flexibilidade destas plantas.

[45] Com distintos níveis de especificação dos produtos e preferência dos consumidores.

Para isso, com objetivo de facilitar a análise, ULLER et al (2008) apresenta três configurações diferentes de refinarias, das quais, podem ser avaliadas em simples, semicomplexas ou complexas, segundo seus graus de complexidade. Como pode ser observado em KAISER e GARY (2007), na medida em que são adicionadas unidades de processamento na planta, seu grau de complexidade é elevado. Isso está exposto na Tabela 4, a seguir.

TABELA 4 – Refinarias de petróleo: esquemas, configuração e grau de complexidade.

ESQUEMAS	CONFIGURAÇÃO	GRAU DE COMPLEXIDADE
Hydroskimming	UDA, reforma catalítica, isomerização e hidrotratamento de destilados. Trata-se de uma refinaria com unidades em série.	**Simples**
Cracking	Inclui além da configuração hydroskimming, unidades de FCC, destilação a vácuo e visco-redução. Grande parte dos resíduos atmosféricos se converte em combustíveis mais leves.	**Semicomplexa**
Coking	Adicionam-se à cracking unidades de fundo de barril (coqueamento retardado e ou HCC), conferindo ao rendimento final uma maior conversão de resíduo da destilação.	**Complexa**

Fonte: Elaboração própria baseada em ULLER et al (2008)

Portanto, detectar se a planta industrial analisada é simples, semicomplexa ou complexa, trata-se de definir as configurações da refinaria, logo, a arquitetura de seu sistema produtivo, devido à relação direta entre ambas estas variáveis.

Como foi mostrada no tópico anterior a necessidade de se conhecer a arquitetura de uma planta para auferir seu grau de flexibilidade, é natural supor que haja uma relação do grau de complexidade de uma refinaria com seu grau de flexibilidade[46].

Essa relação foi comprovada e demonstrada por ULLER et al (2008), quando por meio de regressões, assegurou que configurações mais complexas possuem maior "robustez" da margem de refino[47], traduzida na capacidade do refinador manter sua margem acima de um patamar que torne o negócio atrativo. Esta "robustez" é alcançada pelo fato destes refinadores estarem menos vulneráveis às oscilações nos preços do cru e dos produtos finais. Neste caso, essa redução de vulnerabilidade, como já foi mencionada, é adquirida por aumentos da flexibilidade de seu sistema produtivo, que, segundo os autores pode ser descrita justamente como a habilidade de adaptação a choques nos preços do petróleo e derivados[48].

Assim, pode-se concluir que em refinarias de petróleo, a flexibilidade tende a ser maior quando é mais complexa a planta[49]. Neste caso, quanto mais complexa esta for, não só o refinador pode processar crus de pior qualidade, logo, de custos inferiores, mas, buscar produzir produtos que estejam com preços mais elevados no mercado consumidor, buscando inclusive, uma especialização[50]. Contudo, este possui, pela sua flexibilidade, a possibilidade de escolha, ao contrário do que acontece em configurações simples, com baixa flexibilidade.

---

[46] Já que complexidade está diretamente relacionada com a arquitetura do sistema produtivo de uma refinaria. É o elemento de ligação entre arquitetura e flexibilidade.

[47] Levando em consideração o *trade-off* existente (gerado com o aumento da complexidade), entre os ganhos relacionados à reduções de custo (por poder processar crus de baixa qualidade) e aumento de receita (por poder produzir mais derivados de alta qualidade) frente a aumentos nos custos (catalisadores, energia e etc.).

[48] Diferente do caso das bio-refinarias, onde a carga a ser processada é mais homogênea, e, portanto, o grau de flexibilidade a ser auferido é referente aos produtos finais somente, descontando-se a matéria-prima.

[49] Porém, uma limitação, atribuída em NPC (2004) apud SZKLO e SCHAEFFER (2007), para o caso de restrições ambientais muito rígidas, que elevariam os níveis de complexidade, mas que reduziriam a flexibilidade da planta.

[50] Caso típico do HCC mencionado no item "1.2.2 – graus de economia de escopo em refinarias de petróleo", quando se citou GARY et al (2007), que atribui o sucesso destas unidades à uma demanda cada vez maior de gasolina, diesel e QAV. Basicamente uma "especialização" do refino a produtos de maior valor agregado.

A seguir é descrito mais um elemento, a diferenciação. Como já foi mencionado, trata-se de mais uma variável chave para esse estudo e seguindo a mesma lógica dos tópicos já mostrados, uma aplicação com a indústria do refino de petróleo será feita no término da explanação teórica.

1.4 – Diferenciação

O fato de o consumidor perceber uma diferença entre dois produtos pertencentes ao mesmo mercado, porém, ofertados por empresas distintas, permite que, como afirma TIROLE (1988), possa haver por parte destas, uma sustentação de seus preços acima de seus respectivos custos marginais.

Neste caso, é caracterizada a diferenciação de produtos, fenômeno distinto da diversificação, onde produtos diferentes atuam em mercados diferentes. Assim, na diferenciação, o que se observa são produtos não homogêneos alocados no mesmo mercado, porém, em nichos distintos.

É salientado em Losekann e Gutierrez In HASENCLEVER e KUPFER (2002), o fato de este fenômeno, que em situações práticas ocorre quando a firma consegue sustentar o preço acima do preço médio estabelecido pelo mercado, existir devido a três razões: o local em que o produto é ofertado, a qualidade do mesmo ou a percepção da sua marca. Portanto, nestes três casos, podem ser observadas diferenciações de natureza real[51] e informacional[52].

A diferenciação real diz respeito somente aos atributos físicos, ligados à qualidade do produto[53], ou aos atributos locacionais, ligados ao local em que o produto é ofertado.

---

[51] Para estas, em TIROLE (1988) e Losekann e Gutierrez In HASENCLEVER e KUPFER (2002), pode ser observado dois tipos diferentes de diferenciação: horizontal e vertical.

[52] Algumas possibilidades de diferenciação foram destacadas por Losekann e Gutierrez In HASENCLEVER e KUPFER (2002). São estas: especificações técnicas; desempenho ou confiabilidade; durabilidade; ergonomia e design; estética; custo de utilização do produto; imagem e marca; formas de comercialização; assistência técnica e suporte ao usuário; financiamento aos usuários.

[53] Diferenciação esta que tem seu estabelecimento facilitado pelo uso de patentes, que podem impedir que determinado produto seja produzido igual ou similar por outra firma, reduzindo seu grau de diferenciação.

Já na diferenciação informacional, podem-se destacar os esforços em propaganda e marketing e o consumo continuado do produto que já está estabelecido no mercado, através da lealdade do consumidor.

Não por um critério de importância e sim seguindo a mesma lógica expressa no próximo item, caracterizado como "direções do processo de diversificação", em que o foco da avaliação, como será demonstrado adiante, consiste no estudo da base tecnológica. A natureza das diferenciações expostas nesse trabalho serão as chamadas diferenciações reais, que se baseiam na localização das unidades de bio-refinaria estudadas, assim como na qualidade, ou seja, os aspectos físicos dos produtos ofertados por elas.

Neste caso espera-se avaliar de fato se bio-refinarias localizadas próximas ao seu mercado consumidor possuem ou não vantagens competitivas. Da mesma forma que, deseja-se detectar se em bio-refinarias inseridas em determinadas rotas tecnológicas que apresentem desvantagens competitivas, como a presença de custos superiores (que fazem seus produtos finais chegarem ao mercado com preços superiores aos ofertados pelos concorrentes), existe espaço para a diferenciação de seus produtos em termos de qualidade, permitindo que estas firmas alcancem nichos de mercado específicos, conseguindo que seus preços mais elevados tenham aceitação através da penetração em novos nichos de mercado e criando um horizonte viável para sua existência.

1.4.1 - Diferenciação no refino (e distribuição) de petróleo

A diferenciação na indústria do petróleo pode ser visualizada quando se analisa os diferentes mercados de combustíveis automotivos, em especial, o de gasolina e diesel. Para estes, são criados distintos nichos de mercado através, principalmente, da exploração de duas principais características: octanagem e número de cetanas.

No caso da gasolina, como pode ser observado na tabela 5, em que são expostas as diferentes gasolinas ofertadas pela PETROBRAS DISTRIBUIDORA, compreende-se

que o índice de octanagem é a característica responsável por diferenciar a Gasolina Podium, de índice de octanagem 95, das demais, com 87[54]. Neste caso, a Podium está inserida no nicho de mercado, classificado pela ANP, como o destinado à comercialização de produtos Premium, de índice de octanagem a partir de 91[55]. Abaixo deste índice inserem-se as gasolinas denominadas de Comum[56], caso da Gasolina Aditivada Supra e Gasolina Comum, ofertadas pela empresa supracitada.

TABELA 5 – Diferenciação no mercado de gasolina automotiva.

	Gasolina Podium	**Gasolina Aditivada Supra**	**Gasolina Comum**
Octanagem IAD	95	87	
Classificação ANP	Premium	Comum	
Enxofre máx. p.p.m.	30	1.000	
Aditivos	Sim detergentes/dispersantes		Não possui
Álcool anidro	Obrigatório em todas as gasolinas automotivas brasileiras, em percentual definido pela legislação.		
Cor	Levemente alaranjada	Verde, em razão do corante adicionado pela BR	Amarelada

p.p.m. (partes por milhão) = mg/Kg

FONTE: PETROBRAS DISTRIBUIDORA (2009)

Porém, mesmo possuindo o mesmo índice de octanagem, estes dois produtos também são diferenciados. Isso acontece, como pode ser analisado na tabela 5, pela presença ou

[54] Podem-se citar também, diversas outras características, como por exemplo, a diferença no teor de enxofre. Mas a principal é a octanagem, segundo GARY et al (2007).

[55] Destinado principalmente aos motores de ciclo Otto que possuam uma taxa de compressão mais elevada.

[56] Esta classificação segue a mesma lógica em outros países. Um exemplo disso está em GARY et al (2007) para o caso dos EUA no ano de 2005, onde a Comum estaria em torno de 87 e a Premium e a Super Premium (existe mais uma categoria) estariam entre 89 e 93.

não de aditivos. A adição destes na Gasolina Comum confere um maior valor a este novo produto, denominado de Gasolina Aditivada Supra.

Portanto, os preços que estes produtos são ofertados pelo revendedor, no varejo, seguem a lógica explanada no tópico anterior, que definiu o fenômeno da diferenciação nos mercados. Ou seja, para cada diferenciação auferida a um produto, seu preço final tende a ser aumentado, pois existe uma tendência deste alcançar nichos de mercado diferentes.

No caso da tabela 5, o maior preço estabelecido refere-se à Gasolina Podium, em seguida a Gasolina Aditivada Supra e por último a Gasolina Comum, o produto mais simples, sem diferenciação. Todos pertencem, como mencionado, ao mesmo mercado, o de gasolina destinada a veículos automotivos, por isso, não se trata de um fenômeno de diversificação e sim de diferenciação.

Deve-se destacar que as diferentes gasolinas automotivas apresentadas na tabela 5 são conhecidas como gasolinas do tipo C. Estas são concebidas na distribuição, oriundas da mistura de álcool anidro e ou aditivos[57], com a gasolina produzida na refinaria, conhecida como gasolina tipo A. As gasolinas do tipo A também são conhecidas ou como Premium ou como Comum[58].

Assim, conclui-se que o grande esforço na produção destes produtos diferenciados é encontrado na refinaria. De uma forma geral, processos que são focados em uma gasolina com maior octanagem, citados em SZKLO e SCHAEFFER (2007), podem ser traduzidos na reformação catalítica (em detrimento do teor de aromáticos da gasolina), FCC, alquilação e isomerização[59].

Quanto à redução do teor de enxofre, além da possibilidade de ajustamento da carga da refinaria, foram citados em SZKLO e SCHAEFFER (2007) e SZKLO (2005), os processos de hidrotratamento, mais especificamente, hidrodessulfurização (HDS):

---

[57] A Gasolina Comum não possui aditivos.
[58] No caso da PETROBRAS DISTRIBUIDORA, são respectivamente a Podium e a Comum (que após a mistura ou não com aditivos transforma-se na Adivivada Supra ou na Comum).
[59] A adição do álcool anidro eleva o índice de octanagem, porém, como esta se mistura se aplica a todas as gasolinas tipo A, não se trata de uma diferenciação.

brando e severo[60]. Além de gerarem gasolinas com esta característica, estes processos também contribuem para produção de dieseis com menor quantidade desse elemento.

Todavia, não é a octanagem a principal responsável por elevar a qualidade do diesel, e sim, o número de cetanas, que, segundo GARY et al (2007) é o fator que atribui qualidade à ignição. Pode ser conseguido, de acordo com SCHAEFFER e SZKLO (2007), também com processos de hidrotratamento, particularmente, processos de hidrodesaromatização (saturação de aromáticos), conhecidos como HDA e também pelo HCC. Ademais, os mesmos autores explicitam a possibilidade de formular o blending do diesel sem o Cycle Oil do FCC, gerando um tradeoff entre quantidade e qualidade do produto[61]

.

[60] A adição de álcool anidro também reduz o teor de enxofre nestes produtos.
[61] Também mencionam, GÜRÜ et al (2002) apud SZKLO e SCHAEFFER (2007), que existe a possibilidade de adição de aditivos capazes de elevar o índice de cetanas.

TABELA 6 – Diferenciação nos mercados de diesel automotivo e náutico.

<table>
<tr><th></th><th colspan="4">Automotivo</th><th colspan="2">Náutico</th></tr>
<tr><th></th><th>Diesel Podium</th><th>Extra Diesel</th><th>Diesel Comum</th><th>Diesel Inverno (*)</th><th>Diesel Marítimo</th><th>Diesel Verana</th></tr>
<tr><td>Presença de biodiesel</td><td colspan="6">Sim (4% em volume)</td></tr>
<tr><td>Presença de aditivos</td><td>Sim</td><td>Sim</td><td>não</td><td>sim (se extra Diesel)</td><td>não</td><td>Sim</td></tr>
<tr><td>Enxofre total máx.(p.p.m.)</td><td>200</td><td>500 (M)
2.000 (I)</td><td></td><td>500</td><td>10.000</td><td>200</td></tr>
<tr><td>Número de cetano Mín.</td><td>51</td><td colspan="3">42</td><td>40</td><td>51</td></tr>
<tr><td>Coloração</td><td>Amarelo e Alaranjado</td><td colspan="3">Amarelo e Alaranjado (M)
Presença de corante vermelho (I)</td><td colspan="2">Amarelo e Alaranjado</td></tr>
<tr><td>Ponto de fulgor mín. (°C)</td><td colspan="5">38</td><td>60</td></tr>
<tr><td>Filtração complementar nos postos</td><td>Sim</td><td colspan="4">Não</td><td>Sim</td></tr>
<tr><td>Aditivo de odor</td><td colspan="5">Não</td><td>Sim</td></tr>
</table>

(*) desenvolvido para alcançar o grau de desempenho necessário para operar nas regiões que apresentam temperaturas de até – 5°C.
(M) = Metropolitano; (I) = Interiorano;

FONTE: PETROBRAS DISTRIBUIDORA (2009)

Com isso, consegue-se adquirir dieseis de maior qualidade, isto é, com menor teor de enxofre e, principalmente, maior índice de cetanas, penetrando em outros nichos de mercado, agregando mais valor ao produto, diferenciando-o. Isso pode ser observado na tabela 6, onde são apresentados os dieseis ofertados pela PETROBRAS DISTRIBUIDORA. Estes estão inseridos em mercados distintos, como o automotivo e o náutico e subdividem-se em diferentes nichos, seguindo a mesma lógica explanada no mercado de gasolina automotiva.

O próximo tópico é destinado às direções do processo de diversificação, através de uma ótica "externa" à firma. Procura-se, por meio de seu estudo, detectar possíveis vantagens competitivas que rotas tecnológicas de bio-refinaria possam ter. Portanto, é mais uma ferramenta relevante neste trabalho.

1.5 - Direções do processo de diversificação

Como ficou caracterizado no item "1.2 – economia de escopo", o processo de diversificação existe quando uma firma amplia sua produção atuando em mercados em que ela não atuava originalmente.

Este pode ser efetivado por duas formas: o investimento em novas plantas ou em fusões e aquisições. No primeiro, há a criação de uma capacidade de produção nova para a empresa, fazendo-a passar por todos os processos de aprendizado, com alguns aproveitamentos tecnológicos e gerenciais das atividades mais antigas. Já no segundo, a firma estará adquirindo uma empresa que já atuava no mercado. Ela estará aproveitando recursos já existentes, sem que seja necessário criá-los.

Como este trabalho está direcionado ao estudo de bio-refinarias que utilizam bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica, o processo de diversificação relevante é o que corresponde à construção de novas plantas industriais, pois, inexistem bio-refinarias em escala comercial com esta característica hoje no mundo.

Por isso, é importante a compreensão de dois conceitos similares, porém distintos, pertencentes à teoria de diversificação na organização industrial. São eles: base tecnológica e competências essenciais (core competences)[62].

O primeiro foi desenvolvido por PENROSE (1959) e consiste em uma expressão para definir uma característica estritamente tecnológica das firmas. Envolve, portanto, os processos industriais, o conhecimento sobre as matérias-primas utilizadas, o

[62] Destaca-se que "competências essenciais", segundo Britto In HASENCLEVER; KUPFER (2002) caracteriza-se como a tradução de "*core competences*".

conhecimento do pessoal especializado, da mão-de-obra, isto é, o processo de produção como um todo.

Já o segundo foi desenvolvido por PRAHALAD and HAMEL (1990) apud Britto In HASENCLEVER; KUPFER (2002) e demonstra que competências essenciais consistem no núcleo de competências de uma empresa e seus eventuais dilemas ocorridos, sejam eles de natureza tecnológica ou gerencial, e que, costumam estar presentes na exploração destas competências no processo de crescimento da firma. Trata-se de um conceito que é mais abrangente do que o de base tecnológica.

Assim, ligado a estas definições, com base em Britto In HASENCLEVER; KUPFER (2002), como pode ser observado na figura 10, existem dois critérios básicos de se avaliar possíveis direções do processo de diversificação. O primeiro deles relaciona-se mais com a proximidade das antigas atividades às novas, em termos da localização das mesmas nos diferentes estágios do processo de produção, isto é, transformação de insumos em produtos, ao longo da cadeia produtiva. O segundo está ligado ao grau de similaridade entre as antigas e as novas atividades em termos de competências produtivas e gerenciais necessárias para lidar com todas as atividades da empresa.

Portanto, construindo uma relação direta entre os conceitos mostrados anteriormente, entende-se que o primeiro critério está relacionado com o conceito de base tecnológica, pois se baseia em detectar uma lógica existente entre as atividades mais antigas da firma frente às novas no que diz respeito primordialmente ao processo produtivo[63]. A fronteira entre os processos utilizados, às máquinas, ao capital humano, das antigas atividades com as novas, é muito próxima.

Assim, com o mesmo raciocínio, compreende-se que o segundo critério pode ser relacionado diretamente com a definição de competências essenciais. Isso ocorre porque existe a possibilidade de haver uma lógica entre as atividades mais antigas e as novas, porém esta se baseia nas competências produtivas e gerenciais necessárias para operá-las e, em conseqüência, destaca-se que a fronteira entre os processos utilizados, em

[63] Contudo, esse processo também se relaciona com o que PENROSE (1959) chama de área de comercialização das empresas e em Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), é denominada de área mercadológica. Neste trabalho, ambos estão inclusos no conceito de base tecnológica.

relação às máquinas, ao capital humano, entre ambas as atividades, isto é, as novas e antigas, é tênue, ou até mesmo inexistente. Essa é a grande distinção entre ambos os critérios de avaliação e conseqüentemente entre os conceitos de base tecnológica e competências essenciais.

Com isso, através destes dois critérios expostos, é possível identificar quatro possíveis direções que o processo de diversificação de uma firma pode tomar. Na primeira, convém citar a que se caracteriza por diversificação horizontal (ou lateral) e a diversificação (ou integração) vertical. Na segunda é a diversificação concêntrica e a diversificação em conglomerado. A figura 10 esquematiza essa descrição.

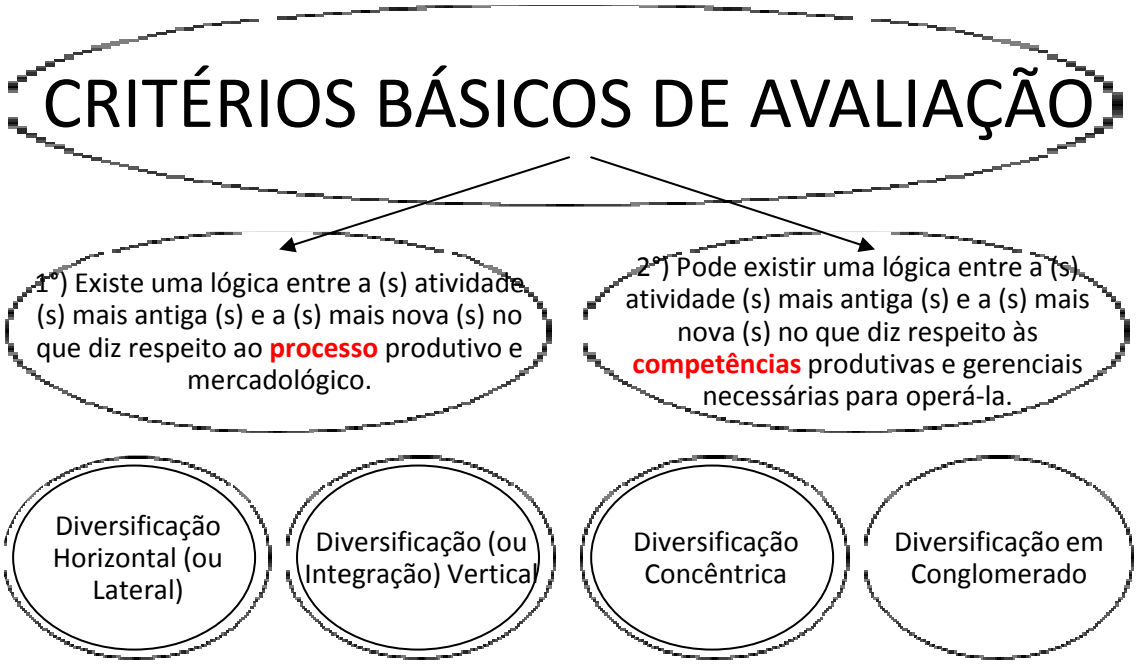


Figura 10 – Formas de avaliação de processos de Diversificação de firmas
Fonte: Elaboração própria baseada em Britto In HASENCLEVER; KUPFER (2002).

Basicamente o movimento de diversificação horizontal (ou lateral) consiste no que foi exposto no terceiro item, denominado de "complementaridades tecnológicas e comerciais", do tópico supracitado, "fontes de economia de escopo". Segundo Britto In HASENCLEVER; KUPFER (2002) se traduz na exploração de economias de escopo e dos canais de comercialização da firma, sinalizando um processo de diversificação embasado em uma sinergia entre as atividades da empresa.

Esta sinergia é produto da aproximação entre as atividades, da similaridade existente no processo produtivo e comercial. São produzidos, portanto, produtos distintos, que se inserem em diferentes mercados, mas que possuem uma base tecnológica (e mercadológica) comum.

Quanto à diversificação (ou integração) vertical, esta consiste em alcançar ramos da cadeia produtiva que não eram alcançados anteriormente. Uma integração vertical para trás, ou à montante, quando amplia a atuação da empresa em direção ao upstream, não tem a característica de alterar a natureza do produto final[64]. Já uma integração vertical para frente, ou à jusante, quando amplia a atuação da empresa em direção ao downstream, tem a principal característica de alterar a natureza do produto final, alcançando mercados de maior valor agregado, produtos mais especializados.

Na analise de CARLTON e PERLOFF (2000) há uma simplificação e objetivação da questão caracterizando seis prós e três contras referentes ao aspecto da integração vertical. Os três contras destacados pelos autores são: o custo de se construir uma estrutura capaz de substituir os insumos adquiridos no mercado, o custo administrativo quando se eleva o tamanho da firma e o custo legal.

Os seis prós definidos pelos autores são: a eliminação dos custos de transação; redução dos problemas de entrega[65], a possibilidade de internalizar externalidades existentes[66], criar poder de mercado e, finalmente, quando uma firma não verticalizada sofrer de poder de mercado, deve eliminar este poder verticalizando-se, e assim, ter acesso aos seus insumos (para o caso de verticalização para trás), ou ao mercado final (para o caso de verticalização para frente).

Esse último é o principal motivo destacado por TIROLE (1988), quando explicita que uma integração vertical só se justifica quando o mercado a que a firma negocia insumos ou produtos finais, se distancia de um mercado em concorrência perfeita. Especificamente, para o caso dos insumos, o vendedor exerceria poder de monopólio,

---

[64] Pode até haver um aumento do valor agregado, porém este se dará pela redução dos custos.
[65] A entrega dos insumos torna-se responsabilidade da empresa.
[66] Corrigindo falhas de mercado e evitando restrições governamentais, como regulação e taxas, por exemplo.

enquanto para o caso dos produtos finais, o comprador exerceria poder de monopsônio. Ou seja, nos dois casos a empresa sofreria poder de mercado[67].

É necessário destacar que para esses dois tipos de diversificação apresentados, há um reforço das barreiras à mobilidade e à entrada, como afirma Britto In HASENCLEVER e KUPFER (2002), devido ao fato da similaridade e sinergia entre as atividades, antigas e novas, ser elevada. Portanto, existe a possibilidade da firma atuar prejudicialmente aos mercados no que tange ao grau de eficiência destes. Esse fato torna a empresa mais susceptível à que haja alguma possível ação de algum órgão regulador que impeça seu processo de diversificação.

Tal fato não é susceptível de acontecer em diversificação concêntrica e muito menos em conglomerado. Pois, na diversificação concêntrica, a lógica que gerou o processo de diversificação da empresa não é tão evidente do que quando segue a base tecnológica e mercadológica da mesma. A correlação entre as atividades da empresa existe, porém, é fraca, tênue, como mencionado anteriormente. Sua lógica de diversificação é de natureza subjetiva e, portanto, não tende a reforçar diretamente às barreiras à mobilidade e à entrada. Já para o caso da diversificação em conglomerado, a correlação e a sinergia entre as áreas nem existem.

Devido a isso, como critério de análise, buscou-se identificar a base tecnológica a que estão calcadas as atividades antigas e novas da firma. Pois, com isso, estima-se que seja possível auferir tendências de direções do processo de diversificação e conseguir, portanto, diagnosticar sua natureza: diversificação horizontal (ou lateral), diversificação (ou integração) vertical e ou diversificação concêntrica.

A diversificação em conglomerado é naturalmente excluída da análise. Isso acontece porque ao definir as possíveis indústrias progenitoras dessa indústria nascente, bio-refinarias com base em cana-de-açúcar, como sendo a indústria do petróleo[68] e a

[67] Que pode ser denominado, segundo VARIAN (1992) como poder de monopólio, quando o ofertante consegue estabelecer um preço acima do valor de mercado, ou como poder de monopsônio, quando o comprador consegue adquirir o produto por um preço abaixo do seu valor de mercado.
[68] Mais especificamente a indústria do refino de petróleo.

indústria sucroalcooleira[69], descarta-se a possibilidade de não haver correlação entre essas atividades. A correlação entre ambas indústrias citadas e as bio-refinarias analisadas é evidente[70].

Ademais, é preciso frisar que apesar de ter sido feito aplicações da teoria exposta "em cima" da indústria do refino de petróleo, este tópico não a fará. Entende-se que, por tratar-se de uma indústria já madura, buscar a os tipos de diversificação que a originaram, não faz sentido neste estudo[71].

No próximo capítulo, toda a teoria exposta é compilada e aplicada aos diversos cenários construídos para que possa facilitar a avaliação no capítulo 4, da questão das bio-refinarias com base em cana-de-açúcar, objeto de estudo desse trabalho.

[69] Com ênfase nas usinas e destilarias, isto é, a parte industrial, responsável por transformar a cana-de-açúcar em seus produtos finais, mais comumente conhecidos como álcool, açúcar e energia elétrica. É quem gera o bagaço de cana (APÊNDICE III).
[70] Assim como a relação entre elas: indústria do petróleo e indústria sucroalcooleira.
[71] Para um aprofundamento maior deste ponto, recomenda-se ver YERGIN (1993).

CAPÍTULO 2 – CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE RELAÇÃO: VARIÁVEIS ENDÓGENAS E EXÓGENAS À BIOREFINARIA

Este capítulo tem como objetivo construir matrizes cujas linhas dizem respeito às variáveis endógenas à bio-refinaria, descritas no capítulo anterior, mostradas na figura 3. As colunas referem-se às variáveis exógenas, calcadas em dois pilares: matéria-prima e mercado consumidor. Neste caso, cada célula da matriz representa combinações destas variáveis, onde, é confrontado o perfil (diferentes combinações de variáveis endógenas) com o ambiente em que a planta se encontra (diferentes combinações de variáveis exógenas).

A lógica de construção das matrizes de relação consiste basicamente em montá-las tendo como base as associações expostas na introdução de cada tópico deste mesmo capítulo, traduzidos na figura 11 (adicionando também a questão da economia de escala dinâmica), 12, 13, 15 e 16. Estas associações determinam quais variáveis exógenas são relevantes para a questão da localização e competição das rotas tecnológicas de bio-refinaria.

No término deste capítulo serão fornecidos todos os elementos constituintes da matriz de relação completa, com todas as combinações possíveis. Espera-se com isso, facilitar a análise elaborada no capítulo 4.

2.1 – Relação do grau de economia de escala com localização e competição

A presença ou não de economia de escala em bio-refinarias ajuda inferir o tamanho e a localização destas unidades industriais. Basicamente, uma bio-refinaria que possua ganhos de escala tenderá a operar em escalas maiores, ao contrário de uma que não possua este atributo, a qual pode funcionar numa escala reduzida. Escalas maiores, porém, envolvem logística para insumos e produtos, o que afeta a localização da unidade industrial.

Trata-se, portanto, da escala mínima eficiente[72] da bio-refinaria. Para uma unidade com economia de escala, a quantidade produzida em que a firma opera em escala mínima eficiente é em geral superior a que possua rendimentos constantes de escala. Isto está diretamente relacionado ao fator "tamanho" da fábrica, como já pôde ser percebido no capítulo anterior.

Vale esta suposição porque uma planta industrial que possua retornos constantes de escala deve ter o custo unitário de seu produto final semelhante para cada nível de produção. Com isso ela pode reduzir sua escala de produção sem que isso provoque um aumento de seus custos médios. Basicamente é o que ocorre em unidades que possuem modularidade, onde, os custos totais crescem ou decrescem em proporção similar a um aumento ou redução, respectivamente, da quantidade produzida.

Ao contrário, em plantas com economia de escala, os custos médios decrescem na medida em que há um aumento da quantidade produzida. Assim, estas produzem de forma mais eficiente em escalas mais elevadas, pois, na medida em que é reduzido o tamanho da mesma, há uma elevação no custo unitário do bem final, os custos médios. Ela não pode escolher produzir em pequena escala se quiser operar de maneira mais eficiente. Seus custos totais não variam em igual proporção da variação na quantidade produzida. Concluindo, não há presença de modularidade.

Como conseqüência, supõe-se que uma biorefinaria que possua economia de escala deva atuar em grande escala, produzindo, portanto, uma quantidade elevada de seu produto final, o que também demanda uma quantidade elevada de insumos disponível. Portanto, trata-se de uma condição necessária o fato de sua produção estar atrelada à existência de grande quantidade de matéria-prima acessível e relativa proximidade de grandes centros consumidores ou de centros de escoamento de produtos, como portos, como acontece com refinarias de petróleo.

Da mesma forma, plantas industriais modulares, podendo operar em pequena escala, conseguem penetrar em mercados mais isolados, possivelmente remotos, ou em nichos de mercado bem específicos. Conseguem atuar em mercados não explorados pelas

[72] Escala mínima eficiente diz respeito ao nível de produção em que os custos de cada unidade produzida são os mais baixos, portanto, a firma é mais eficiente. Depende, logicamente, da função de custo da firma. Ver VARIAN (1992).

unidades com economia de escala, ou pela inacessibilidade a grandes quantidades de matéria-prima, ou porque só têm acesso a um mercado consumidor restrito, limitado na quantidade demandada. Porém, a presença de modularidade não necessariamente indica que uma determinada planta industrial deva localizar-se isoladamente. Existem fatores tecnológicos, associados à qualidade, que influenciam no uso destas plantas. No caso do GTL (Gas To Liquids) modular, com reatores de micro-canais, um fator que a favorece é o processo ter que ser executado dentro de um navio.

A seguir, na figura 11, é esquematizada essa relação explanada entre economia de escala e modularidade (ou hipoteticamente, retornos constantes de escala, como demonstrado na figura 4), frente ao tamanho e localização das plantas industriais:

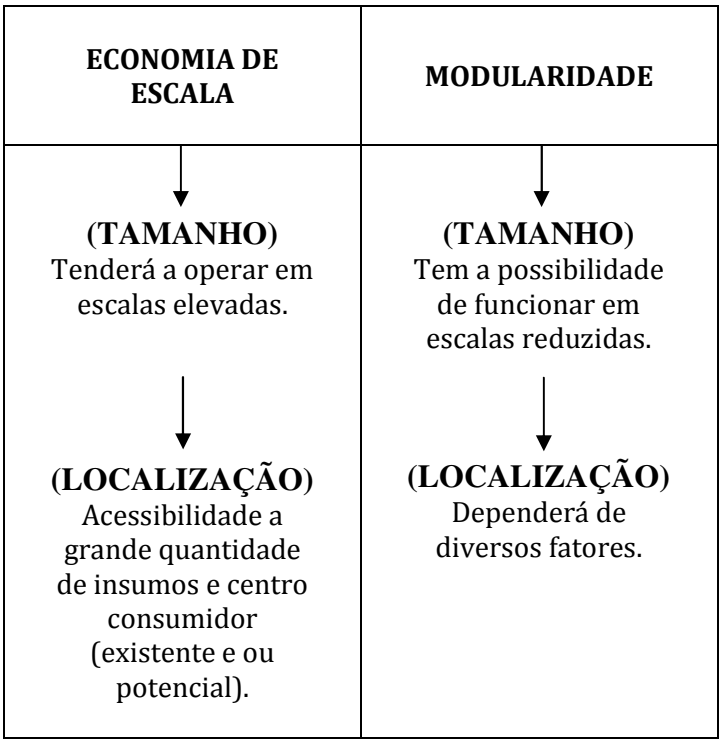


Figura 10 - Tamanho e Localização de Bio-refinarias com economia de escala e retornos constantes de escala

Desta forma é exposta a relação entre economia de escala e modularidade (retornos constantes de escala) com tamanho e conseqüentemente, a localização das plantas industriais. Portanto, a existência ou não deste elemento pode determinar a localidade de atuação mais indicada para uma determinada rota de biorefinaria.

Contudo, é percebido que as associações traçadas são referentes especificamente as economias de escala estáticas. O que dizer das dinâmicas? Qual a relação destas com a localização e competição das plantas industriais?

Esta questão já foi respondida no item "1.1.2 – modularidade e economia de escala", e, portanto, não necessita de mais exposição, porém, é preciso frisar o fato deste elemento possuir uma relação determinante com a questão da competição, muito mais do que com a questão da localização. Entende-se, por isso, que esta é independente com relação às variáveis exógenas mostradas na figura 10 (acesso à matéria-prima e mercado consumidor).

2.1.1 – Construção das "matrizes de relação" baseadas no grau de economia de escala, acesso aos insumos e mercado consumidor

Os primeiros elementos a serem confrontados estão apresentados na tabela 7. Neste caso, o passo inicial é construir relações baseadas nas economias de escala estáticas e o acesso a quantidades variadas de matéria-prima. Em seguida, adicionam-se o acesso a mercados consumidores. Para finalizar, acrescenta-se o elemento economia de escala dinâmica nas relações construídas.

Tabela 7 – Elementos utilizados para a construção das tabelas 8, 9 e 10.

FATORES INTERNOS Variável chave (linhas)	**Economia de Escala estática**	**A**	Plantas com Economia de Escala
		B	Plantas de características Modulares
	Economia de Escala dinâmica	**C**	Horizonte promissor de redução de custos ao longo do tempo
		D	Reduzido espaço para diminuição de custos ao longo do tempo
FATORES EXTERNOS Ambiente (colunas)	**Matéria-Prima**	**I**	Acesso a grandes quantidades de insumo
		II	Difícil acesso a grandes quantidades de insumo
	Porte do Mercado Consumidor	**III**	Mercado Consumidor existente ou potencial
		IV	Mercado Consumidor restrito ou limitado

A tabela 8 expõe de maneira simplificada, a primeira relação, que consiste em plantas com perfil A ou B frente ao acesso bom ou ao ruim (I ou II), de quantidades elevadas de matéria-prima.

Tabela 8 – Grau de economia de escala versus acesso às fontes de matéria-prima.

	Acesso a grandes quantidades de insumo (=I)	**Difícil acesso a grandes quantidades de insumo (=II)**
Plantas com Economia de Escala (= A)	A condição de localização desta planta é adequada, pois a sua demanda por matéria-prima é elevada.	Situação desfavorável. Terá de processar menos matéria-prima do que deseja e com isso operará sua planta em uma escala inferior à EME, o que se traduz por CMe superiores.
Plantas de características Modulares (= B)	É indiferente quanto ao seu nível de EME. Porém, pode estar em situação inferior na competição com plantas que possuem economia de escala, caso seus custos sejam superiores.	É indiferente quanto ao seu nível de EME. Porém, tomando o fato desta localização ser ruim para plantas que operam em grandes escalas, pode ser uma boa oportunidade de atuação dessas unidades. Pode ser que seus CMe sejam inferiores. Depende da quantidade insumos que a **A** estiver processando.

A tabela 9 refere-se à introdução na tabela 8, das variáveis referentes ao acesso a um mercado consumidor existente ou potencial e restrito ou limitado. Tais variáveis estão diretamente relacionadas ao tamanho do mercado consumidor, isto é, se estes possuem um porte adequado para absorver a quantidade de produtos produzida pela planta industrial. As relações são descritas de maneira sucinta. Como são variáveis exógenas combina-se com os elementos da coluna (I e II) na matriz representada pela tabela 8.

Tabela 9 – Grau de economia de escala versus acesso às fontes de matéria-prima e mercado consumidor.

	I + mercado consumidor existente ou potencial (=III)	**II + mercado consumidor existente ou potencial (=III)**	**I + mercado consumidor restrito ou limitado (=IV)**	**II + mercado consumidor restrito ou limitado (=IV)**
A	Situação adequada. Ver a figura 10.	Devido ao fator **II**, produz numa escala inferior à EME. De nada adianta ter acesso a um mercado consumidor capaz de absorver uma grande produção. Pela condição de oferta versus demanda, os preços dos insumos deverão subir.	Tem possibilidade de produzir em larga escala, mas **IV** não absorve a oferta. Pela condição de oferta versus demanda os preços devem cair.	Localização inadequada. Comentário similar ao de **A + II**. A menor escala possível de se trabalhar é aquela em que seus CMe são similares aos exercidos por **B**.
B	Não difere da combinação **B + I**. Agravada ainda mais por **III** (ambiente favorável para que plantas tipo A operem em EME).	Comentário similar ao **B + II**. Contudo, sendo o mercado grande, provavelmente haverá uma escassez do produto na região, equacionada com a elevação de seu preço. Situação pode ser vantajosa à **B**.	Indiferente quanto à EME e, as chances de ocorrência da situação prejudicial exposta em **B + I,** diminuem devido ao fator **IV**. Mas sua sustentação vai depender dos CMe de **A** e **B**.	Possivelmente a melhor localização para **B**, devido à dificuldade de penetração de **A** nessas regiões, pela combinação de **II + IV**.

Por fim, é possível criar relações acrescentando às tabelas anteriores o conceito de economia de escala dinâmica, ou seja, reduções de custo ao longo do tempo. A existência de parâmetros de aprendizagem tecnológica e ou a identificação de estágios de maturidade a que estas estão inseridas, como estabelecido em ENOS (1958), é o fator que determina as classificações C e D da tabela 10.

Acrescenta-se, portanto, à tabela 9, duas variáveis distintas onde, em uma há um horizonte promissor (C) e na outra, um de reduzido (D) espaço para diminuição dos custos ao longo do tempo. Estas, naturalmente, são combinadas com os elementos das linhas da matriz, pois dizem respeito às variáveis endógenas, aos perfis das plantas. Como conseqüência, a tabela 10 refere-se a uma matriz quadrática 4 x 4.

Tabela 10 – Grau de economia de escala (estática e dinâmica) versus acesso às fontes de matéria-prima e mercado consumidor. Principal matriz da "Vertente Escala".

	I + III	II + III	I + IV	II + IV
A + C	A localização é adequada, como foi exposto na tabela anterior e na **Fig. 2**. Por isso, a situação ao se adicionar o fator **C**, é a mais favorável possível para este tipo de planta.	Pelo fator **C**, pode ser que surjam inovações frente a um maior aproveitamento dos insumos, por exemplo. No presente, a localização continua inadequada.	O **C** poderia no futuro, com CMe menores, viabilizar a sobrevivência da firma frente a preços muito baixos. Mas como fazer no presente? Está mal localizado.	As reduções dos CMe da firma no futuro serão suficientes para competir com **B**? Como fazer no presente? Situação muito desconfortável para essa planta e difícil de sustentar.
A + D	A adição do fator **D** cria um cenário em que, apesar de estar bem localizada, a planta segue um perfil mais destinado às tecnologias maduras.	Situação muito desfavorável.	Situação muito desfavorável.	Insustentável.
B + C	Continua dependendo dos CMe. Com a adição de **C**, as perspectivas de redução e, portanto, de tornar-se mais competitiva se elevam. A competição é mais favorável com **A + D** do que com **A + C**.	Acessibilidade ruim a grande quantidade de insumos não tem impacto relevante nos CMe. Seu horizonte é bom, pelo **C**, e, há mercado consumidor. Situação favorável a essa tecnologia.	**A + C (ou D)** não operará em EME. Qual mais favorecido na competição é uma questão que depende dos CMe de ambos. Em preços baixos, o menor CMe lidera. A adição do fator C melhora sua situação, porém, permanece a incerteza.	Comentário feito em B com **II + IV**, adicionando o fator **C**. Parece ser a situação mais favorável que estas plantas podem atingir.
B + D	Tecnologia de perfil maduro em um cenário aparentemente desfavorável.	Parece ser adequado. O espaço é maior com A + D do que com A + C competindo.	Similar à **B + C** com **I + IV**, mas, a situação se agrava com a troca de **C** com **D**.	Apesar de bem localizada essa planta segue um perfil de uma tecnologia madura.

A seguir, a relação entre economia de escopo e perfis de mercado consumidor. Em vez de confrontar diretamente estes elementos à tabela 10, decidiu-se analisá-los separadamente. Busca-se com isso compreender como se relacionam com a questão da localização e competição.

2.2 - Relação do grau de economia de escopo com localização e competição

A importância da economia de escopo nas decisões de longo prazo das firmas é tão relevante quanto a detecção do seu grau de economia de escala, segundo TALAYSUM et al (1986). Essa importância é expressa no fato de que plantas industriais que possuam economias de escopo têm vocação para a diversificação[73], assim como outras que não possuam este atributo, têm vocação à especialização. Isso se relaciona diretamente com a questão da localização e competição das diferentes rotas tecnológicas de biorefinarias, expostas no capítulo 3.

De uma forma geral, como conseqüência lógica, se esta for diversificada ela deverá ter acesso a algum mercado consumidor (existente ou potencial) que tenha capacidade de absorver a diversidade de produtos por ela produzidos. Caso a planta não seja diversificada, seu acesso deve ser direcionado a algum mercado consumidor que absorva seu único produto produzido (ou poucos produtos produzidos). Neste caso, podem estes mercados ser diversificados ou não. Essa idéia é verificada logo a seguir, na figura 12.

[73] Isso pode ser encontrado em Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), onde é afirmado que uma firma diversificada pode possuir na economia de escopo, a razão em produzir mais de um produto.

Figura 12 – Perfil e Localização de Bio-refinarias com alto grau de economia de escopo e sem (ou com baixo grau de) economia de escopo

A presença ou não de economia de escopo pode imprimir uma relação com o risco de uma determinada rota. Contudo, essa relação não é tão precisa porque depende de outro conceito analisado: a flexibilidade. É uma variável que vem a complementar a questão do grau de economia de escopo.

2.2.1 - Construção de "matrizes de relação" baseadas no grau de economia de escopo e perfil do mercado consumidor

Na tabela 11 e 12, são inseridas nas linhas as variáveis: alto e baixo grau de economia de escopo. Na coluna aloca-se o potencial que o mercado consumidor possui em absorver o conjunto de produtos produzidos pela firma.

Tabela 11 - Elementos utilizados para a construção da tabela 12.

FATORES INTERNOS Variável chave (linha)	**Grau de Economia de Escopo (potencial de diversificação)**	**E**	Alto grau de economia de escopo
		F	Sem (ou com baixo grau de) economia de escopo
FATORES EXTERNOS Ambiente (coluna)	**Demanda* do Mercado Consumidor pelo conjunto de bens produzidos**	**V**	Existente ou potencial
		VI	Restrita ou limitada

*A demanda neste caso não é por quantidade e sim por variedade. Procura-se saber se o mercado consumidor demanda o escopo de bens produzidos pela planta. Assim, para evitar confusão, V e VI dizem respeito à variedade, enquanto III e IV referem-se à quantidade.

Tabela 12- Grau de economia de escopo versus grau de diversificação alto e baixo do mercado consumidor.

	Existente ou potencial (=V)	**Restrita ou limitada (=VI)**
Alto grau de Economia de Escopo (= E)	Localização compatível, como exposto na figura 12.	Sendo **E** uma planta com potencial elevado de diversificação, pode ser arriscada essa localização. Vai depender principalmente da sua flexibilidade.
Sem (ou com baixo grau de) Economia de Escopo (= F)	Localização compatível.	Também dependerá da flexibilidade.

2.3 – Relação do grau de flexibilidade com localização e competição

Sistemas flexíveis são capazes de responder de forma mais rápida a estímulos externos[74]. Assim, caso uma biorefinaria possua economia de escopo, porém, tenha uma baixa flexibilidade em seu processo produtivo, sua rentabilidade, portanto, sua

[74] Como exemplo desses estímulos, pode-se citar uma elevação de preços de um de seus bens finais produzidos, assim como uma perda de fatia de mercado de um determinado produto devido a entrada de outro bem, o qual conseguiu ser mais bem sucedido no processo competitivo (maior aceitação de consumidores finais).

sobrevivência, se torna mais dependente do mercado consumidor do que a de plantas industriais que sejam flexíveis. Como pode ser observado em TALAYSUM et al (1986), quanto maior o grau de flexibilidade de um sistema, maiores são os benefícios auferidos por plantas que possuam economia de escopo.

Conclui-se, portanto, que sistemas com maior flexibilidade têm maiores possibilidades de atuação, fazendo com que a firma consiga direcionar seu esforço produtivo, escolhendo a quantidade de cada tipo diferente de bem[75] por ela ofertado, garantindo uma maior rentabilidade.

Tal fato está diretamente relacionado ao risco das firmas. Pois o grau de flexibilidade é determinado pela capacidade de respostas destas plantas a alterações em determinados mercados que ela tem atuação. Fazendo com que sistemas flexíveis possuam, naturalmente, riscos menores do que sistemas não flexíveis, que estão em uma condição que os torna mais dependentes de seu mercado consumidor. Mais vulneráveis às suas mudanças.

Como conseqüência, biorefinarias que possuam sistemas flexíveis de produção detêm uma vantagem competitiva com relação as que não possuem essa característica.

Ademais, por isso, suas áreas possíveis de localização industrial, referente à destinação de seus produtos finais aos respectivos mercados consumidores, devem ser maiores às áreas possíveis de atuação das unidades que não possuem esse atributo.

As opções de localização das firmas com baixo grau de flexibilidade são mais restritas por conta de seu risco. Estas observações foram compiladas na figura 13, a seguir.

[75] Escolher a composição de sua cesta, seu mix de produtos.

Figura 13 - Graus de Flexibilidade de Bio-refinarias e sua relação com competição e localização

2.3.1 – A flexibilidade como complementação

Como já afirmado, a detecção do grau de flexibilidade do sistema produtivo é relevante para a redução da subjetividade exposta na tabela 12. Os elementos a serem somados a esta tabela estão relacionados aos graus de flexibilidade da planta industrial, observados na tabela 13.

Tabela 13- Elementos utilizados para a construção da tabela 14

FATORES INTERNOS **Variável chave (linhas)**	**Flexibilidade**	**G**	Sistemas de elevado grau de flexibilidade
		H	Sistemas inflexíveis ou de baixo grau de flexibilidade

Tabela 14 – Principal matriz da "Vertente Escopo"

	V	VI
E + sistemas de elevado grau de flexibilidade (=G)	Localização mais favorável possível para essa planta. Ainda mais se tratando de sistemas flexíveis. A planta possa adequar sua oferta à demanda de modo que busque vender os bens que estejam mais bem cotados no mercado, aumentando sua rentabilidade.	Pode adequar sua produção aos produtos requeridos pelo mercado. A firma pode ir rumo à especialização, garantindo sua sobrevivência. Porém salienta-se: sua rentabilidade poderia ser superior em mercados mais diversificados.
E + sistemas inflexíveis ou de baixo grau de flexibilidade (= H)	Quanto menos flexível menor a sua possibilidade de ofertar de acordo com os bens que melhor estão cotados no mercado, reduzindo sua chance de elevar sua rentabilidade. Porém a localização é compatível.	Localização incompatível. Condição em que esta planta encontra-se mais desfavorecida. A planta está vulnerável, pois pode não encontrar destino a alguns de seus produtos (ou todos).
F (= baixo grau de economia de escopo)* + G	Localização adequada. O **G** introduz a essa planta o mesmo ponto positivo introduzido em **E**, porém, existe uma vantagem: pela sua cesta de bens ser pequena, neste caso seu custo de monitoramento dos preços do mercado é menor por ter poucas opções de produto.	Incompatível quando o escopo de produtos demandado não corresponde ao produzido pela firma. O fator G ameniza o risco. Porém, essa situação exige um maior detalhamento (nesta combinação não vale generalizar)**.
F (= baixo grau de economia de escopo)* + H	Localização compatível, porém, seu espaço de adequação de sua produção frente às variações de preços no mercado para elevar a rentabilidade é comprometido.	Pela presença do H, a situação fica mais desfavorável do que em F + G, porém, da mesma forma, exige um maior detalhamento (nesta combinação não vale generalizar)**.

* A flexibilidade de produto não faz sentido quando não há economia de escopo.

** No capítulo 5 com a aplicação de casos particulares, essa combinação poderá ser mais bem trabalhada.

2.4 – A fusão das "matrizes de relação"

Para a criação de relações que englobem todas as variáveis expostas até aqui como, economias de escala (dinâmica e estática), economias de escopo, flexibilidade, acesso à matéria-prima, mercado consumidor e sua diversificação, deve-se unificar o resultado de ambas as análises efetivadas, representadas pelas duas vertentes mostradas: "escala" e "escopo".

Portanto, a tabela 10 (de dimensão quatro por quatro), "Vertente Escala" e tabela 14 (de dimensão quatro por dois), "Vertente Escopo", devem fundir-se. O resultado é uma matriz de dimensões dezesseis por oito, como a exposta na equação 13, a seguir.

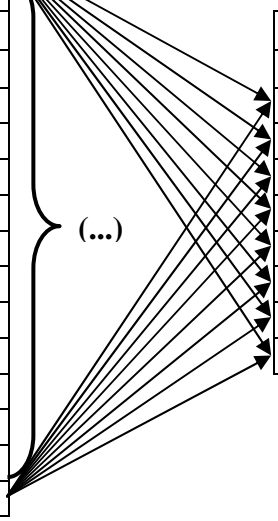
13) $\boldsymbol{c_{ij}} = \begin{pmatrix} c_{1\,1} & \cdots & c_{1\,8} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{16\,1} & \cdots & c_{16\,8} \end{pmatrix}$

Sendo i = {1, ..., 16/ i ∈ N} e j = {1, ..., 8/ j ∈ N}

Assim, como se pode observar na equação 13, uma representação deste tipo tornar-se-ia inviável e desnecessária. Inviável pelo tamanho excessivo da tabela e desnecessária pela possibilidade existente de enxergar os cenários sem que seja preciso montá-la.

Isso é possível, por exemplo, através da figura 14, onde duas tabelas representam a composição das linhas e colunas da matriz exposta na equação 13, e, sua combinação resulta nas células mencionadas. Como um meio de visualizá-las, é possível utilizar como base as células correspondentes na tabela 10 ("Vertente Escala") e tabela 14 ("Vertente Escopo"), sem que seja necessário construir uma nova matriz.

variáveis endógenas	
LINHA = i	**COMPOSIÇÃO**
1	A+C+E+G
2	A+D+E+G
3	B+C+E+G
4	B+D+E+G
5	A+C+E+H
6	A+D+E+H
7	B+C+E+H
8	B+D+E+H
9	A+C+F+G
10	A+D+F+G
11	B+C+F+G
12	B+D+F+G
13	A+C+F+H
14	A+D+F+H
15	B+C+F+H
16	B+D+F+H



variáveis exógenas	
COLUNA = j	**COMPOSIÇÃO**
1	I+III+V
2	II+III+V
3	I+IV+V
4	II+IV+V
5	I+III+VI
6	II+III+VI
7	I+IV+VI
8	II+IV+VI

Figura 14 – Composição das linhas e colunas da matriz 16x8, exposta na equação 13

Também se pode entender a figura 14 como uma representação da seguinte questão:

1) Dada uma unidade industrial com determinado perfil (combinação de variáveis endógenas), que características deveriam possuir o ambiente (combinação de variáveis exógenas) a que esta seria instalada?

Contudo, a questão pode ser invertida:

2) Dado um determinado ambiente (combinação de variáveis exógenas), que características uma planta deveria possuir (combinação de variáveis endógenas) para atuar adequadamente naquele local?

No caso da questão 2, a figura 14 também deveria estar invertida, isto é, com as setas partindo das variáveis exógenas, as quais deveriam anteceder as endógenas.

A seguir são expostos os elementos necessários para a construção da matriz completa, com todas as possibilidades. Para isso, deve ser mostrada como são inseridas as outras variáveis, diferenciação e direções do processo de diversificação (descrita anteriormente como uma análise do processo de diversificação "externa" à planta industrial). Qual a relação destes elementos com a localização e competição das plantas?

2.5 – Relação do grau de diferenciação com localização e competição

A diferenciação neste trabalho vem com intuito de complementar a análise de localização e competição das biorefinarias mais no tocante à competição. Isso porque as plantas de biorefinarias com capacidade de criar produtos diferenciados poderão agregar mais valor ao seu produto, ofertando-os a preços superiores aos observados no mercado. Com isso ela tem a possibilidade de conseguir maiores níveis de rentabilidade. Para o caso de plantas que possuam custos não competitivos com os do mercado, ter seus produtos ofertados em nichos de mercado diferentes, permitindo que estes sejam ofertados a preços superiores aos ofertados pelos concorrentes, pode significar a garantia de sobrevivência dessa planta. Portanto, como pode ser observado na figura 15, a diferenciação é mais um elemento importante para esse trabalho.

POTENCIAL ALTO DE OFERTAR PRODUTOS DIFERENCIADOS	**POTENCIAL BAIXO (OU NULO) DE OFERTAR PRODUTOS DIFERENCIADOS**
↓	↓
(VANTAGEM COMPETITIVA) Existe a possibilidade de buscar nichos de mercado particulares e com isso ofertar seu produto a preços superiores aos do mercado.	**(DESVANTAGEM COMPETITIVA)** Tem baixa possibilidade de galgar nichos particulares e ofertar a preços maiores. Compete em nichos comuns.
↓	↓
(OPORTUNIDADE?) Uma chance de sobrevivência caso possua custos piores e também um diferencial caso seja competitivo.	**(OPORTUNIDADE?)** Com custos piores a situação se agrava. Caso sejam competitivos não há problema. Não afeta a sobrevivência da firma.

Figura 15 – Vantagens competitivas e oportunidades auferidas na produção de produtos diferenciados

2.5.1 – A contribuição da diferenciação

Na tabela 15 são expostas as duas variantes do elemento diferenciação. Uma representa um potencial elevado de a planta ofertar produtos diferenciados e outra a firma possui um potencial baixo ou mesmo nulo de ofertar estes produtos.

TABELA 15 – Variáveis endógenas: diferenciação

FATORES INTERNOS **Variável chave (linhas)**	**Diferenciação**	***I***	Potencial alto de ofertar produtos diferenciados
		J	Potencial baixo (ou nulo) de ofertar produtos diferenciados

Seus elementos devem combinar-se aos elementos da linha da matriz da equação 13. Assim, as cento e vinte e oito células existentes na matriz $C_{16\ 8}$, o *I* e o *J* foram adicionados, gerando duzentos e cinqüenta e seis novas, gerando uma nova matriz $C_{32\ 8}$. Como exposto na figura 15, para cada célula da matriz anterior, quando adicionado o fator *I*, cria-se uma vantagem competitiva a esta planta, que pode ser revertida em uma oportunidade. Do contrário, quando é combinado o fator *J*, não existe a alternativa (ou esta é baixa) de produzir bens diferenciados, logo, não existe a oportunidade.

2.6 – Relação da direção do processo de diversificação com localização e competição

Como apresentado anteriormente, uma firma possuir economia de escopo e explorar ao menos que parcialmente esse atributo[76], transformar-se-á em uma firma diversificada. Todavia, a recíproca nem sempre é verdadeira, ou seja, nem toda firma diversificada possui ou explora suas economias de escopo[77].

Com isso, ao observar o fato de que não há bio-refinarias no mundo que utilizam bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica, sentiu-se uma necessidade de construir uma análise de diversificação "externa" à firma, isto é, pensando na existência das plantas analisadas como resultado de um processo de diversificação de firmas inseridas em outras indústrias, em outros setores.

Naturalmente, neste caso, uma análise das direções do processo de diversificação ultrapassa o conceito de economia de escopo. É uma tentativa de elucidar a seguinte questão: quais plantas de bio-refinaria possuiriam desvantagens competitivas por não ser resultado de um processo de diversificação com origem na exploração de economias de escopo de indústrias já consolidadas, e, quais teriam vantagens por serem?

Com isso, determina-se que quanto mais uma planta de bio-refinaria for similar a plantas de indústrias já consolidadas, mais vantagens competitivas ela possui, pois, este fato está diretamente relacionado com o fator de aprendizagem exposto no tópico "Economia de Escala", mais especificamente, economia de escala dinâmica. O esforço exercido para conseguir redução de custos é menor, por que já parte-se de um patamar de aprendizado maior.

---

[76] Que, como demonstrado, pode originar-se de três características de elevado perfil tecnológico: existência de fatores comuns, existência de reserva de capacidade e complementaridades tecnológicas e comerciais.

[77] Contudo, analisar todo e qualquer tipo de diversificação que uma planta de bio-refinaria tem a possibilidade de seguir não é o objetivo desse estudo, principalmente se tratando do processo de diversificação "interno" da firma. Essa busca tornar-se-ia deveras penosa. É necessário encontrar um critério de avaliação objetivo. E por isso, buscar a vocação para a diversificação através da identificação de economias de escopo foi o critério escolhido neste trabalho. Isso tem como pilar a base tecnológica, conceito descrito logo a seguir.

Com relação à localização, é possível haver uma característica que determine que, quanto mais uma bio-refinaria for similar a plantas de indústrias consolidadas, mais próximas geograficamente destas, ela deverá estar. A razão está na possibilidade de usufruir do mesmo corpo técnico, ou de haver complementaridades de produção[78], por exemplo, contudo, no quesito localização das plantas, uma relação direta entre as similaridades das duas indústrias não é tão certa quanto no caso da competição.

Figura 16 – Relação dos diferentes processos de diversificação com a competição e localização das novas plantas industriais.

[78] Essa característica também foi expressa anteriormente, como fonte de economia de escopo, mas será mais detalhada a seguir.

2.6.1 – A contribuição da análise das direções do processo de diversificação

A tabela 16, representa os fatores internos que deverão combinar com as linhas da matriz $C_{32\ 8}$, e gerar conseqüentemente a matriz $C_{64\ 8}$. Esta representa a matriz de relação completa, com todos os elementos, endógenos e exógenos supracitados.

Tabela 16 – Variáveis endógenas: diversificação

FATORES INTERNOS **Variável chave (linhas)**	**Diversificação**	***K***	Mesma base tecnológica
		L	Base tecnológica diferente

Deve-se destacar que para cada célula da matriz $C_{32\ 8}$, ao adicionar-se a variável *K*, como mostrado na figura 16, pode-se atribuir uma vantagem competitiva a esta planta, assim como auferir alguma possibilidade de melhor localização. Isso acontece como conseqüência do fato das novas plantas em foco compartilharem da mesma base tecnológica das plantas antigas (pertencentes à outra indústria, a outro setor). Tal movimento de diversificação, como exposto no item "1.5 – direções do processo de diversificação", caracteriza-se como uma diversificação horizontal e ou vertical. Do contrário, isto é, quando se adiciona o fator *L*, observa-se um movimento de diversificação concêntrica ou em conglomerado[79].

[79] Para o caso deste trabalho, ou seja, bio-refinarias que têm o bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima básica, observa-se um movimento de diversificação concêntrica, visto que a diversificação em conglomerado é descartada quando são consideradas as indústrias de petróleo e sucroalcooleiras como possíveis progenitoras dessa indústria nascente.

2.7 – "Matriz de Relação" completa

As células que as bio-refinarias inseridas nas diferentes rotas tecnológicas poderão se deparar no capítulo 4 estão inclusas na matriz da equação 14, exposta a seguir. A figura 17 representa a figura 14 tendo sido adicionadas diferenciação e diversificação.

14) $\boldsymbol{C_{ij}} = \begin{pmatrix} c_{1\,1} & \cdots & c_{1\,8} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{64\,1} & \cdots & c_{64\,8} \end{pmatrix}$

Sendo i = {1, ..., 64/ i ∈ N} e j = {1, ..., 8/ j ∈ N}

variáveis endógenas	
LINHA = i	**COMPOSIÇÃO**
1	*A+C+E+G+I+K*
2	*A+D+E+G+I+K*
3	*B+C+E+G+I+K*
4	*B+D+E+G+I+K*
5	*A+C+E+H+I+K*
6	*A+D+E+H+I+K*
7	*B+C+E+H+I+K*
8	*B+D+E+H+I+K*
9	*A+C+F+G+I+K*
10	*A+D+F+G+I+K*
11	*B+C+F+G+I+K*
12	*B+D+F+G+I+K*
13	*A+C+F+H+I+K*
14	*A+D+F+H+I+K*
15	*B+C+F+H+I+K*
16	*B+D+F+H+I+K*
17	*A+C+E+G+J+K*
18	*A+D+E+G+J+K*
19	*B+C+E+G+J+K*
20	*B+D+E+G+J+K*
21	*A+C+E+H+J+K*
22	*A+D+E+H+J+K*
23	*B+C+E+H+J+K*
24	*B+D+E+H+J+K*
25	*A+C+F+G+J+K*
26	*A+D+F+G+J+K*
27	*B+C+F+G+J+K*
28	*B+D+F+G+J+K*
29	*A+C+F+H+J+K*
30	*A+D+F+H+J+K*
31	*B+C+F+H+J+K*
32	*B+D+F+H+J+K*
33	*A+C+E+G+I+L*
34	*A+D+E+G+I+L*
35	*B+C+E+G+I+L*
36	*B+D+E+G+I+L*
37	*A+C+E+H+I+L*
38	*A+D+E+H+I+L*
39	*B+C+E+H+I+L*
40	*B+D+E+H+I+L*
41	*A+C+F+G+I+L*
42	*A+D+F+G+I+L*
43	*B+C+F+G+I+L*
44	*B+D+F+G+I+L*
45	*A+C+F+H+I+L*
46	*A+D+F+H+I+L*
47	*B+C+F+H+I+L*
48	*B+D+F+H+I+L*
49	*A+C+E+G+J+L*
50	*A+D+E+G+J+L*
51	*B+C+E+G+J+L*
52	*B+D+E+G+J+L*
53	*A+C+E+H+J+L*
54	*A+D+E+H+J+L*
55	*B+C+E+H+J+L*
56	*B+D+E+H+J+L*
57	*A+C+F+G+J+L*
58	*A+D+F+G+J+L*
59	*B+C+F+G+J+L*
60	*B+D+F+G+J+L*
61	*A+C+F+H+J+L*
62	*A+D+F+H+J+L*
63	*B+C+F+H+J+L*
64	*B+D+F+H+J+L*

(...)

variáveis exógenas	
COLUNA = j	**COMPOSIÇÃO**
1	I+III+V
2	II+III+V
3	I+IV+V
4	II+IV+V
5	I+III+VI
6	II+III+VI
7	I+IV+VI
8	II+IV+VI

Figura 17 - composição das linhas e colunas da matriz 64x8, exposta na equação 14

Com tudo isso, para uma descrição de cada uma das quinhentos e doze células da matriz $C_{64\ 8}$, pode-se seguir a recomendação feita no item "2.4 – a fusão das matrizes de relação", e acrescentar após, as recomendações referentes às variáveis chaves restantes: diferenciação e diversificação.

A seguir, será feita uma aplicação do que foi exposto, tomando os elementos da figura 17 e construindo as células necessárias, para a indústria do refino de petróleo. As composições das linhas podem ser encontradas nas aplicações sobre a indústria do refino de petróleo, exercidas no capítulo anterior.

2.8 – A aplicação no refino de petróleo

Para compor as linhas da matriz $C_{64\ 8}$, referentes à refinaria de petróleo, buscam-se as informações necessárias para a descrição nestas unidades industriais, das variáveis chaves expostas na figura 3.

As informações referentes ao grau de economia de escala (estática e dinâmica) estão no item "1.1.3 – economia de escala em refinarias de petróleo", enquanto as referentes à economia de escopo e flexibilidade estão respectivamente nos itens "1.2.2 – economia de escopo em refinarias de petróleo" e "1.3.1 – flexibilidade no refino de petróleo". Já com relação à diferenciação, encontra-se no item "1.4.1 – diferenciação no refino (e distribuição) de petróleo".

Contudo, como pôde ser observado no item "1.5 – direções do processo de diversificação" decidiu-se não realizar um estudo ao seu respeito. Isso acontece porque, como já mencionado, sendo o objetivo desta variável detectar vantagens competitivas oriundas do processo de diversificação efetuado, não faz sentido exercer este esforço para o caso do refino de petróleo, pois, é sabido que esta já se trata de uma indústria madura, consolidada.

2.8.1 – Definição das linhas

Portanto, pode ser observado na tabela 17, as possíveis classificações que as variáveis chaves de uma refinaria de petróleo podem obter. Neste caso, é interessante destacar o fato de que, apesar das diferentes configurações que uma planta desta pode adquirir, elevando seus graus de complexidade, como exposto no item "1.3.1 – flexibilidade no refino de petróleo", é inegável que as refinarias são plantas que operam em elevado grau de economia de escala e escopo. Ademais, por tratar-se de uma indústria madura, encontra-se no segundo estágio descrito por ENOS (1958), que o cita como um período onde o processo de redução de custos ao longo do tempo é mais árduo do que no primeiro estágio, que ocorre de forma mais rápida. Com isso, devem ser atribuídas as classificações *A*, *D* e *E* para os três elementos citados.

Tabela 17 – Conjunto de variáveis endógenas possíveis para refinarias

VARIÁVEL CHAVE	CLASSIFICAÇÕES POSSÍVEIS
Economia de escala estática	*A*
Economia de escala dinâmica	*D*
Economia de escopo	*E*
Flexibilidade	*G, H*
Diferenciação	*I, J*
Direções do processo de diversificação	*K, L* (não foi avaliado)

Com relação à flexibilidade e diferenciação, como exposto nos itens, "1.3.1 – flexibilidade no refino de petróleo" e "1.4.1 – diferenciação no refino (e distribuição) de petróleo", suas classificações dependem da configuração de seus parques industriais, distinguidos na tabela 4 como *hydroskimming*, *cracking* e *coking*. Para estes, quanto mais próximo de configurações *coking*, mais complexas e, maior o grau de flexibilidade e maior o potencial de diferenciação dos produtos.

Portanto, pode-se estabelecer que configurações *hydroskimming* enquadram-se nas classificações *H* e *J*, que representam cenários onde a planta possui um grau de

flexibilidade mais baixo, assim como um potencial reduzido de diferenciação de produtos. Tal classificação é razoável porque apesar de plantas com esta configuração, como mostrado na tabela 4, possuírem unidades de reforma catalítica e isomerização, que resultam em gasolinas com maior octanagem, como foi exposto no item "1.4.1 – diferenciação no refino (e distribuição) de petróleo", não pode ser considerada uma planta com elevado potencial de diferenciação de produtos. Para estas, a diferenciação estaria direcionada apenas a uma quantidade produzida de gasolina Premium.

Nas configurações *cracking*, através do FCC, há uma otimização do refino para gasolina, representando uma produção em maior quantidade de gasolinas Premium do que na *hydroskimming*. Ademais, refinarias *cracking* são capazes de aumentar o valor agregado de produtos obtidos na *hydroskimming*, como resíduos da UDA. Portanto, apesar de, para diferenciação de outros produtos, como diesel, por exemplo, deveriam ser adicionadas outras unidades, pode-se dizer que é uma planta com grau de diferenciação alto. Contudo, apesar de ser flexível com relação aos insumos utilizados, torna-se inflexível com relação aos produtos produzidos[80]. Com isso, as configurações *cracking* foram classificadas como *H* e *I*.

Para refinarias de configuração mais complexas como *coking*, onde, vale ressaltar, adiciona-se à *cracking* unidades de HCC, as quais, além de elevarem a flexibilidade da planta, como demonstrado em ULLER et al (2008), otimizam a produção de dieseis Premium, com maior número de cetanas. Portanto, para esta configuração as classificações são *G* e *I*. Ou seja, são flexíveis e têm grande potencial de produção de produtos diferenciados. A tabela 18, a seguir, representa a classificação auferida a cada uma destas configurações.

[80] Sua capacidade de alterar a composição do seu conjunto de bens produzidos é limitada. É muito focada na produção de gasolina. Se não faz gasolina, não consegue fazer nada que tenha uma rentabilidade que compense a redução da produção de gasolina, como seria o caso do diesel, ou querosene de aviação, por exemplo.

TABELA 18 – Variáveis endógenas das diferentes configurações de refino

CONFIGURAÇÃO	ELEMENTOS DAS LINHAS
Hydroskimming	*A, D, E, H e J*
Cracking	*A, D, E, H e I*
Coking	*A, D, E, G e I*

Assim, pode-se afirmar que as três configurações mencionadas, como observado na figura 17, estão inseridas nas linhas 22 e 54 (*hydroskimming*), 6 e 38 (*cracking*) e 2 e 34 (*coking*), da matriz $C_{64\ 8}$. A inserção em duas linhas ocorre pelo fato de não ter sido avalizada a questão das direções do processo de diversificação.

2.8.2 – Definição das colunas

Com base na questão 1), levantada anteriormente, serão identificados quais elementos exógenos que correspondem aos perfis das unidades *hydroskimming*, *cracking* e *coking*, mostrados na tabela 18, resultariam em cenários mais favoráveis à localização e competição destas plantas industriais.

Através da tabela 10, entende-se que as variáveis exógenas que possibilitam uma melhor adequação de plantas com economias de escala e com um horizonte de reduções de custo ao longo do tempo não tão promissor (classificações *A* e *D*), estão alocadas na primeira coluna desta tabela. Esta é referente à combinação de um bom acesso a grandes quantidades de insumo e centros consumidores (classificação I e III).

Vale destacar que na realidade refinarias de configuração *hydroskimming*, mais simples, têm bastante dificuldade em se deparar com este cenário. Isso porque sua carga é restrita a crus (ou *blending* de crus) de boa qualidade, ou seja, com elevado grau API, baixos teores de enxofre, nitrogênio e outros componentes que exigem aumentos na complexidade das plantas para alcançar os produtos finais requeridos. Ela é inflexível na carga.

Com isso, cenários que têm como componentes o *I*, expresso como bom acesso à grande quantidade de matéria-prima, tornam-se cada vez mais escassos para estas configurações. Este fato, como mostrado em ULLER et al (2008), possui relação indireta com a margem de refino negativa destas unidades[81]. No entanto, como já citado, o nível de exigência da carga torna-se menos rigoroso em unidades mais complexas, fazendo este cenário ser mais plausível em configurações *cracking* e *coking*.

No tocante à tabela 14, que diz respeito à economia de escopo e flexibilidade frente ao conjunto de bens demandado pelos mercados consumidores, entende-se que a configuração *hydroskimming* também é restrita a mercados que tenham uma demanda elevada pelo conjunto de bens por ela produzido (classificação V). Caso a demanda do mercado consumidor pelo conjunto de bens produzidos por ela seja restrita ou limitada, ela fica muito vulnerável porque, como atestado anteriormente, também é inflexível nos produtos (*H*). Portanto, sendo inflexível na carga e no produto, torna-se mais dependente do acesso à matéria-prima e também do mercado consumidor.

As refinarias *cracking* possuem a mesma coluna estabelecida nas *hydroskimming*, ou seja, coluna 1 (I, III e V), porém, as *coking*, diferem-se no fato terem sua localização compatível com as colunas 1 e 5 (I, III e VI). Isso acontece porque, pelo fato de ser flexíveis, têm a possibilidade de operar em mercados cuja demanda pelo conjunto de bens produzidos por ela seja restrita ou limitada. Nesse caso, uma saída encontrada restringir o escopo de bens produzidos, garantindo sua operação. Todavia, a coluna 1 lhe permite maior rentabilidade, portanto, trata-se de uma opção melhor.

2.8.3 – Análise da alocação das diferentes configurações de refinarias de petróleo na "matriz de relação" completa

Na matriz completa (64 x 8), são adicionados os elementos diferenciação e diversificação, porém, como o último não foi aplicado na indústria do refino de petróleo, duas células são escolhidas: $C_{22\ 1}$ e $C_{54\ 1}$ (para *hydroskimming*); $C_{6\ 1}$ e $C_{38\ 1}$

[81] A demanda excessiva por petróleos de boa qualidade eleva seu preço no mercado, aumentando também, os custos dos refinadores simples.

(para *cracking*); $C_{2\ 1}$ e $C_{34\ 1}$ (para *coking*). Uma descrição sucinta destas células, no molde do que foi realizado na tabela 10 e tabela 14, seguindo as instruções demonstradas no item 2.7 – matriz de relação "completa", é exposta na tabela 19 a seguir.

TABELA 19 – Análise sucinta das células escolhidas para as configurações

CÉLULA	DESCRIÇÃO
$C_{22\,1}$, $C_{54\,1}$	Com acesso bom a grandes quantidades de insumo assim como um grande mercado consumidor (que demande em quantidade e variedade, incluindo o conjunto de produtos produzidos pela refinaria), a planta que opera com economia de escala estática e escopo está a princípio bem localizada. Porém, a adição do fator **D** cria um cenário em que, apesar de estar bem localizada, a planta segue um perfil mais destinado às tecnologias maduras e, ademais, destaca-se que, quanto menor sua flexibilidade, menor a sua possibilidade de ofertar em maior quantidade os bens mais bem cotados no mercado. Fora sua inflexibilidade de carga, que limita o petróleo a ser processado por ela. Isso reduz sua chance de elevar sua rentabilidade. Uma oportunidade que também é reduzida com o baixo potencial de diferenciação.
$C_{6\,1}$, $C_{38\,1}$	Diferencia-se das células da *hydroskimming* em dois pontos. O primeiro é porque *cracking*, apesar de inflexível nos produtos, é flexível na carga[82]. Com isso, as chances desta planta ter acesso a grandes quantidades de matéria-prima (I) são maiores do que na *hydroskimming*. O segundo é seu maior grau de diferenciação (*I*). Sua rentabilidade tende a ser mais elevada que a encontrada em plantas *hydroskimming*.
$C_{2\,1}$, $C_{34\,1}$	Plantas de refinaria com esta característica possuem qualidades que a credenciam a atuar confortavelmente em mais cenários do que as demais. O fato é que neste, um cenário perfeito para sua atuação, estas encontrariam além dos pontos positivos apresentados nas *cracking*, a blindagem às especificações rigorosas que possam ser efetivadas em produtos como o diesel por exemplo. Estas plantas estariam mais apropriadas para lidarem com demandas desse tipo. Estão aptas a processar crus de pior qualidade e transformá-los em derivados de boa qualidade. Tendem a possuir, portanto, uma margem de refino maior do que as demais, o que resulta em maior competitividade (em cenários de elevação no preço de crus de boa qualidade e elevada especificação dos derivados, sem controle de seus preços).

[82] Esse fato não é detectado pelo modelo construído neste trabalho por que o foco do mesmo é em bio-refinarias com base em bagaço de cana. A diferença entre a matéria-prima, bagaço de cana e petróleo, quanto a sua variedade, é discutida no APÊNDICE III.

CAPÍTULO 3 – ROTAS ALTERNATIVAS DE BIO-REFINARIAS A PARTIR DE BAGAÇO DE CANA

Este capítulo tem como objetivo descrever as principais rotas tecnológicas de bio-refinaria com base em bagaço de cana, como principal biomassa lignocelulósica, não oleaginosa, a serem aplicadas para o caso brasileiro. Com isso, na figura 18, excluem-se as rotas que possuem biomassa oleaginosa como matéria-prima, objetivando o biodiesel como produto final e, glicerina, como resíduo ou insumo. Também, não são trabalhadas rotas com base no amido, comumente exploradas pelos produtores de etanol a base de milho nos EUA e, o processo convencional de produção de etanol no Brasil, que tem base na extração e fermentação da sacarose, descrito no capítulo anterior.

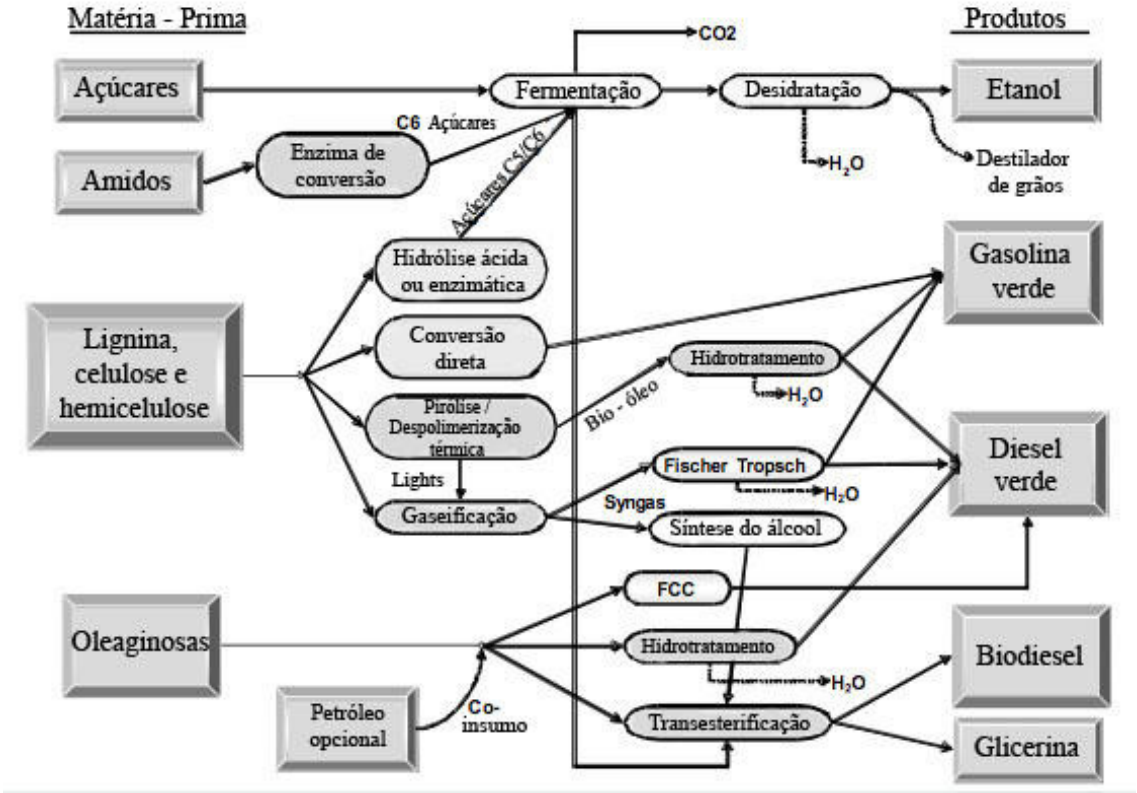


FIGURA 18 – Visão geral sobre a produção de biocombustíveis
Fonte: NSF (2008)

O foco, portanto, está em descrever rotas tecnológicas capazes de converter a biomassa lignocelulósica, no caso, bagaço de cana, em uma gama de produtos finais, dos quais, incluem-se os produzidos em refinarias de petróleo. Tais processos de conversão baseiam-se em duas plataformas: bioquímica e termoquímica. Segundo YAMAN (2004), a primeira consiste em converter a biomassa em alcoóis ou produtos oxigenados através de atividade biológica, isto é, utilizando catalisadores biológicos (ex.: enzimas, microorganismos) e ou químicos. A termoquímica, de acordo com NSF (2008), envolve basicamente pirólise, liquefação e gaseificação, e, trabalha com adição de calor e ou o uso de catalisadores químicos.

Através destas plataformas, uma combinação extensa de tipos de rotas e produtos diferentes pode ser obtida. Por isso, entendendo que trabalhar com todas as possibilidades é uma tarefa impossível e desnecessária, buscou-se um escopo de rotas representativo. Assim, tem-se na plataforma bioquímica as rotas de "Hidrólise" e MixAlco, enquanto, na termoquímica as baseadas em "Gaseificação/Syngas" e "Pirólise/Bio-óleo".

A produção de bio-óleo através da liquefação, que pode ser observada na figura 18, foi excluída da análise porque, como mostrado em NSF (2008), possui pouco trabalho significativo publicado. Tal argumento poderia ser aplicado ao processo MixAlco, pois, este possui um número restrito de pesquisadores envolvidos. Porém, considerou-se interessante aumentar o escopo de rotas bioquímicas, normalmente restrito a processos de hidrólise. Ademais, rotas de caráter híbrido como, fermentação do *syngas* ou do bio-óleo, foram descartadas. No caso do MixAlco, sua necessidade de consumo de hidrogênio torna-a uma rota hibrida em potencial, pois, um processo de gaseificação da lignina produzida como resíduo é uma opção mais racional do ponto de vista de aproveitamento dos recursos existentes. Já, contudo, estabelecer o mesmo procedimento para "Hidrólise", trata-se de uma possibilidade mencionada, porém, não será levado em consideração.

3.1 – Hidrólise

Como citado no item "III.2 - produção de açúcar, álcool e energia parte industrial", do ANEXO III, a composição da estrutura celular do bagaço em matéria seca envolve diferentes combinações em termos de participação relativa de dois polímeros de carboidratos distintos, a celulose e hemicelulose, mais a lignina[83], que se trata de um polímero complexo não-carboidrato. Segundo HAMELINCK et al (2005), ainda existem outros compostos em pequenas quantidades como extratos, ácidos, sais e minerais.

De forma sucinta pode-se afirmar que esta rota, "hidrólise", consiste basicamente em separar os açúcares e remover a lignina. Nos primeiros, o processo é feito por meio da sacarificação através da hidrólise, onde, de acordo com HAMELINCK et al (2005), o polissacarídeo, no caso a celulose e ou a hemicelulose, é quebrado em moléculas livres de açúcar pela adição de água. Após, o açúcar é encaminhado à fermentação e posteriormente à destilação, visando produzir alcoóis.

A figura 19 expõe a estrutura básica da biomassa lignocelulósica e, portanto, como se posicionam seus três principais elementos supracitados: lignina, celulose e hemicelulose. Pode ser observado em HORTA NOGUEIRA et al (2008) e HAMELINCK et al (2005), que a hemicelulose e a lignina promovem um revestimento protetor da celulose. Esta é representada na figura pelos filamentos vermelhos localizados ao longo da estrutura celular enquanto a hemicelulose pode ser compreendida pela porção bege, que reveste os filamentos de celulose assim como a lignina, que é representada pelas frações azuis, responsáveis por ligar a estrutura à parede celular e manter as células unidas.

A celulose é formada basicamente por hexoses, e, como mostrado em HAMELINCK et al (2005), se trata de um polímero linear de celobiose (dímero glicose-glicose) cuja quebra torna-se difícil em vista de sua rigidez, a qual, existe em conseqüência da orientação de suas ligações somada à existência de pontes de hidrogênio. Possui regiões cristalinas e amorfas, e, sua fração cristalina representa a porção resistente enquanto a

[83]Com mostrado no capítulo 3: 40-60% de celulose; 20-40% de hemicelulose; 10-15% de lignina;

amorfa é facilmente hidrolizada. Devido a sua maior porção ser cristalina, possui baixa acessibilidade à hidrólise enzimática e ácida, como asseverado em BALAT et al (2009a), É insolúvel em água, segundo frisou YAMAN (2004)[84].

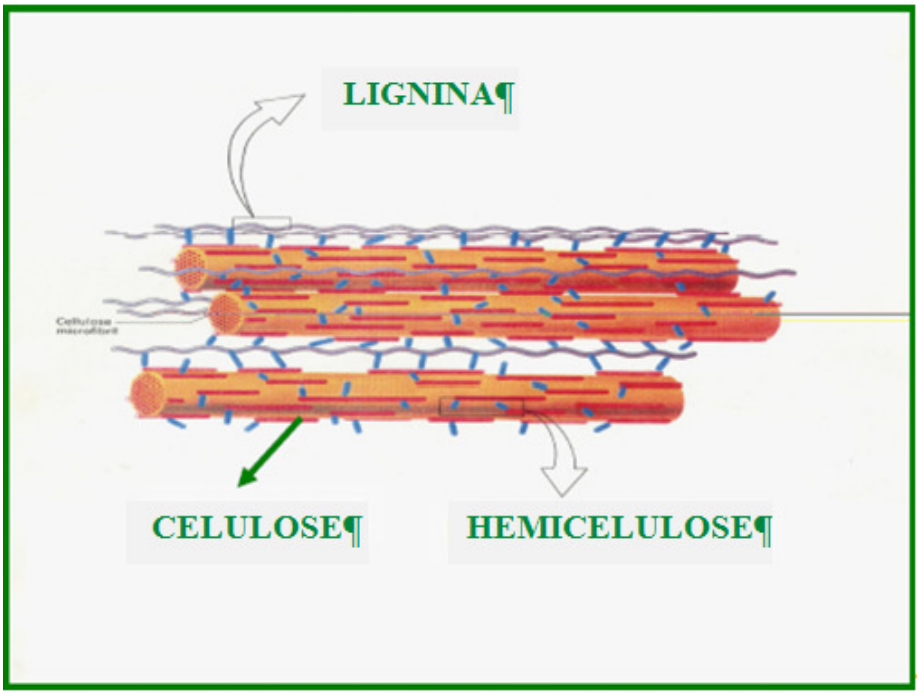


Figura 19 – Estrutura básica da biomassa lignocelulósica
Fonte: PEREIRA JUNIOR (2009)

No caso da hemicelulose, de acordo com HAMELINCK et al (2005), trata-se de uma cadeia curta e bastante ramificada com a pentose como o tipo de açúcar mais presente, basicamente traduzida por xilose mas com uma pequena quantidade de arabinose. Deve-se mencionar também que existe normalmente uma quantidade bem baixa de algumas hexoses como galactose, manose e glicose mais alguns compostos não-carboidratos como do grupo acetil. Ao contrário da celulose (pela sua maior fração cristalina), possui elevada solubilidade a solventes e, segundo, sua ramificação e natureza amorfa tornam-na fácil de hidrolizar.

[84] Insolúvel na maioria dos solventes, de acordo com BALAT et al (2009a).

A lignina, de acordo com HAMELINCK et al (2005), é um grande complexo de polímero fenilpropano e grupos metoxi, uma substância polifenólica de elevada insolubilidade. Incrusta na parede celular e por isso consegue manter as células juntas. Portanto, está presente em toda a biomassa lignocelulósica e qualquer processo de hidrólise, seja de hemicelulose ou celulose, gera a lignina como resíduo.

A tabela 20 expõe a parcela dos principais elementos constituintes da biomassa lignocelulósica em foco, isto é, o bagaço de cana-de-açúcar. Devem ser destacadas nesta tabela, as parcelas consideráveis de glicose e xilose em relação aos outros açúcares, respectivamente hexoses e pentoses, extraídas do bagaço de cana.

TABELA 20 - Composição da soma dos principais elementos constituintes do bagaço de cana-de-açúcar

COMPONENTES	**%**
Glicose	**38,1**
Xilose	**24,3**
Arabinose	4,5
Galactose	1,1
CARBOIDRATOS	~70
Lignina	**18,4**
Cinzas	4,8
Proteínas	4,0
NÃO-CARBOIDRATOS	~30

Fonte: Elaboração própria baseada em PEREIRA JUNIOR (2009)

É importante frisar que apesar da lignina, com participação de 18,4% na tabela 20, ter o potencial de gerar uma gama de produtos finais diversos e de valor agregado alto, como pode ser observado em PEREIRA JUNIOR (2009) e HAMELINCK et al (2005), objetiva-se neste trabalho, direcionar seu uso apenas na produção de energia térmica, mecânica e ou elétrica (na rota “hidrólise”).

Essa decisão tem base não somente no fato da lignina ser degradável apenas por alguns microorganismos específicos, mas principalmente pelo fato de, como no caso do processo produtivo convencional da indústria sucroalcooleira, haver demanda de energia no processo industrial e do mercado consumidor final (energia elétrica). Por isso, especialmente nesta rota será levado em consideração que a quantidade produzida de lignina, assim como no caso do bagaço na rota convencional, é direcionada às caldeiras[85] para a geração de energia térmica, mecânica e ou elétrica. Este fato pode ser observado na figura 20, que apresenta uma descrição básica da rota.

Com isso, deve-se ressaltar que a fração da biomassa lignocelulósica mais difícil de ser hidrolisada, a celulose, considerada a etapa comumente chamada de hidrólise[86] na rota "hidrólise-fermentação", está revestida de hemicelulose e lignina, dificultando ainda mais o processo. Uma etapa de pré-tratamento com vistas a remover este revestimento, separando esses três elementos e isolando a celulose, é necessária para que haja uma maior eficiência no processo de hidrólise da fração celulósica. De acordo com BALAT et al (2008), esta etapa promove o rompimento da matriz lignocelulósica facilitando a hidrólise da celulose.

[85] Ou possivelmente gaseificadores, como pode ser observado em PEREIRA JUNIOR (2009), NSF (2008) e PRINS et al (2007).
[86] Esta é considerada, segundo HAMELINCK et al (2005), a etapa mais importante da rota.

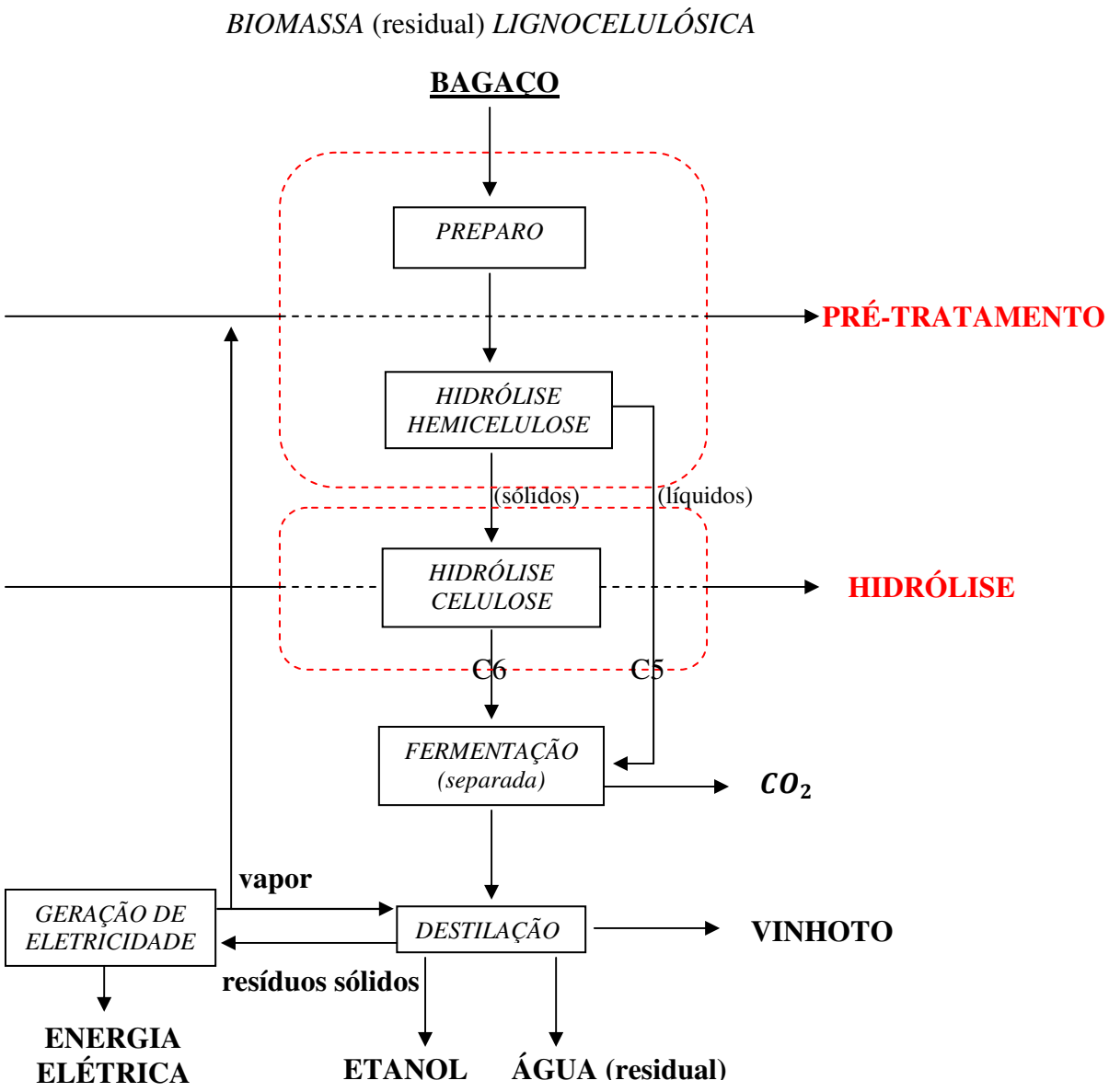


FIGURA 20 – Fluxograma geral da rota "hidrólise-fermentação": SHF (separate or sequential, hydrolysis and fermentation)

Fonte: Elaboração própria baseada em HAMELINCK et al (2005)

Segundo HAMELINCK et al (2005), realizar a hidrólise da celulose sem a etapa de pré-tratamento significa obter um rendimento inferior a 20% no processo, ao contrário quando o mesmo é efetivado após a etapa de pré-tratamento, o que equivale a um rendimento superior a 90%. Pode-se concluir, portanto que, esta etapa se torna crucial

para que a rota "hidrólise-fermentação" melhore sua competitividade.[87] Portanto, na figura 20 é exposto um processo generalizado de produção de etanol a partir do bagaço de cana através da rota estudada: "hidrólise-fermentação". Como se pode observar, as etapas iniciam-se com o pré-tratamento, o qual abrange o pré-tratamento mecânico, remoção da lignina e a hidrólise da hemicelulose.

O primeiro, segundo HAMELINCK et al (2005), consiste basicamente em realizar ações mecânicas e físicas com objetivo de limpar e aumentar a superfície de contato e destruir sua estrutura celular, tornando, como também foi afirmado em HORTA NOGUEIRA et al (2008), a matéria-prima mais acessível aos tratamentos químicos, físicos (sem a presença de catalisadores) ou biológicos posteriores que podem ser traduzidos na tabela 21. Estes visam remoção da lignina e a produção basicamente de xilose, através da hidrólise da hemicelulose.

Para isso, como observado em HAMELINCK et al (2005), a hemicelulose e ou a lignina, que revestem a celulose, são removidas e as estruturas de microfribras da celulose são modificadas. Através dos tratamentos mostrados na tabela 21, toda a parcela de hemicelulose e parte da lignina são solubilizadas e após, o polímero livre de hemicelulose sofre hidrólise resultando nos açúcares nele contido. Destes, a maior parte são de pentoses, em particular, xilose, como foi exposto natabela 20[88]. Estes açúcares constituem-se na parte líquida exposta na figura 20 e, portanto, seguem para a unidade de fermentação. A parte sólida constitui-se de celulose e da lignina e segue para a etapa subseqüente, de hidrólise propriamente dita: a hidrólise da celulose.

[87] A redução dos custos da etapa de pré-tratamento trata-se do maior desafio de P&D nesta rota, de acordo com HAMELINCK et al (2005).
[88] É interessante mencionar o fato exposto em HAMELINCK et al (2005) que uma pequena porção de celulose também é convertida em glicose neste processo.

TABELA 21 – Processos de pré-tratamento da biomassa para hidrólise

Processo	*Descrição*	*Tempo de reação*	*Rendimento de xilose*	*Custo*
Físicos				
Explosão a vapor	A biomassa triturada é tratada com vapor (saturado, 160°-260° C) seguido de uma rápida descompressão	1-10 min	45%-65%	-
Termoidrólise	Utiliza água quente a alta pressão (pressões acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose	30 min	88%-98%	-
Químicos				
Hidrólise ácida	Por meio do uso de ácidos sulfúrico, clorídrico, ou nítrico, concentrados ou diluídos	2-10 min	75%-90%	+
Hidrólise alcalina	Pelo uso de bases, como hidróxidos de sódio ou cálcio	2 min	60%-75%	++
Organosolv	Uma mistura de um solvente orgânico (metanol, bioetanol e acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H_2SO_4, HCl) é usada para quebrar as ligações internas da lignina e da hemicelulose	40-60 min	70%-80%	
Biológicos	Utilização de fungos para solubilizar a lignina. Geralmente, é utilizado em combinação com outros processos			
Combinados				
Explosão de vapor catalisada	Adição de H_2SO_4 (ou SO_4) ou CO_2 na explosão de vapor pode aumentar a eficiência da hidrólise enzimática, diminuir a produção de compostos inibidores e promover uma remoção mais completa da hemicelulose	1-4 min	88%	-
Afex (*ammonia fiber explosion*)	Exposição à amônia líquida a alta temperatura e pressão por um certo período de tempo, seguida de uma rápida descompressão		50%-90%	
Explosão de CO_2	Similar à explosão a vapor		75%	

Fonte: HORTA NOGUEIRA et al (2008)

Porém, antes que seja explanada esta etapa, é preciso explorar melhor os processos de pré-tratamento mencionados na tabela 21. Como afirmado em PEREIRA JUNIOR (2009), em todos estes processos, com exceção da termoidrólise, com condições severas (aumento da temperatura, pressão e ou da acidez), há a formação de inibidores, comprometendo o rendimento da etapa subseqüente, de hidrólise da celulose. Tais inibidores são produzidos em quantidade e variedades distintas, dependendo do tipo de processo utilizado. De acordo com HAMELINCK et al (2005), quanto mais severa as condições, maior será a formação destas substâncias.

HAMELINCK et al (2005) cita oito pontos que descrevem o que seria uma etapa de pré-tratamento ideal na rota de "hidrólise" estudada. Estes pontos podem servir de base para uma análise de competição entre os processos a ser utilizados. São eles:

1) Produz fibras reativas

2) Rendimento de pentoses em forma não degradada

3) Produção não significativa de inibidores da etapa de fermentação

4) Requer pouco ou nada em termos de redução de tamanho da matéria-prima (exige menos do preparo)

5) Requer reatores com alta capacidade de processamento de sólidos

6) Materiais de construção com custos moderados

7) Não produzir resíduos sólidos

8) Possuir um elevado grau de simplicidade

Alguns comentários relevantes com base em PEREIRA JUNIOR (2009) devem ser acrescentados, os quais, dizem respeito especificamente a seis processos: explosão a vapor, termoidrólise, hidrólise com ácido diluído, explosão a vapor catalisada e Afex. Para o terceiro e último, há uma geração significante de resíduos, fato este atenuado na explosão a vapor catalisada, sendo caracterizada como moderada e pouco significante

nos demais. Destaca-se que, no caso da hidrólise com ácido diluído, este fato é agravado pela sua propensão a apresentar problemas de corrosão.

Contudo, de acordo com HAMELINCK et al (2005), ela não opera, no pré-tratamento, em condições severas[89] e segundo PEREIRA JUNIOR (2009), se encontra em estágio de plantas demonstrativas, ao contrário das outras, em escala piloto ou bancada, para o caso da termoidrólise. Ademais, deve-se mencionar que segundo HAMELINCK et al (2005), o ácido sulfúrico diluído tem sido o mais favorável para aplicações industriais devido ao seu alto rendimento em xilose e, quanto ao Afex, possui um custo elevado que deve ser compensado com a parte protéica, conservada no processo, e, caracterizada como um subproduto de elevado valor agregado.

Afirma-se com base em PEREIRA JUNIOR (2009), que todos os seis processos por ele citados obtêm sucesso na remoção da hemicelulose. Porém, no caso do Afex, para que esta seja bem sucedida é necessário um processo de lavagem após. Deve-se acrescentar também que, com base em HAMELINCK et al (2005), pode-se afirmar que a hidrólise alcalina remove apenas parcialmente a hemicelulose, todavia, consegue uma remoção completa da lignina, que, de acordo com BALAT et al (2008), quando removida por este processo não acarreta grandes efeitos nos outros componentes. Ademais, PEREIRA JUNIOR (2009) ressalta que a lignina sofre um grau maior de remoção no Afex, seguido da explosão a vapor catalisado e hidrólise com ácido diluído, e, em um patamar menos elevado, explosão a vapor e a termoidrólise.

É necessário ressaltar que, naturalmente, a termoidrólise e explosão a vapor são os únicos processos que não possuem adição de químicos o que, segundo HAMELINCK et al (2005) os torna ambientalmente atrativos. Deve-se acrescentar também que de acordo com PEREIRA JUNIOR (2009), dentre os seis processos comparados, somente os de termoidrólise e Afex são exclusivamente de batelada enquanto os demais têm a opção de serem contínuos.

Quanto aos processos biológicos, com base em HAMELINCK et al (2005) e BALAT et al (2008), ainda é preciso haver mais aprimoramento. Isso acontece porque possuem

[89] Opera em condições brandas de processo, segundo HAMELINCK et al (2005): 0,7% de ácido sulfúrico e 190°C. Sinalizando, portanto, baixa produção de inibidores.

baixo rendimento seguido de um custo alto, tempo de residência no reator longo e envenenamento dos microorganismos com derivados da lignina. Porém, o fato de possuírem baixo consumo energético e exigirem condições ambientais brandas permite a continuação de suas pesquisas e conseqüentemente a possibilidade de um uso no futuro.

Para o caso da explosão de CO_2, de acordo com HAMELINCK et al (2005), trata-se de um processo similar aos Afex e explosão a vapor, como foi exposto na tabela 21. Porém, apesar de seu menor rendimento em glicose na etapa de hidrólise da celulose[90], é menos custoso do que o Afex e causa menor formação de inibidores do que na explosão a vapor. Ademais, uma captura do CO_2 emitido na fermentação[91] e sua re-injeção para o processo poderia, com uma possível negociação de créditos carbono gerar um incremento em sua competitividade.

Assim, com base nas observações e em HAMELINCK et al (2005), a explosão a vapor e a termoidrólise, apesar de interessantes por não utilizarem-se de químicos, ainda não são efetivas. Ambas possuem custos incertos e, especificamente no caso da explosão a vapor, como também asseverado em BALAT et al (2008), possui um baixo rendimento. A termoidrólise, apesar do rendimento elevado, de acordo com HAMELINCK et al (2005) necessita reciclar a água utilizada, agravando a economicidade do processo seguido da sua previsão de entrada em escala comercial, que encontra-se por volta de 10 anos.

Em suma, os processos existentes distanciam-se em diferentes pontos, dos oito atributos selecionados por HAMELINCK et al (2005). Porém, apesar dos problemas de corrosão causados pelo ácido e o seu custo, a hidrólise com ácido diluído, como afirmado em HAMELINCK et al (2005), possui uma baixa produção de inibidores e um elevado rendimento na etapa de hidrólise da celulose (< 85%), além de um custo, segundo BALAT et al (2008) que não é considerado impeditivo. Atualmente, trata-se do processo mais avançado e, portanto, a tecnologia de pré-tratamento mais promissora a

[90] De acordo com HAMELINCK et al (2005), aproximadamente 75% contra 50-90% do Afex e 90% da explosão a vapor

[91] O rendimento máximo teórico da fermentação consiste em, segundo HAMELINCK et al (2005), 0,51 Kg de etanol e 0,49 Kg de CO_2 para cada 1 Kg de açúcar fermentado.

começar a operar em escala comercial. Caso a matéria-prima utilizada seja muito barata, esta tecnologia já pode ser desenvolvida comercialmente.

Após esta etapa, como mostrado na figura 20, inicia-se a etapa da hidrólise da celulose, reação mostrada na equação 15. Tal reação, como asseverado em BALAT et al (2008), pode ter uso como catalisadores ou ácido sulfúrico, de variada concentração, ou, enzimas, no caso, as celulases. Ambas constituem-se nas duas rotas de hidrólise da fração celulósica exploradas atualmente. As duas competem buscando atingir mais rapidamente a escala comercial.

15) $(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$

Segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), a variada concentração supracitada inclui o uso de ácido sulfúrico diluído, com 0,4% ou concentrado, de 30-70%. No primeiro as pressões e temperaturas (215°C) devem ser elevadas gerando um tempo de residência mais curto[92]. O contrário é observado nas de ácido concentrado, onde se utiliza pressões e temperaturas (40°C) mais brandas gerando um tempo de residência mais longo[93].

Todavia, como destacado em HAMELINCK et al (2005), é que nos processos de hidrólise ácida, as etapas tendem a seguir o fluxograma exposto na figura 20, onde a hidrólise da hemicelulose e da celulose ocorrem em duas etapas, com a porção de hemicelulose sendo hidrolisada também pelo processo de hidrólise ácida[94]. Porém, pela natureza amorfa da hemicelulose, como afirmado em BALAT et al (2008), as condições para a hidrólise devem ser menos severas do que as da hidrólise da celulose, como mencionado, de natureza cristalina. Por isso, ou utilizam-se temperatura e pressão mais

[92] De acordo com HAMELINCK et al (2005) seu tempo equivale ao do processo de hidrólise da hemicelulose com ácido diluído, isto é, em torno de três minutos.
[93] Que varia entre 10-12 horas, de acordo com HAMELINCK et al (2005).
[94] Neste caso a distinção do processo com ácido diluído na hidrólise da hemicelulose com a da celulose encontra-se nas condições de temperatura e concentração do ácido utilizado na segunda fase, conferindo-lhe uma maior formação de inibidores.

elevadas ou aumenta-se a concentração do ácido, sempre procurando minimizar a decomposição da glicose[95].

Outro ponto relevante é a diferença quanto à formação de inibidores, exposta em HORTA NOGUEIRA et al (2008). Estes, ao contrário do observado na hidrólise da hemicelulose, em razão da necessidade de utilizarem-se temperaturas mais elevadas são produzidos em quantidade maior no processo com ácido diluído da celulose. Já o processo com ácido concentrado gera uma quantidade inferior de inibidores[96], que, de acordo com PEREIRA JUNIOR (2009) são: hidroxi-metil furfural - HMF (oriundo da celulose e hemicelulose), furfural, ácido acético e acetaldeído (oriundos da hemicelulose) e outras dezenas de substâncias tóxicas inibidoras (oriundas da lignina). Como asseverado em SAXENA et al (2009) e BALAT et al (2008), eles precisam ser removidos antes da etapa da fermentação pois afetam o crescimento da levedura.

A hidrólise com catalisador de ácido diluído possui um rendimento em glicose em torno de 50%[97]contra aproximadamente 90% da que utiliza como catalisador ácido concentrado, segundo HAMELINCK et al (2005). Contudo, como desvantagem, seus custos são superiores. Grande parte disso ocorre pelo fato da unidade crítica da operação consistir, como afirmado em SAXENA et al (2009), basicamente na separação do ácido dos açúcares, recuperação e reconcentração do mesmo. Ademais, de acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008), a tecnologia da hidrólise da celulose com ácido diluído encontra-se em estágio avançado.

Na hidrólise enzimática o catalisador é composto, naturalmente, por enzimas, as quais, como mencionado em HORTA NOGUEIRA et al (2008), possuem seu conjunto chamado genericamente de celulases. Estas devem ser produzidas em um reator através de organismos oriundos do material celulósico, que, podem ser bactérias ou fungos[98]. Estes, de acordo com HAMELINCK et al (2005), por serem organismos aeróbicos e possuírem uma taxa de produção adequada, recebem mais esforços em P&D. Portanto,

---

[95] A decomposição da glicose, segundo BALAT et al (2008), é um efeito negativo que ocorre com o tratamento em condições mais severas.

[96] Porém, este apresenta problemas quanto ao agravamento da questão da necessidade de equipamentos anti-corrosivos e na recuperação do ácido.

[97] De acordo com BALAT et al (2008), seu grande desafio consiste em elevar este rendimento para além de 70%.

[98] Trichoderma viride; Trichoderma reesei (mais explorado); Trichoderma longibrachiatum;

na rota de hidrólise enzimática, deve ser adicionada uma unidade de produção de celulases ao fluxograma generalizado da figura 20.

As celulases são compostas por: endoglucanases, exoglucanases e β-guclosidades. As três, segundo HAMELINCK et al (2005), atuam sinergicamente atacando partes específicas da fibra celulósica. Conforme HORTA NOGUEIRA et al (2008), a primeira tem a função de produzir polissacarídeos de menor comprimento, a segunda de atacar canais não-redutores dessa cadeia mais curta e remover a celobiose e, a terceira tem o objetivo de hidrolizar a celobiose e outros oligômeros à glicose, completando o processo, como afirma BALAT et al (2008).

Com isso, a rota de hidrólise enzimática basicamente utiliza como carga a parte sólida, produzida após a etapa de pré-tratamento e mostrada no fluxograma da figura 20. Desta, parte direciona-se para o reator com vistas à produção da celulase e parte para o reator de hidrólise enzimática, alimentado pelas enzimas produzidas no primeiro. A parte líquida, que contém as pentoses (basicamente, xilose) produzidas pela hidrólise da hemicelulose no pré-tratamento, assim como as glicoses, segue para unidades de fermentação separadas e em seguida para a torre de destilação.

Contudo HAMELINCK et al (2005) traça uma outra possibilidade que consiste em direcionar a parte líquida e sólida oriundas do pré-tratamento, para o reator de produção da celulase e o reator da hidrólise enzimática (alimentado da mesma forma pelas enzimas produzidas no primeiro). Após esta etapa a glicose é destinada à fermentação e em seguida à destilação. Porém, os produtos dessa etapa consistem não apenas no etanol e na água residual, mas também nas pentoses (basicamente, xiloses), as quais seguem para a fermentação e em seguida para a destilação.

Portanto, as pentoses são separadas no fim, através da torre de destilação, ao invés do fluxograma exposto na figura 20, onde elas são separadas no início do processo, quando seguem para a sua fermentação. Porém, a idéia é basicamente a mesma, isto é, produzir as celulases, introduzi-las no reator de hidrólise para que haja a hidrólise da celulose, fermentar separadamente as pentoses e as hexoses e inseri-las na torre de destilação para que haja a separação e conseqüentemente o produto desejado: o etanol. Denominam-se essas configurações de hidrólise com os reatores (de hidrólise, produção de celulases e

fermentação de pentoses e hexoses) separados de SHF (*Separate, or Sequential, Hydrolysis and Fermentation*).

Importante destacar o fato das enzimas serem operadas em condições brandas (pH 4,8 e 45-50°C), como asseverado em BALAT et al (2008), o que acarreta custos que, no quesito material utilizado e problemas com corrosão, sofrem vantagens quando comparados aos da hidrólise ácida[99]. Ademais, HAMELINCK et al (2005) cita que o processo é compatível com grande parte das opções existentes de pré-tratamento (com exceção dos processos físicos), apresenta um potencial de rendimento elevado e de acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008) não produz resíduos.Além disso, possui consumo energético baixo, segundo PEREIRA JUNIOR (2009).

Outra vantagem relevante, destacada por HORTA NOGUEIRA et al (2008), refere-se à possibilidade de fermentação simultânea à sacarificação. Este processo, conhecido como SSF (*Simultaneous Saccharification and Fermentation*), ocorre quando a celulose é hidrolisada e simultaneamente há a fermentação da glicose gerada. Segundo HAMELINCK et al (2005) ele possui como vantagens o fato de haver uma redução no número de reatores e de evitar que a glicose atue como inibidora das enzimas, reduzindo a eficiência do processo. BALAT et al (2008) acrescenta o fato de um número menor de enzimas ser demandado. Contudo, deve existir, de acordo com HAMELINCK et al (2005) uma redução no custo de produção das celulases para que haja uma redução no tempo de residência[100] e o processo torne-se então viável comercialmente.

Há ainda os processos SSCF e CBP, com capacidades de reduzir ainda mais a quantidade de reatores e integrar os processos. O primeiro consiste na sacarificação e co-fermentação simultâneas (*Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation*), onde em um reator é realizada a hidrólise da celulose e simultaneamente a fermentação de pentoses e hexoses. O segundo, denominado de Processo Biológico Consolidado (*Consolidated Bioprocessing*) de acordo com HAMELINCK et al (2005) consiste no último estágio evolutivo no que diz respeito à integração dos reatores. No caso, uma

[99] Os custos com material são inferiores além de não haver problemas com corrosão.

[100] Segundo HAMELINCK et al (2005) há uma relação inversa entre a quantidade de celulases empregada e o tempo de residência do reator. Como o custo de produção das celulases é uma função de sua quantidade produzida, conclui-se que seu custo determina o ponto ótimo, que segundo o estudo encontrava-se entre três a quatro dias.

comunidade única de microorganismos produz as enzimas, catalisa a reação de hidrólise da celulose e fermenta hexoses e pentoses.

Os três tipos distintos de integração das etapas da hidrólise enzimática, SSF, SSCF e CBP, podem ser observados nos fluxogramas expostos na figura 21. Como se pode verificar nesta figura, os números de reatores são reduzidos na medida em que é avançado de SSF para CBP.

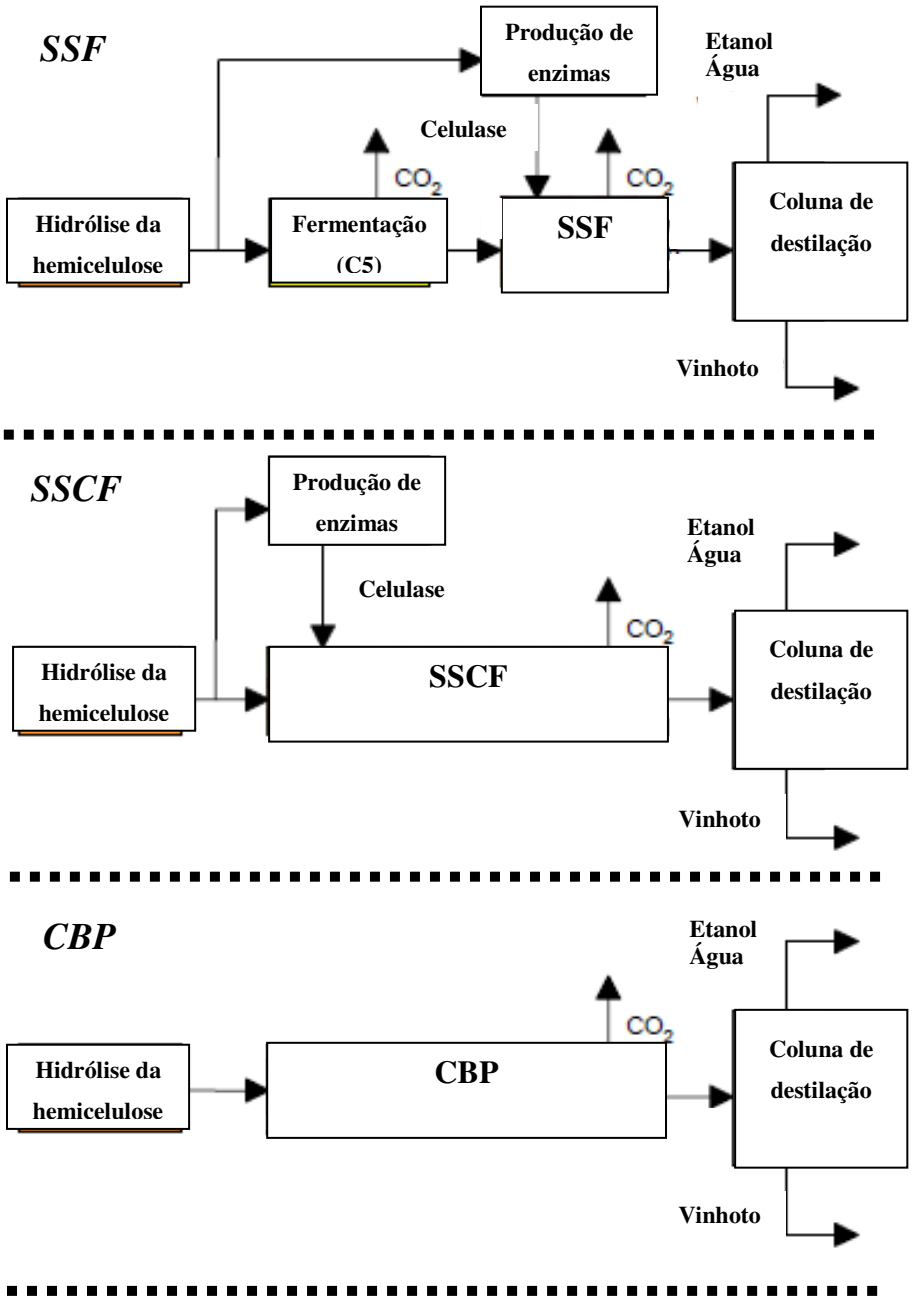
Contudo, como destacado em HAMELINCK et al (2005), existe uma corrente que defende que a redução dos custos na rota de hidrólise enzimática não está na integração supracitada dos reatores e sim, no seu uso separadamente. A razão está no fato da hidrólise, produção das enzimas e fermentação ocorrerem em diferentes temperaturas, pH e níveis de oxigênio. Este fato é ressaltado em BALAT et al (2008) quando cita os diferentes níveis ótimos de temperatura da sacarificação e fermentação[101]. Por isso HAMELINCK et al (2005) afirma que uma configuração com reatores separados pode permitir um melhor controle dos processos.

O que pode se afirmar, portanto é que o desenvolvimento da rota de hidrólise enzimática depende de pesquisas em engenharia genética, como afirmado em HAMELINCK et al (2005) e BALAT et al (2008). O desenvolvimento de bactérias e leveduras capazes de fermentar comercialmente pentoses ou ao mesmo tempo pentoses e hexoses é crucial para a economicidade da rota[102]. Segundo HAMELINCK et al (2005), a primeira opção é prevista para ocorrer em curto prazo enquanto a segunda em longo prazo. De acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008), atualmente ou descartam-se as frações de hexoses produzidas ou realiza-se a fermentação em duas etapas. Neste caso, a economicidade do processo fica comprometida.

---

[101] Em muitos casos, segundo BALAT et al (2008), o pH menor do que cinco e temperatura superior a 40°C pode ser favorável à hidrólise enzimática, porém, baixo pH pode inibir a produção de ácido lático e elevadas temperaturas podem afetar negativamente o crescimento celular dos fungos (Trichoderma reesei tem sua temperatura e pH ótimo em 55°C e 4,5 respectivamente).

[102] LYND et al (1996) apud HAMELINNCK et al (2005) mostra uma redução de custos significativa de SSF (10,5 €/GJ para álcool anidro e custo de matéria-prima 2,1 €/GJ) para SSCF (9,8 €/GJ) e para CBP (4,5 €/GJ)



SSF = hidrólise enzimática da celulose e fermentação de C6

SSCF = SSF + fermentação de C5

CBP = SSCF + produção de celulase

Figura 21 – Diferentes níveis de integração dos processos da hidrólise enzimática

Fonte: Elaboração própria baseada em HAMELINCK et al (2005)

Outra possibilidade, mencionada em NSF (2008) diz respeito à capacidade da rota de produzir butanol, através também da fermentação de açúcares além de HMF (hidroximetilfurfural) e furfural, onde, o primeiro ocorre através da desidratação da

glicose (hexoses) obtida da hidrólise da fração celulósica e, o segundo, da desidratação da xilose (pentoses), obtida pela hidrólise da fração hemicelulósica. Ambos constituem-se em plataformas, como mostrado em PEREIRA JUNIOR (2009), para a produção de DMF (dimetilfurfural)[103] e uma série de produtos oriundos da indústria petroquímica, transformando a rota até então, bioquímica, em hibrida, visto que há a adição de calor para que ocorram tais processos.

3.2 - MixAlco

A rota MixAlco tem a possibilidade de converter a biomassa, no caso, bagaço de cana[104] em ácidos carboxílicos (ex.: ácido acético, propílico e butílico), acetonas (ex.: acetona, metiletilcetona e dietilcetona) e uma mistura de alcoóis, primários (etanol, propanol, butanol) e secundários (isopropanol, 2-butanol e 3-pentanol). Com isso, é possível, como pode ser observado em TERRABON (2009), a rota gerar produtos de valores energéticos superiores ao do etanol (mais próximo da gasolina) além de obter através da oligomerização, segundo é exposto na figura 22, produtos ofertados por refinarias de petróleo.

Nesta figura, os processos envolvidos pela linha pontilhada verde, constituem-se nos desenvolvidos pelo processo MixAlco, enquanto, a azul, refere-se aos processos convencionais encontrados em refinarias de petróleo. No conjunto, utiliza-se, como asseverado em LAU et al (2006), microorganismos, água, vapor, cal e hidrogênio via processos anaeróbicos. Tais microorganismos no processo fermentativo, segundo HOLTZAPPLE (2009), constituem-se de uma mistura de culturas de microorganismos encontrados em habitat natural.

Existem duas vertentes para a rota MixAlco, segundo LAU et al (2006) e HOLTZAPPLE (2009), ambas possuem focos diferentes com relação ao produto

---

[103] Além da possibilidade de obtenção de DMF, NSF (2008) acrescenta GVL e ELV. Todos os três com grande potencial de utilização no transporte. Os dois primeiros como combustível, enquanto o último como aditivo.

[104] De acordo com LAU et al (2006), é possível realizar uma mistura da carga composta de biomassa com esterco ou lodo de esgoto em uma proporção de 80 para 20%.

produzido. Enquanto uma objetiva produzir acetonas e alcoóis superiores, a outra produz ácidos carboxílicos e alcoóis primários. Como se pode observar na figura 22, a rota inicia-se no pré-tratamento, segue depois para a fermentação, desidratação, secagem, uma etapa de conversão térmica ou "*acid springing*", que, representam cada uma das vertentes mencionadas e por fim, uma etapa de hidrogenação.

Em HOLZTAPPLE et al (1999) é observado que a etapa de pré-tratamento, assim como na rota de "hidrólise-fermentação", é responsável por elevar a eficiência da rota por facilitar a etapa seguinte, no caso, fermentação, aumentando a "digestibilidade" da carga[105]. De acordo com LAU et al (2006), a biomassa é misturada com cal e carbonato de cálcio e estocada em pilha. Esta é bombardeada por água, de cima para baixo, e ar, de baixo para cima. As condições utilizadas, de acordo com HOLZTAPPE et al (1999), consistem em uma temperatura em torno de 100°C, com uma a duas horas de duração a uma concentração de 0,1 gramas de cal hidratada ($CaOH_2$) por uma grama da biomassa utilizada. O oxigênio combinado com cal remove a lignina[106] reduzindo o pH.

Na etapa seguinte, de fermentação, como descrito de forma sucinta em LAU et al (2006), a carga sofre ação de microorganismos anaeróbicos em ambiente salino, os quais, digerem a biomassa formando o ácido carboxílico. Este, somado ao fato da reação ser realizada em ambiente anaeróbico, gera uma redução do pH[107], inibindo o processo. Para isso, HOLTZAPPLE et al (1999) sugere que deve ser introduzido o carbonato de cálcio, o qual possui a função de neutralizar e, portanto, manter os níveis de pH adequados para que a carga seja fermentada pela cultura de microorganismos utilizada. Esta também é inibida pela produção de metano, que, conforme mostrado em HOLZTAPPLE et al (1999), somado à geração de componentes não digeridos pelo processo, formam a quantidade total de resíduos produzida por esta etapa.

---

[105] Em HOLZAPPLE et al (1999) é mostrado um aumento superior a 100% na quantidade digerida por microorganismos de ruminantes (com objetivo de simular o processo MixAlco), de alimentos não tratados para tratados com cal. Esse aumento pode ser ainda maior na rota já que os microorganismos utilizados no experimento são capazes de digerir biomassa não tratada, o que, não necessariamente ocorre no processo MixAlco.

[106] Segundo HOLTZAPPE (1999), para biomassas com elevada concentração em lignina, é recomendável aplicar vapor pressurizado, o que eleva o custo do tratamento.

[107] Em razão da produção de ácidos carboxílicos em ambiente anaeróbico.

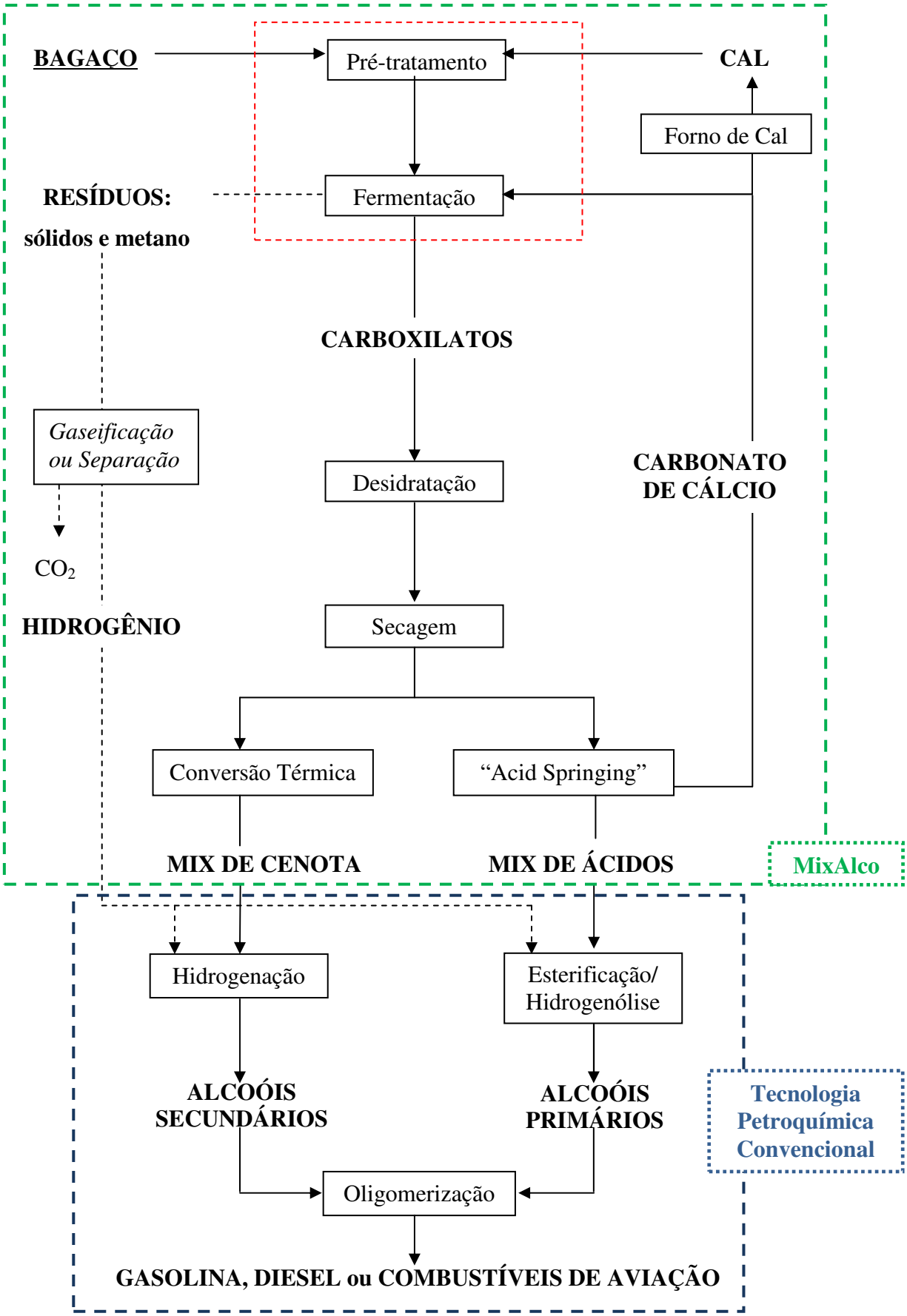


Figura 22 - Fluxograma simplificado das duas vertentes da rota MixAlco
Fonte: Elaboração própria baseada em HOLTZAPPLE (2009) e TERRABON (2009)

Em HOLTZAPPLE et al (1999) é destacado que concentração elevada do produto para minimizar os custos de recuperação, elevada taxa de conversão com vistas a obter um melhor uso da biomassa, produção mínima de metano para preservar o valor do produto e redução no tempo de residência são objetivos a serem perseguidos pela rota. Destes, os dois primeiros podem ser cumpridos com o uso da fermentação em contracorrente, onde sólidos e líquidos percorrem, por direções opostas, uma série de unidades de fermentação. Enquanto a biomassa menos digerida passa pelo fermentador contendo elevada concentração de carboxilatos, é inserida água, no pólo oposto, no fermentador contendo maior quantidade de biomassa digerida. Já a terceira meta pode ser alcançada através de inibidores de formação de metano, enquanto para a quarta, recomenda-se o uso de tanques para fermentação baratos, como os de plástico terreno, para tornar o processo viável economicamente. Isso se deve à natureza ácida deste processo fermentativo somada ao tempo de residência longo.

O produto desta etapa é uma solução que contém carboxilatos sais diluídos em água (3%). Estes devem ser concentrados em torno de 19% através de um solvente de amina que seletivamente extrai água. Inicia-se, portanto, a etapa da desidratação. Enquanto a água é condensada e direcionada para a etapa inicial de pré-tratamento/fermentação, o carboxilato segue para o processo seguinte, o qual, de acordo com HOLTZAPPLE (2009) deve ser ou de conversão térmica ou de "*acid springing*". O primeiro, como pode ser observado na figura 22, gera uma mix de cetonas enquanto o segundo uma mix de ácidos.

A etapa de conversão térmica, que parte do mix de cetonas, é focada na produção de alcoóis superiores. Em HOLZTAPPLE (2009) é demonstrado que hidrogenação de cetonas, metil etil cetona e dietil cetona geram respectivamente isopropanol, 2-butanol e 3-pentanol. Da mesma forma, a etapa de "acid springing", que parte do mix de ácidos, gera alcoóis primários. Na figura 23 é mostrado o fluxograma do sistema "acid springing", onde ocorrem as reações de ácido acético e alcoóis pesados, que geram éster e água. O éster é hidrogenado gerando etanol e alcoóis pesados, os quais retornam ao primeiro reator, realimentando o sistema. Portanto, os produtos finais dessa etapa são etanol e água.

Uma desvantagem desta rota é sua demanda por hidrogênio. Na figura 22, é demonstrado que esta pode ser satisfeita através da separação do hidrogênio do metano

ou via tecnologias de gaseificação, explicitadas detalhadamente nas próximas rotas, de classificação termoquímica. Portanto, implementada a gaseificação, essa rota poderia ser caracterizada como híbrida, isto é, de caráter termoquímico e bioquímico. Caso nem a separação do hidrogênio do metano nem a produção de hidrogênio através da geração de gás de síntese sejam utilizadas, a aquisição de quantidades consideráveis de hidrogênio no "mercado" pode inviabilizar o sucesso da rota.

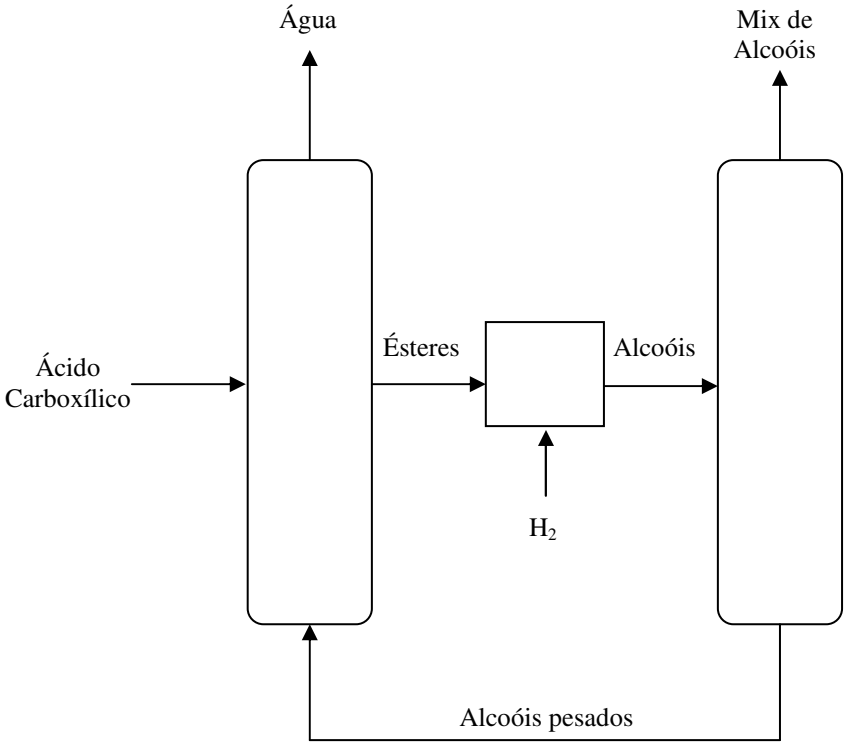


Figura 23 – Caracterização de sistema "acid springing"

Fonte: Elaboração própria baseada HOLTZAPPLE (2009)

3.3 – Gaseificação/Syngas

Na rota "Gaseificação/Syngas" a biomassa lignocelulósica[108] é direcionada à gaseificação, que ocorre em temperaturas elevadas (600-900°C), com oxigênio, ar[109] ou vapor como agentes da reação[110], de acordo com SNF (2008). A biomassa reage com O_2 (ou H_2O) e forma CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4**,** HCN, NH_3, HCl, H_2S, mais, outros gases sulfúricos, alcatrão, carvão, cinzas e outros hidrocarbonetos. Para isso, segundo VOSLOO (2001), quatro processos podem ser aplicados: Reforma a Vapor (*Steam Methane Reforming* – SMR), Oxidação Parcial (*Partial Oxidation* – POX), Reforma Autotérmica (*Autothermal Reforming* - ATR) e Reforma Combinada (*Combining or Two-step Reforming* - CTR). A definição de qual processo será dominante, diz respeito à finalidade de seu uso, como afirma CASTELO BRANCO (2008)[111].

No processo de gaseificação, segundo ANDRADE (2009), ocorrem reações heterogêneas (gás-sólido) e homogêneas (fase gasosa), endotérmicas e exotérmicas (como se observa nas equações 17 a 23). Este processo é formado basicamente através de quatro etapas, onde, a primeira se constitui na secagem, que acontece durante o aquecimento da carga. Em seguida ocorre a pirólise, que, de acordo com LARSON (1998) ocorre a temperaturas em torno de 300 a 600°C. Essa etapa é também denominada de "desvolatização", quando há a vaporização dos materiais voláteis[112], deixando para trás carbono fixo e cinzas. A oxidação, processo subseqüente, representado de uma forma geral na reação 16, eleva a temperatura do reator, suprindo o montante de calor demandado pelas reações endotérmicas, que é superior ao liberado pelas exotérmicas[113]. Já a última etapa constitui-se na redução, que através da adição de

---

[108] Como mencionado em SZKLO e SCHAEFFER (2006a), qualquer hidrocarboneto, em teoria, pode ser transformado em gás de síntese via processos de gaseificação.
[109] Segundo ANDRADE (2009), a queima do combustível ocorre em condições de escassez de ar, onde sua quantidade fornecida ao processo se dá em quantidades inferiores à necessária para ocorrer a queima completa do mesmo.
[110] Pode haver uma combinação entre os elementos citados, como mostrado mencionado em BALAT et al (2009b). Ou seja, ar, vapor, vapor e oxigênio, ar e vapor, oxigênio com ar enriquecido e etc.
[111] É salientado em NSF (2008) que o agente gaseificador e as propriedades da matéria-prima também possuem papel relevante na determinação dos produtos finais.
[112] LARSON (1998) cita que, como a biomassa possui elevada quantidade de material volátil (70 a 90%), essa etapa torna-se muito relevante no processo de gaseificação de biomassa.
[113] Outra forma de resolver esta questão, além de promover a combustão parcial do gás gerado é criar um fornecimento de calor externo

vapor aumenta os níveis de H_2 produzido, como mostrado em NSF (2008). A gaseificação responde por aproximadamente 60-70% do custo total de todos os processos expostos na figura 27.

16) $C_nH_m + (n/2 + m/4)\ O_2 \rightarrow nCO + (m/2)\ H_2O)$

Os reatores para gaseificação de biomassa, como mostrado em LARSON (1998), BALAT et al (2009b), NSF (2008) e ANDRADE (2009), podem ser pressurizados ou a pressão atmosférica, em leito fixo ou fluidizado. Enquanto para leito fixo encontram-se as opções de reatores chamados concorrente ("*downdraft*"), contracorrente ("*updraft*") ou fluxo cruzado ("*crossdraft*"), em leito fluidizado existem o borbulhante e o circulante (todos são mostrados na figura 24).

Os reatores de leito fixo possuem, em geral, a alimentação da biomassa por cima do reator e, diferem-se basicamente quanto ao local de entrada do agente e saída do syngas, o que, gera zonas de secagem, pirólise, combustão e redução localizadas de forma diferente entre os mesmos[114]. Nos reatores de leito fluidizado, ambos possuem a alimentação da biomassa localizada lateralmente, porém, sua distinção basicamente consiste na realimentação do combustível com os resíduos gerados (carvão e ou cinzas). Como se observa na figura 24, o leito fluidizado borbulhante, ao contrário do circulante, não possui a realimentação.

As opções de reatores em leito de arraste (pneumático e de lama) são mais indicadas a operar em grandes escalas utilizando como combustível o carvão, ou coque de petróleo ou óleo residual, enfatizado em SZKLO e SCHAEFFER (2006a). Tais reatores não costumam ser projetados para biomassa, segundo MANIATIS (2001), porque, é necessário que ocorra uma etapa anterior de pulverização, o que acarreta em custos e perda de competitividade, pois, o consumo de energia nesta etapa é superior no caso da

[114] Além de teores de alcatrão distintos (como no caso do "*downdraft"*, que produz uma quantidade inferior ao "*updraft"*) e outras características.

biomassa quando comparado aos demais combustíveis, como é afirmado em ROBINSON et al (1998).

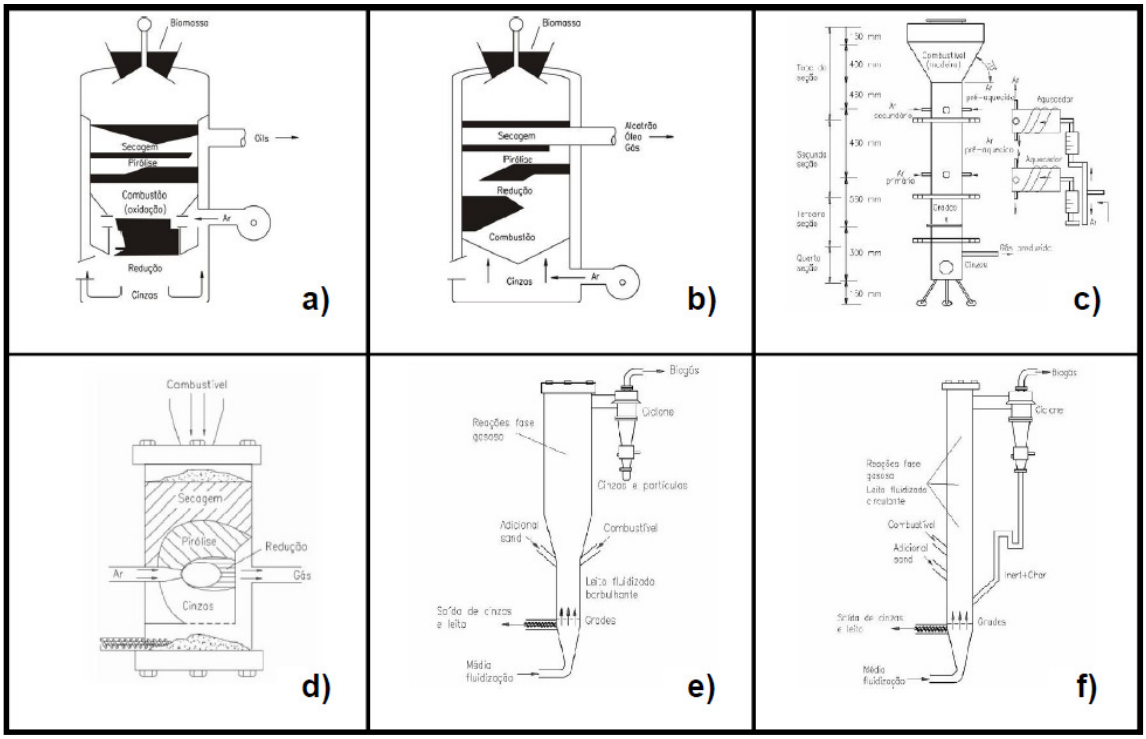


Figura 24 - Tipos de gaseificadores: a) Contracorrente "updraft"; b) Concorrente "downdraft"; c) De duplo estágio; d) Fluxo Cruzado ("Crossflow"); e) Leito fluidizado borbulhante; f) Leito Fluidizado Circulante.
Fonte: LORA e VENTURINI (2009)

Ademais, os reatores a leito de arraste costumam operar em pressões e temperaturas mais elevadas que os demais. No caso da temperatura, aproximadamente 1050-1400°C segundo PRINS et al (2007). Esse fato acarreta em perdas exergéticas maiores em processos que utilizam biomassa como combustível, devido, primordialmente, ao seu

menor poder calorífico causado pela maior quantidade de oxigênio contido[115], como se pode observar na figura 25[116].

Uma forma de solucionar esta questão é misturar a biomassa com outros combustíveis, como carvão e ou coque de petróleo, na chamada co-gaseificação. De certa forma, como mostrado em LAPUERTA et al (2008), este processo pode resultar em uma melhora de eficiência, quando comparado ao que utiliza separadamente carvão/coque ou biomassa[117].

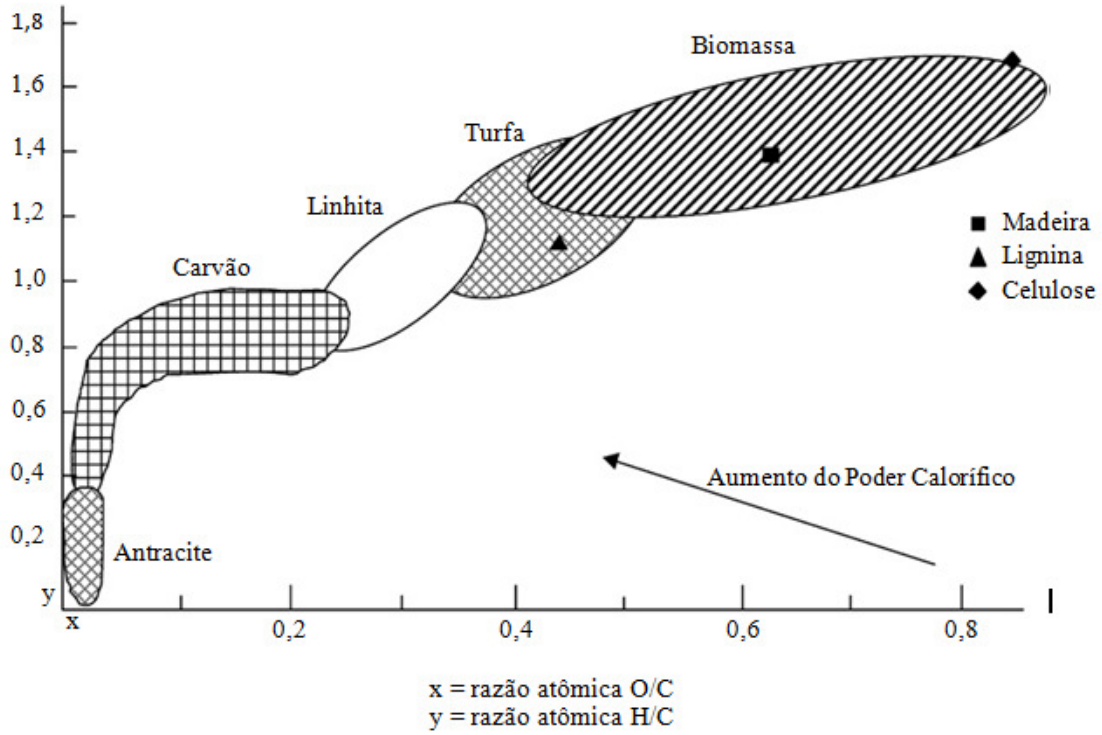


Figura 29 – Diagrama de Van Krevelen para vários combustíveis sólidos

Fonte: PRINS et al (2007)

[115] Tal fato torna a biomassa muito reativa. Sua oxidação tende a ser maior do que o necessário quando aplicada temperaturas muito elevadas, por isso, LARSON (1998) assevera que gaseificadores de biomassa devem operar a temperaturas inferiores aos de carvão.

[116] Além do fato do carvão possuir um poder calorífico maior do que a biomassa é interessante constatar através desta figura que a lignina possui menor quantidade de oxigênio contida, acarretando maior poder calorífico do que a biomassa. Neste caso as rotas pertencentes à plataforma bioquímica, onde se espera gaseificar a lignina (MixAlco e até mesmo a hidrólise), que é separada dos outros componentes da biomassa, tem, portanto, a possibilidade de gaseificar um combustível de maior poder calorífico. Porém, para MixAlco isso não é tão favorável, já que busca-se produzir, além de energia elétrica, hidrogênio, o qual está em menor quantidade na lignina, gerando uma razão H_2/CO inferior à da biomassa.

[117] Além de contribuir para uma economia "descarbonizada", como demonstrou SZKLO e SCHAEFFER (2006a), através da retenção do carbono emitido (seqüestro indireto do carbono via fotossíntese).

Tal fato se deve em razão da sinergia existente entre os processos. No caso da biomassa, há um aumento no poder calorífico, e, no caso do carvão e ou coque de petróleo, reduz-se a quantidade de oxigênio a ser injetada. Portanto, como mostrado em VALERO e USÓN (2006), a co-gaseificação possibilita que a biomassa atue como combustível em reatores a leito de arraste. Contudo, para gaseificação em grande escala de biomassa, sem mistura com carvão/coque, é afirmado em NSF (2008) que reatores de leito fluidizado são os mais adequados[118], e, é possível que gaseificadores a leito fluidizado circulante operem próximo ao regime de arraste pneumático, segundo afirma ANDRADE (2009)[119]. Ademais, deve-se ressaltar que, para pequena escala, como explicitado em NSF (2008) e BALAT et al (2009b), reatores do tipo leito fixo são os mais indicados.

As equações 17 a 23 a seguir, representam as principais reações químicas ocorridas em um processo de gaseificação:

17) Oxidação Parcial: $C + ½\ O_2 \leftrightarrow CO$, ($\Delta H$ = -111 kJ/mol)

18) Oxidação Completa: $C + O_2 \leftrightarrow CO_2$, ($\Delta H$ = -394 kJ/mol)

19) Reação gás-água (de redução): $C + H_20 \leftrightarrow CO + H_2$, ($\Delta H$ = + 131 kJ/mol)

20) Reação de boudouard: $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$, ($\Delta H$ = +172 kJ/mol)

---

[118] Em SZKLO e SCHAEFFER (2006a) é asseverado que com o uso de reatores a leito fluidizado para gaseificação de biomassa há uma redução dos custos quando comparado ao que seria uma gaseificação de biomassa em leito de arraste, em razão de não ser necessária a etapa de pulverização da mesma.

[119] Segundo LARSON (1998), essa escala pode ser aumentada com o uso de reatores do tipo leito fluidizado pressurizado.

21) Reação de formação de metano: $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$, ($\Delta H$ = -75 kJ/mol)

22) "Water-gas shift": $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$, ($\Delta H$ = -41 kJ/mol)

23) Reação de formação de metano: $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$, ($\Delta H$ = +206 kJ/mol)

As duas primeiras são reações de oxidação do carbono contido na biomassa (combustão). Equação 17, trata da oxidação parcial enquanto a 18, da oxidação completa. Ambas são exotérmicas e, segundo ANDRADE (2009), responsáveis por ofertar quase toda a energia demandada pelas reações endotérmicas, traduzidas pelas reações 19, 20 e 23. Estas se referem, respectivamente, à oxidação parcial do carbono pelo vapor (que pode ser representado pela umidade contida na biomassa), da reação de Boudouard, responsável por reduzir a formação de CO_2 na etapa de gaseificação, e, da formação de metano, também verificada na reação 21 (exotérmica). Por último, mas não menos importante deve-se destacar a reação 22, exotérmica, denominada de *water-gas shift* (WGS), que, pode ser compreendida como uma reação de ajustamento, pois, tem como objetivo elevar a produção de H_2 através da reação de H_2O (vapor) com CO[120]. As reações de 17 a 21 constituem-se basicamente na transformação de sólido (carvão produzido na etapa de pirólise) em gás, enquanto as reações 22 e 23, tratam da transformação de gás para gás.

Assim, via gaseificação, obtém-se o syngas, gás constituído majoritariamente por H_2 e CO, porém, contendo impurezas. Estas, citadas no primeiro parágrafo, são representadas em grande parte, como mostrado em NSF (2008), por alcatrão, amônia, H_2S[121]e particulados[122]. Elas influenciam negativamente nos processos subseqüentes, responsáveis pela produção de combustíveis, químicos e eletricidade. Por isso, como

[120] Ajustando, portanto a razão H_2/CO, relevante muitas vezes na síntese dos combustíveis.
[121] De acordo com NSF (2008), para um syngas típico, oriundo de um gaseificador de biomassa, é encontrado: 10.000-15.000 ppm, o alcatrão, 2.000-4.000 ppm, a amônia e 100-500 ppm o H_2S.
[122] Um syngas oriundo da gaseificação de biomassa em reatores do tipo leito fixo ou fluidizado tende a possuir uma quantidade menor de compostos sulfurados do que os de leito de arraste, através da co-gaseificação.

observado na figura 27, após a etapa de gaseificação, seu produto deve ser direcionado a uma etapa de limpeza (tratamento), visando removê-las e obter um produto mais rico em H_2 e CO, denominado de "syngas limpo".

Segundo NSF (2008), a etapa de hidrogenação de CO é a mais afetada pelas impurezas. O H_2S é responsável por envenenar o catalisador metálico, o alcatrão por causar incrustações e a amônia por bloquear a ação do catalisador como resultado da adsorção competitiva. Nestes casos, a remoção pode ter duas formas, onde, a primeira é baseada nas propriedades e condições de operação do reator, como explicitado em BALAT et al (2009b). Podem ser traduzidas em: temperatura, agentes de gaseificação, razão ar-combustível (razão AF), tempo de residência e adição de catalisadores. A segunda trata-se de estratégias de natureza física (pós gaseificadores), como: instalação de filtros e purificadores, e catalítica (similar aos processos aplicados em refinarias de petróleo).

Segundo BALAT et al (2009b), a primeira, apesar de não implementada comercialmente, possui um apelo econômico já que evitaria o uso de mais uma unidade de operação. Porém, ambas são estratégias que, como é asseverado em NSF (2008), podem se complementar. O esforço aplicado deve estar embasado na tolerância do catalisador utilizado na etapa de conversão à jusante. Logo, com foco no produto almejado (em geral na obtenção dos produtos finais é necessário o uso de catalisadores distintos). Assim, processos de conversão que exigem maior concentração de H_2 e CO exigem uma etapa de limpeza com custo mais elevado, como é sumarizado na figura 26.

Contaminantes	Problema Potencial	Tratamentos
Particulados	Erosão	Ciclones, filtros
Vapores alcalinos	Corrosão	Refrigeração/condensação/remoção
NH_3, HCN	Emissões	Captura, lavagem
H_2S, HCI	Corrosão, emissões	Captura, lavagem
Alcatrão e óleos	Deposição, encrustação no equipamento; tratamento de água residual	Craqueamento, limpeza, filtragem, combustão

	Nível de esforço empregado na estapa de limpeza			
	Pouco	Modesto	Alto	Muito alto
Queima direta	✓			
Motores de CI		✓		
Turbina a gás			✓	
Célula combustível				✓
Sínteses de combustíveis				✓

FIGURA 26 - Pontos relevantes na etapa de limpeza do syngas
Fonte: LARSON (2007)

Na etapa de hidrogenação de CO, exposta a seguir na figura 27, diversos produtos finais podem ser obtidos, todavia, nesta figura é omitida a etapa posterior de *upgrading*. Esta pode estar integrada à planta (que realizou a etapa de conversão do syngas), ou, inserida em uma refinaria de petróleo (as unidades de processamento são similares). Ademais, importante observar que a etapa de WGS, expressa na equação 22, não existe somente como um fator de ajuste da razão H_2/CO, e sim, como a etapa da rota responsável pela produção de hidrogênio. O calor e energia elétrica, favorecendo processos de co-geração, podem ser obtidos através do "syngas limpo", do hidrogênio (pilha combustível), de produtos finais como diesel ou CH_4 sintético ou do syngas não convertido da etapa de hidrogenação de CO[123].

A gasolina, olefinas, diesel e combustíveis de aviação podem ser obtidos através do processo de Fischer-Tropsch (FT), que, basicamente, de acordo com LARSON (2007), envolve o uso de catalisadores Ru, Fe e Co[124] em condições de temperatura e reatores distintos. Segundo NSF (2008), o catalisador de Fe fundido em um reator de leito

[123] Em BALAT et al (2009b) é explicitado que as etapas de hidrogenação de CO e WGS, são exotérmicas.
[124] Catalisadores como o Ni, citado em BAUER e HOFBAUER (2008) e K e outros, em BALAT et al (2009b), podem ser utilizados.

fluidizado borbulhante a elevadas temperaturas (300-350°C) é uma opção adequada para produção de gasolina, pois, o uso de catalisadores Co ou Fe em reatores a baixa temperatura (200-250°C) produz frações na faixa da gasolina (C_5 a C_{12}), como pode ser observado em SZKLO (2005), mas que, possuem baixa octanagem e são parafínicas, o que as caracteriza como uma gasolina de má qualidade[125].

Para produção de diesel e combustíveis de aviação, NSF (2008) salienta que os reatores que operam a baixa temperatura e utilizam como catalisadores o Co e ou Fe (para o diesel) e Co (para combustíveis de aviação), são os mais adequados. Estas opções de reatores priorizam a produção de frações C_{20+}, as quais, após, como asseverado em NSF (2008), devem ser submetidas à etapa de *upgrading*[126], mais especificamente, de hidrocraqueamento brando, para produção de parafinas na faixa desejada. Todavia, enquanto o diesel precisa ter baixo nível de aromáticos, os combustíveis de aviação, devido à sua necessidade do seu ponto de congelamento não ser atingido (-40 a -47°C)[127][128], devem conter alguns aromáticos e ou naftênicos, o que demanda a existência de um *upgrading* secundário.

[125] Contudo, uma combinação de reatores de elevadas e baixas temperaturas (em série ou paralelo), craqueamento de parafinas e com estágios de separação, em um grande complexo de FT, pode alcançar rendimentos elevados em diesel ou gasolina (70-90%).

[126] De acordo com NSF (2008), os processos existentes em refinarias de petróleo como, oligomerização, reforma catalítica, hidrotratamento (HDT) e hidrocraqueamento brando (HCC)/ hidroisomerização, podem ser utilizados para esta etapa.

[127] Segundo com NSF (2008), o combustível de aviação (mistura complexa de C_8 a C_{17} que, no caso do petróleo tem origem em sua fração querosênica) possui: elevada concentração energética, boa característica de combustão, baixo custo, estabilidade térmica e oxidativa excelentes, segurança e fluidez. Este deve suportar temperaturas elevadas. O encontro com seu ponto de congelamento causaria como conseqüência direta uma perda de sua fluidez.

[128] E outras especificações, segundo NSF (2008).

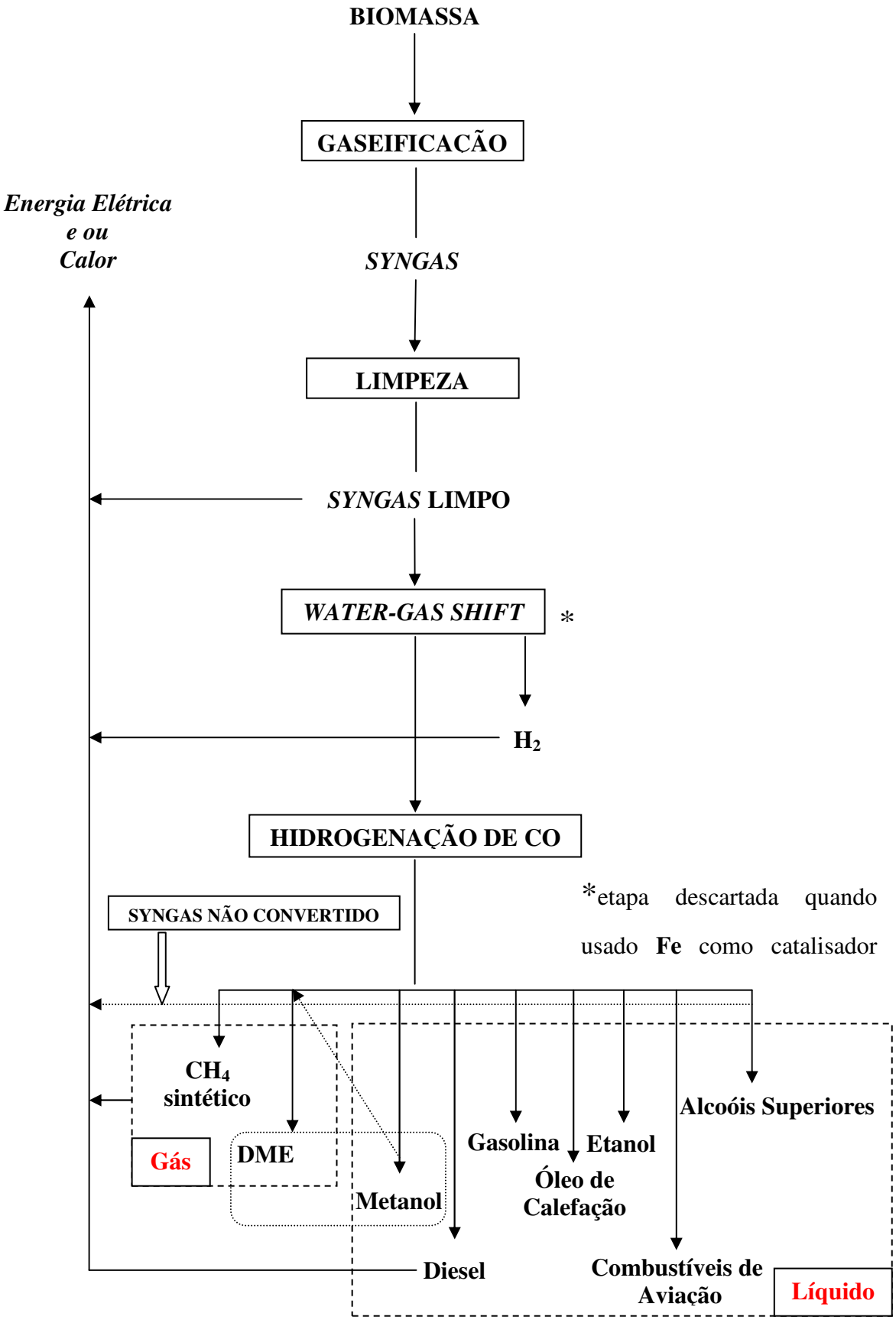


Figura 27 – Fluxograma generalizado da rota "gaseificação/syngas"

Fonte: Elaboração própria baseada em NSF (2008), ANDRADE (2009) e BALAT et al (2009b)

O fato é que os catalisadores supracitados, característicos da síntese de FT, como mostrado em NSF (2008), propiciam uma elevada seletividade em C_{5+}, o que significa uma baixa seletividade em hidrocarbonetos gasosos (C_1 a C_4). Conclui-se, portanto, que são adequados para produção de gasolina, olefinas, combustível de aviação, diesel e o óleo de calefação, o qual, também pode ser obtido através de catalisadores Co e uma etapa seguinte de *upgrading*, no caso, hidrocraqueamento. As equações 24 e 25, mostradas em BAUER e HOFBAUER (2008), representam de uma forma geral, as reações ocorridas na síntese de FT.

24) $nCO + (2n + 1)H_2 = C_nH_{2n+2} + nH_2O$

25) $2nCO + (n+1)H_2 = C_nH_{2n+2} + nCO_2$

O Co possui uma atividade de 5 a 10 vezes superior ao Fe, maior seletividade aos C_{5+} e menor produção de CO_2 (podendo ser nula), de acordo com NSF (2008). Porém, seu custo é superior ao do Fe além deste possuir elevada atividade em WGS, o que explica a etapa de WGS ser desnecessária, como mostrado na figura 27 e, portanto, haver uma preferência a razões H_2/CO baixas, na faixa de 0,6 a 1, isto é, típicas de syngas oriundo da gaseificação de óleo residual, carvão ou biomassa, como citado em MARANO e CIFERNO (2001) apud SZKLO e SCHAEFFER (2006a). Neste caso, o Co prefere razões elevadas, na faixa de 2,0 a 2,2, comuns em syngas produzido após a reforma a vapor (ou autotérmica) do gás natural ou após a etapa de WGS, feita para o "ajuste" de um syngas com uma razão H_2/CO baixa[129]. O Ru possui rendimentos bastante satisfatórios, porém é muito caro, como afirma BALAT et al (2008b). Como pode ser observado em NSF (2008) e BAUER e HOFBAUER (2008), os catalisadores Co e Fe são os mais utilizados em FT.

[129] Provavelmente oriundo, como citado, da gaseificação de óleo residual, biomassa ou carvão.

Outro ponto relevante é com relação ao desenho dos reatores utilizados na síntese FT. Em SNF (2008) é mencionado o desenvolvimento de reatores de Leito Fixo Tubular (Tubular Fixed Bed Reactor – TFBR), Leito Fluidizado e Coluna de Bolhas em Leito de Lama (Slurry Bubble Column Reactor – SBCR). Estes devem levar em consideração que a síntese é exotérmica, necessitando que haja um sistema adequado de remoção de calor, dado que o controle da temperatura é importante ao bom funcionamento do catalisador (manutenção de seus níveis de seletividade e prevenção de sua degradação).

Segundo SNF (2008), o SBCR é simples e de construção barata, opera em pressões baixas, possui uma taxa de produção superior a um TFBR de mesma capacidade e possui fácil remoção de calor, com melhor controle da temperatura do que reatores de leito fluidizado, como afirma DOE (2001) e ZHENG e FURINSKY (2005) apud SZKLO e SCHAEFFER (2006a). Ademais, possui um consumo do catalisador 20 a 30% do que é consumido no TFBR, custo de manutenção baixo, substituição do catalisador *on-line* e um custo de capital sustentavelmente baixo. Porém, é possível haver melhoramentos em TFBR devido provavelmente a elevações na pressão. Este possibilita uma taxa de transferência de calor elevada além da redução do tamanho do tubo dos catalisadores, onde o coeficiente de transferência de calor é alto.

Neste caso, com a mesma lógica exposta no item "1.1.4 – modularidade na produção de combustíveis líquidos", através da intensificação de processos, há uma possibilidade de redução de escala característica nestes reatores. Identifica-se uma tendência à modularidade. Enquanto em SBCR e leito fluidizado há uma clara vocação para operar em grandes escalas, o mesmo não se verifica em TFBR, os quais, naturalmente já possuem dimensões inferiores. De acordo com NSF (2008), uma comparação entre reatores com a mesma capacidade, os TFBR são menores que os demais. Os TFBR são mais seletivos em C_{5+}, baixa produção de CO_2 e podem alcançar níveis mais baixos de consumo do catalisador.

A via metanização é utilizada para a produção de CH_4 sintético, segundo ANDRADE (2009). O catalisador aplicado, de acordo com NSF (2008) é à base de Ni, pois, como afirma BALAT et al (2009b), este possui um nível de seletividade alto em CH_4. É praticado comercialmente nos EUA, o que facilita a sua aplicação. Em sua síntese, pode-se obter 100% de seletividade. Como uma alternativa à difícil tarefa de elevar a

produção do catalisador, é sugerida um aumento na produção de metano por meio de modificações na etapa de gaseificação, o que geraria um syngas com maior teor de CH_4.

A conversão de syngas para etanol e alcoóis superiores possui a fórmula geral de sua reação descrita na equação 26. Segundo NSF (2008), para ser mantida uma elevada seletividade é necessário o uso de catalisadores homogêneos. Porém, nos processos comerciais para o uso destes catalisadores trabalha-se em pressões elevadas além de um alto custo de recuperação e de aquisição do mesmo. Os catalisadores à base de Rh possuem uma seletividade maior para etanol do que em outros alcoóis. Eles podem alcançar níveis superiores a 50% quando aplicada alta pressão, contudo, seu rendimento em etanol é insatisfatório frente ao seu elevado custo de aquisição, como também foi explicitado em HE e ZHANG (2008).

26) $nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n+1}OH + (n - 1)H_2O$

Porém, segundo NSF (2008), uma gama de catalisadores homogêneos e heterogêneos podem ser aplicados, como os à base de Co, mostrados na figura 28, ou à base de Cu-Zn, Zn-Cr, Cu-Co, Fe ou Mo, citados por HE e ZHANG (2008). Todavia, metais alcalinos como Fe, Co, Mo ou Ni, na presença por um tempo longo de H_2S, em concentrações de $50x10^{-6}$, não conseguem preservar sua atividade inicial, necessitando de uma unidade de desulfurização, o que inviabiliza o uso destes catalisadores em pequenas escalas. Ademais, necessitam operar em pressão elevada para manter sua atividade e seletividade em C_{2+}, perdendo neste caso, para os catalisadores à base de Cu. De acordo com NSF (2008), os catalisadores à base de Rh e Cu são os mais promissores, principalmente na produção de etanol.

Os reatores utilizados assim como em FT, devem levar em consideração a característica exotérmica da reação, principalmente no caso do etanol, considerada extremamente exotérmica, segundo HE e ZHANG (2008). Com isso, em NSF (2008) é citado que na conversão de syngas para alcoóis superiores tem-se utilizado adaptações de reatores de leito fixo padrão, com o uso de projetos de refrigeração aplicados à FT e síntese de metanol. Porém, reatores de lama produzem uma troca de calor e controle de temperatura mais eficiente, o que acarreta maiores rendimentos e seletividade. Contudo,

devido à questão da intensificação de processo, tais reatores não devem ser aplicados em pequena escala. Quem melhor equaciona esta questão, como já mencionado no caso de FT, são reatores do tipo leito fixo (TFBR).

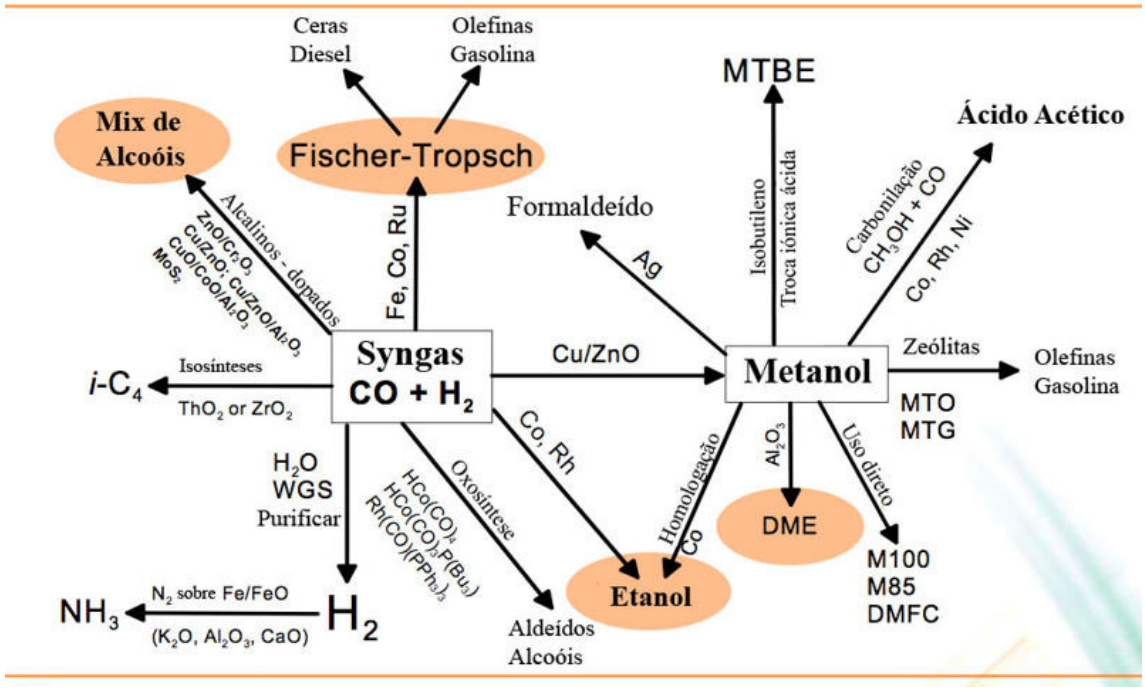


Figura 28 - Syngas e Metanol como plataforma para químicos e energéticos
Fonte: LARSON (2007)

Isso pode ser comprovado em NSF (2008), quando cita o fato de reatores micro-canais aplicados à conversão de syngas para etanol utilizando $RhMn/SiO_2$ (como um catalisador heterogêneo aplicado à reação), obterem controle eficiente de temperatura, uma seletividade de 61% de etanol e 34% para metano, a, uma conversão de 25% em 265°C e com 50 atm de pressão. O catalisador opera a uma razão H_2/CO de 2, o que acusa a necessidade de existência de uma etapa anterior WGS, quando a matéria-prima gaseificada se trata de biomassa, óleo residual, coque de petróleo e ou carvão.

A conversão do syngas em metanol, assim como no caso do CH_4 sintético, pode alcançar 100% de seletividade[130], segundo NSF (2008) e, o catalisador utilizado é baseado em Cu-Zn[131] à pressão 50-80 atm em temperaturas de 225-250°C e, com uma etapa anterior de remoção principalmente de enxofre e arsina[132]. Trata-se de um processo exotérmico, como se pode observar nas equações 27 e 28, extraídas de PIRES DE LIMA (2009)[133]. Assim, é necessário que os reatores tenham um sistema de troca de calor eficiente, como no caso de FT e alcoóis. Tais reatores, de acordo com NSF (2008), para os processos de baixa pressão, são de leito fixo, diferenciados basicamente pelo método de remoção de calor utilizado. No caso, reatores do tipo micro-canais também são empregados, realizando, como explicitado em CASTELO BRANCO (2007), um sistema eficiente de troca de calor em pequena escala.

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

28) $CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$ $\Delta H_r = -41.67$ kJ/mol

Na figura 28, se observa que o metanol, assim como o syngas, também pode servir como plataforma para produtos químicos e energéticos. Todas as rotas que geram produtos que poderiam ser produzidos via syngas, mas, são obtidos através do metanol (oriundo do syngas), denominam-se indiretas. Destas, pode-se citar a rota indireta do etanol, através da homologação, como bem citada em NSF (2008), as olefinas e

---

[130] Em PIRES DE LIMA (2009), é citado que esta seletividade alcança em geral aproximadamente 99,5% com catalisadores à base de Cu. Deve-se destacar que o processo exige uma recirculação do syngas não reagido, retornando esta fração para o reator e alcançando, portanto, os níveis elevados de conversão do insumo em metanol.

[131] Em AHN et al (2008), é citado que os catalisadores na síntese do metanol consistem geralmente nos catalisadores (de uso comercial): $Cu/ZnO/Al_2O_3$ (ou Cr_2O_3).

[132] De acordo com NSF (2008), devido à baixa temperatura do catalisador de WGS, os catalisadores da síntese do metanol são susceptíveis a envenenamentos. A etapa de WGS é necessária visto que, segundo BALAT et al (2009b), a razão H_2/CO do syngas ideal é superior a 2, já que, como se observa na equação 28, são necessários 3 mols de H_2 para 1 mol de CO_2. Portanto, deve ser dada importância às equações 22 e 23 (reforma a vapor/WGS).

[133] Contudo, como se pode observar em HE e ZHANG (2008), é menos exotérmico do o processo de conversão de syngas para etanol.

gasolina, com uso de catalisadores do tipo Zeólitas e o DME, através, como mostrado em AHN et al (2008), da desidratação do metanol (equação 29), com uso de catalisadores baseados em Al[134]. A obtenção deste produto pela rota direta (equação 30), isto é, por meio do syngas, está na figura 27, mas, não é mostrada na figura 28.

29) $2CH_3OH \rightarrow CH_3OCH_3 + H_2O$ $\Delta H_{298} = -5.6$ kcal/mol

30) 3CO + 3H2 → CH3OCH3 + CO2

No processo de conversão direta (syngas-DME), há uma junção das duas etapas realizadas quando feita a rota indireta (syngas-metanol-DME). Por isso, utilizam-se os catalisadores usados na conversão de syngas-metanol e metanol-DME (desidratação) em um único reator, como se observa em LEE et al (2006) e AHN et al (2008). Para reatores do tipo leito fixo ou fluidizado (fase gasosa), os dois catalisadores (em pó), ou são misturados e aglomerados, formando pastilhas, ou formam-nas separadamente. Nos reatores em leito de lama (leito de arraste), os catalisadores (em pó) podem ser utilizados diretamente. Outro procedimento consiste em criar um único catalisador com objetivo de exercer as duas atividades. Tais procedimentos criam um processo, em tese, termodinamicamente e financeiramente superior (menor custo de investimento), com níveis de conversão elevados, como ressaltado em HU et al (2005), que, demonstra a possibilidade de produção de DME para pequena escala, em reatores micro-canais.

Como pode ser verificado na figura 28, através do syngas e metanol como plataformas, diversos outros produtos além dos mencionados (incluídos na figura 27), podem ser obtidos. A destinação destes ultrapassa a indústria da energia e atinge a indústria química, como no caso da amônia, ácido acético, formaldeído e ceras. Os dois últimos, junto com olefinas, formam uma gama de insumos para o setor petroquímico. Ademais,

[134] Em AHN et al (2008) é citado que a desidratação do metanol consiste basicamente por meio de catalisadores selecionados a partir de matérias de ácido sólido, incluindo γ-alumina, sílica-alumina, zeólitas, argilas, fosfatos, sulfatos, metais halogenetos, resinas ácidas, com o apoio de ácido fosfórico e ácidos heteropoli.

observam-se também produtos "energéticos" como o MTBE, concorrente ao álcool anidro como aditivo à gasolina[135] e o DMFC, de uso destinado às pilhas combustível.

A possibilidade, sempre frisada ao longo da explanação sobre a rota "gaseificação/syngas", de compactação dos reatores utilizados em suas etapas, pode ser confirmada em NSF (2008). A redução no tamanho dos reatores, da gaseificação a conversão, baseada na tecnologia de intensificação de processos, vide micro-canais[136], refere-se a níveis inferiores a 500 bbl/d[137]. Quando comparada às tecnologias SBCR e FBR, é superior, visto que agrega a principal vantagem existente em cada uma. No caso, elevada eficiência na transferência de calor, inerente à SBCR e, alta taxa de reação e produtividade, pertencente aos reatores FBR (essas vantagens da tecnologia micro-canais já puderam ser comentadas anteriormente, no tópico "1.1.4 – modularidade na produção de combustíveis líquidos"). Essa afirmação pode ser comprovada em HU et al (2005).

[135] Por isso não possui uso no Brasil, e, vem perdendo seus mercados no mundo em detrimento do crescimento do álcool anidro como mistura à gasolina.

[136] O micro-canais que utiliza tubos ou canais estreitos onde estão presentes os catalisadores e onde ocorre a reação. Em LARSON (1998) é afirmado que a intensificação de processos ocorre baseada na tecnologia de leito fixo e não de leito fluidizado porque com isso consegue-se evitar custos com sistemas de circulação da matéria-prima, sopradores e sistemas de controle e outras instrumentações.

[137] O que pode não ser favorável, visto que, em caso de custos elevados, uma produção em baixa escala pode impedir a viabilidade da tecnologia.

3.4 – Pirólise/ bio-óleo

Como mostrado anteriormente, nos processos de gaseificação ocorre uma etapa inicial de pirólise, a qual funciona a temperaturas entre 300-600°C, segundo LARSON (1998), na abstinência de oxigênio, causando a vaporização das partes voláteis e conseqüentemente a formação de carbono fixo e cinzas. Como mostrado em BALAT et al (2009a), os produtos finais deste processo estão em estado sólido, líquido e gasoso[138], onde, o primeiro pode ser traduzido em carvão[139] e, o terceiro, em gases de baixo e alto poder calorífico. Quanto à fração líquida, de acordo com ROCHA et al (2004), esta pode ser denominada de óleo de pirólise, bio-óleo bruto, bio-combustível, líquidos de madeira, óleo de madeira, líquido condensado da fumaça, destilado da madeira, alcatrão pirolenhoso, ácido pirolenhoso, e outros. O rendimento e composição em líquidos, sólidos e gases[140], diferem-se, como mostrado em NSF (2008), com relação à temperatura, pressão e tempo de residência dos vapores de pirólise liberados. Portanto, o tipo de pirólise empregada[141] exerce muita influência. Estas são comumente classificadas de convencional, rápida ou "*flash*"[142].

A pirólise convencional, como definiu BALAT et al (2009a) trata-se do tipo de pirólise que ocorre por meio de uma taxa de aquecimento lenta, maximizando a produção de carvão. Já a pirólise rápida (também denominada de termólise) ocorre com uma taxa de aquecimento rápida, curto tempo de residência[143] e temperaturas moderadas, maximizando a produção de bio-óleo, que responde por aproximadamente 60-75 wt% mais 15-20 wt% de carvão e 10-20 wt% de gases não condensáveis (para analisar o rendimento em líquido, carvão e gás, ver tabela 22). A pirólise "*flash*", também apresenta um maior rendimento em líquidos, porém, esta se encontra em estágio de

---

[138] A diferença pra gaseificação (e combustão), como pode ser observado em BALAT et al (2009a), consiste na presença de oxigênio (pirólise funciona em absistinência de oxigênio, gaseificação é parcial e combustão é em excesso), na temperatura da reação e nos produtos finais. Ver tabela 27.
[139] E líquidos condensáveis, segundo NSF (2008).
[140] Especificamente no caso dos líquidos, como mostrado em ROCHA et al (2004).
[141] Também exerce influência o tipo de biomassa utilizada, segundo ROCHA et al (2004).
[142] Em ROCHA et al (2004) considera-se rápida como "*fast*" e "*flash*" e ainda acrescenta-se ultra-rápida como mais uma classificação.
[143] Segundo ROCHA et al (2004), ocorre tanto para produtos voláteis formados (fase vapor, aproximadamente menor que 2s, de acordo com BALAT et al (2009a), para que ocorra um resfriamento rápido do vapor de pirólise), quanto para partícula de biomassa.

desenvolvimento inferior. Ela opera com temperaturas mais elevadas e uma maior taxa de aquecimento, produzindo como líquidos o bio-óleo ou bio-crú, o qual pode ser utilizado diretamente em motores e turbinas. Neste, uma eficiência superior a 70% pode ser alcançada. Uma comparação entre os três diferentes tipos mencionados podem ser observada na tabela 22.

Tabela 22 – Rendimentos típicos de produtos (matéria seca) obtidos por diferentes processos de pirólise de madeira

Processo	Condições	Rendimento do produto (%)		
		Líq.	Carvão	Gás
Rápido	Temperatura moderada (~500°C) tempo de residência curto de vapor quente (~1s)	75	12	13
Intermediário	Temperatura moderada (~500°C) tempo de residência moderado de vapor quente (~10-20s)	50	20	30
Lento (carbonização)	Baixa temperatura (~400°C) tempo de residência de sólidos muito longo	30	35	35
Gaseificação	Temperatura elevada (~800°C) longo tempo de residência de vapor	5	10	85

Fonte: BRIDGWATER (2007) apud BALAT et al (2009a)

Tabela 23 – Faixa dos parâmetros principais nos processos de pirólise

Tecnologia de Pirólise	Tempo de residência em sólido (s)	Taxa de aquecimento (K/s)	Tamanho da partícula (mm)	Temperatura (K)
Convencional	450-550	0,1-1	5-50	550-950
Rápida	0,5-10	10-200	< 1	850-1250
Flash	< 0,5	>1000	< 0,2	1050-1300

Fonte: BALAT et al (2009a)

O bio-óleo, de acordo com NSF (2008), pode ser classificado como um composto complexo, ácido e termicamente instável, que, retém aproximadamente 70% da energia contida na biomassa antes do processo. Este possui frações solúveis[144] e insolúveis em água. A primeira, com elevada concentração de oxigênio, é oriunda da celulose[145] e hemicelulose, enquanto a segunda, possui origem na lignina, e, portanto, como se observa na tabela 24, possui menor quantidade de oxigênio contida. Em BALAT et al (2009a), é destacado que a água está presente entre 20-25%, a parte insolúvel, entre 25-30%, ácidos orgânicos entre 5-12%, hidrocarbonetos não polares em 5-10%, anidro-açúcares em 5-10% e outros componentes oxigenados entre 10-25%.

Devido à elevada quantidade de oxigênio[146] contida, seu poder calorífico é inferior ao do petróleo, como mostrado em YAMAN (2004)[147] e, um fator gerador de instabilidade, gerando problema na estocagem do produto (ele se oxida com o tempo, alterando sua composição inicial). A acidez provoca problemas de corrosão e pequenas partículas de carvão que estão contidas no bio-óleo podem trazer problemas em sistemas injetores e ou turbinas. No caso, como explicitado em NSF (2008), esse carvão pode ser removido através de ciclones ou em uma corrente de efluente, porém, após, ainda permanecem um montante não removido, piorando sua qualidade.

Todavia, a busca por processos de pirólise que possuam maior rendimento em bio-óleo se deve ao fato deste produto possuir uma maior densidade energética do que os demais[148], segundo ROCHA et al (2004). Ademais, além de melhores condições para transporte, em comparação ao gás e o carvão, é possível seu uso em refinarias de petróleo, na queima direta, com substituição ao óleo combustível e, sua utilização como fonte de matéria-prima para obtenção de produtos da indústria química em geral. De

[144] Segundo BALAT et al (2009a), o bio-óleo pode absorver em torno de 35% de água.
[145] Contudo, por razão de sua fração cristalina, na rota "hidrólise-fermentação" é afirmada que a celulose é insolúvel em água e na maioria dos solventes existentes.
[146] E significante quantidade de água, segundo BALAT et al (2009a).
[147] Representa 40-50% do poder calorífico existente em combustíveis hidrocarbonetos.
[148] Também com relação à biomassa. Porém, segundo YAMAN (2004), esta tem a possibilidade de ser briquetada, aumentando sua densidade e amenizando a limitação de seu transporte.

acordo com BALAT et al (2009a), também é possível utilizá-lo em motores diesel[149] e turbinas a gás.

Uma comparação entre bio-óleo e óleo combustível pesado (além do bio-óleo oriundo do processo de liquefação), pode ser observada na tabela 24. Nesta, observa-se que o bio-óleo possui maior quantidade de água (inexistente no óleo combustível), oxigênio, acidez e resíduos da destilação. Seu poder calorífico traduz-se na metade do poder calorífico do óleo combustível e sua quantidade de carbono e hidrogênio são inferiores. Contudo possui menor viscosidade. Em BALAT et al (2009a), é realizada uma comparação idêntica porém com diesel. Os resultados são, naturalmente, com exceção da viscosidade[150], similares.

Tabela 24 – Propriedades do bio-óleo e óleo combustível pesado

Propriedade	Óleo de Pirólise	Óleo de Liquefação	Óleo Comb. Pesado
Umidade contida	15-30	5.1	0.1
pH	2.5		
Peso específico	1.2	1.1	0.94
Composição elementar, wt%			
-Carbono	54-58	73	85
-Hidrogênio	5.5-7.0	8	11
-Oxigênio	35-40	16	1.0
-Nitrogênio	0-0.2		0.3
-Cinzas	0-0.2		0.1
Poder calorífico superior, MJ/kg	16-19	34	40
Viscosidade (50°C), cP	40-100	15,000 (at 61°C)	180
Sólidos, wt%	0.2-1		1
Resíduo da destilação, wt%	Up to 50		1

Fonte: NSF (2008)

Como mostrado na tabela 22, para maiores rendimentos em bio-óleo, devem ser empregados reatores que executem o processo de pirólise rápida. De acordo com ROCHA et al (2004), há cinco tipos de reatores mais utilizados: leito fluidizado (borbulhante e circulante), prato rotativo, cone rotativo, vórtice e a vácuo. Destes, o reator a leito fluidizado borbulhante é o mais aplicado. Esse fato é corroborado em NSF (2008), onde, o uso de reatores de leito fluidizado é encontrado também em pequena

[149] BALAT et al (2009a) considera o bio-óleo um substituto adequado ao diesel em motores dieseis estacionários.
[150] Inferior a 2.39 cP no diesel.

escala. Todavia, em YAMAN (2004), é citado o uso reatores do tipo de leito fixo, especificamente para processos de pirólise utilizando H_2 (hidropirólise)[151].

O bio-óleo serve de matéria-prima para duas rotas tecnológicas distintas. Como pode ser observado na figura 29. Uma consiste em direcioná-lo para uma etapa de gaseificação, podendo inclusive, ser co-gaseificado com carvão, óleo combustível ou coque de petróleo e a outra em aumentar sua qualidade para destiná-lo a uma refinaria de petróleo, sendo, portanto, trabalhado como um petróleo oriundo de biomassa, um "petróleo vegetal". Para esta rota, também se cogita a mistura com petróleo pesado, como citado em NSF (2008) e emulsão com diesel, segundo BALAT et al (2009a).

[151] Com objetivo de reduzir o montante de oxigênio contido.

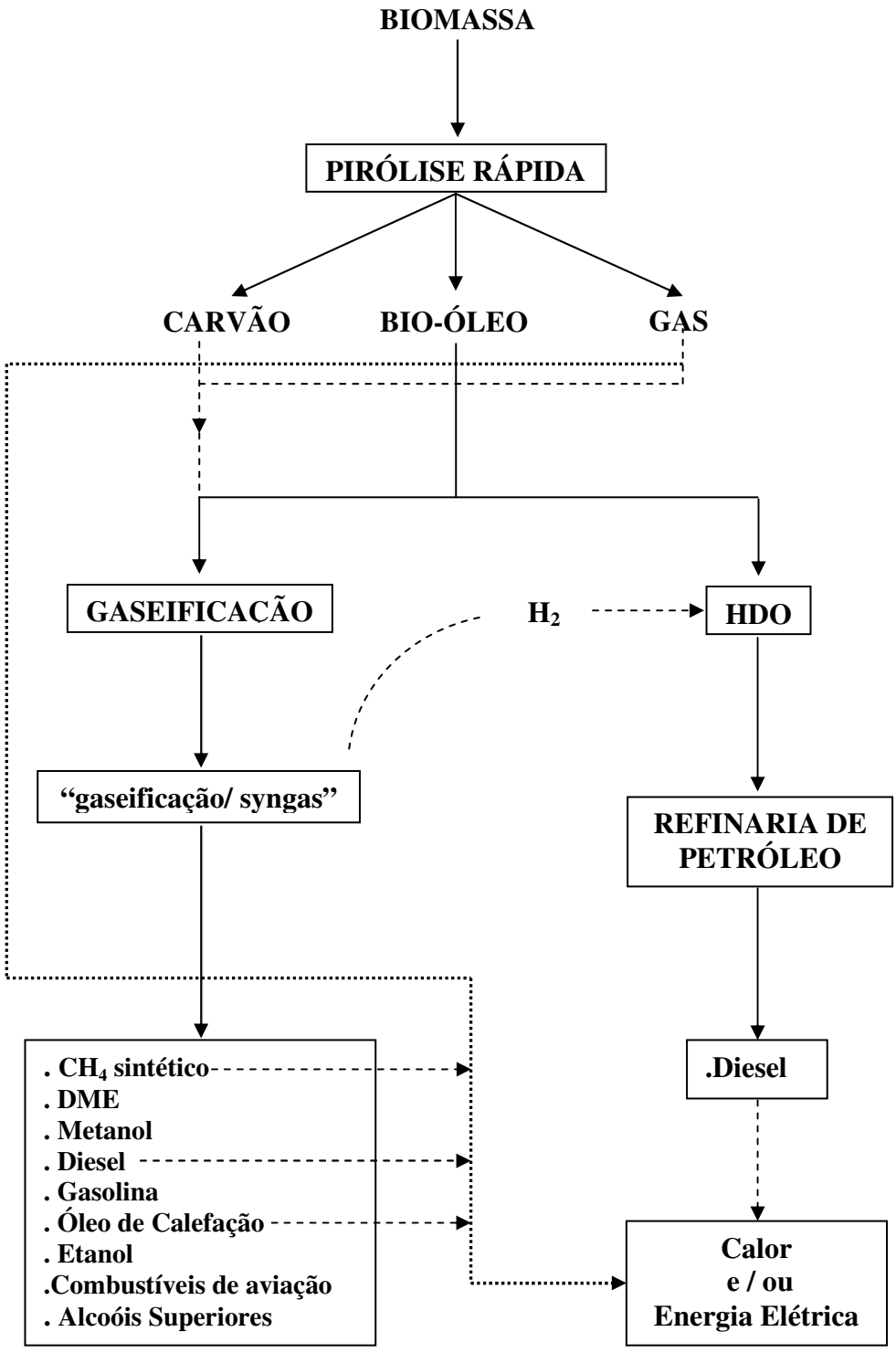


FIGURA 29 – Fluxograma geral da rota pirólise/bio-óleo

Na primeira opção, após a gaseificação do bio-óleo, como pode ser observado em YAMAN (2004), NSF (2008) e BALAT et al (2009a), obtém-se o syngas e conseqüentemente a rota passa a seguir um caminho idêntico ao exercido na rota gaseificação/syngas, com as mesmas etapas de limpeza, WGS e hidrogenação de CO,

gerando, com isso, os mesmo produtos finais. Porém, quando gaseificado (isoladamente ou na co-gaseificação), o bio-óleo pode ser beneficiado por meio do esforço exercido pelas indústrias petrolíferas, em matéria de investimento no desenvolvimento de reatores de gaseificação do tipo leito de arraste (de lama). Segundo PELÁEZ-SAMANIEGO et al (2008) e JORDAN et al (2009), o bio-óleo pode ser aplicado neste tipo de gaseificador[152]. Ele responde adequadamente às especificações do mesmo quanto à necessidade de pulverização do combustível utilizado, podendo, portanto, ter um rendimento elevado na produção de syngas para grandes escalas.

Na segunda opção, o bio-óleo deve passar por alguma unidade de remoção do oxigênio contido para aumentar sua densidade energética (poder calorífico) e torná-lo mais estável[153]. Essa pode ser uma unidade de desoxigenação (HDO)[154], a qual, segundo NSF (2008) deve procurar catalisadores capazes de maximizar a redução de oxigênio frente a uma minimização do consumo de hidrogênio[155]. De acordo com BALAT et al (2009a), é comum o uso de catalisadores típicos de unidade de HDT (CoMo ou NiMo suportado em alumina), aplicação de temperaturas moderadas (302-602°C) e pressões elevadas. Neste caso, objetiva-se transformá-lo em uma matéria-prima mais similar a um petróleo, no caso, bastante semelhante a um gasóleo, proporcionando, quando utilizado como carga em uma refinaria, produtos na faixa de diesel, fato observado na figura 29 e figura 30[156].

[152] De acordo com JORDAN et al (2009), o bio-óleo, por ser uma biomassa liquefeita, se comporta muito bem aos gaseificadores pressurizados com oxigênio como os de leito de arraste ou fluidizados.
[153] Como melhora da qualidade do bio-óleo, além da redução da remoção do oxigênio, também se pode buscar, segundo BALAT et al (2009a), redução da acidez e viscosidade.
[154] Também é citada em YAMAN (2004) e BALAT et al (2009a) a possibilidade de se utilizar catalisadores zeólitas a temperaturas entre 352-502°C, com pressão atmosférica e sem a necessidade de adição de hidrogênio.
[155] A redução dos níveis de oxigênio contido é o foco do processo supracitado de hidropirólise, que utilizam reatores de leito fixo. O custo, nesse caso, de uma unidade à jusante de HDO é reduzido.
[156] Interessante por apresentar o processo HBIO.

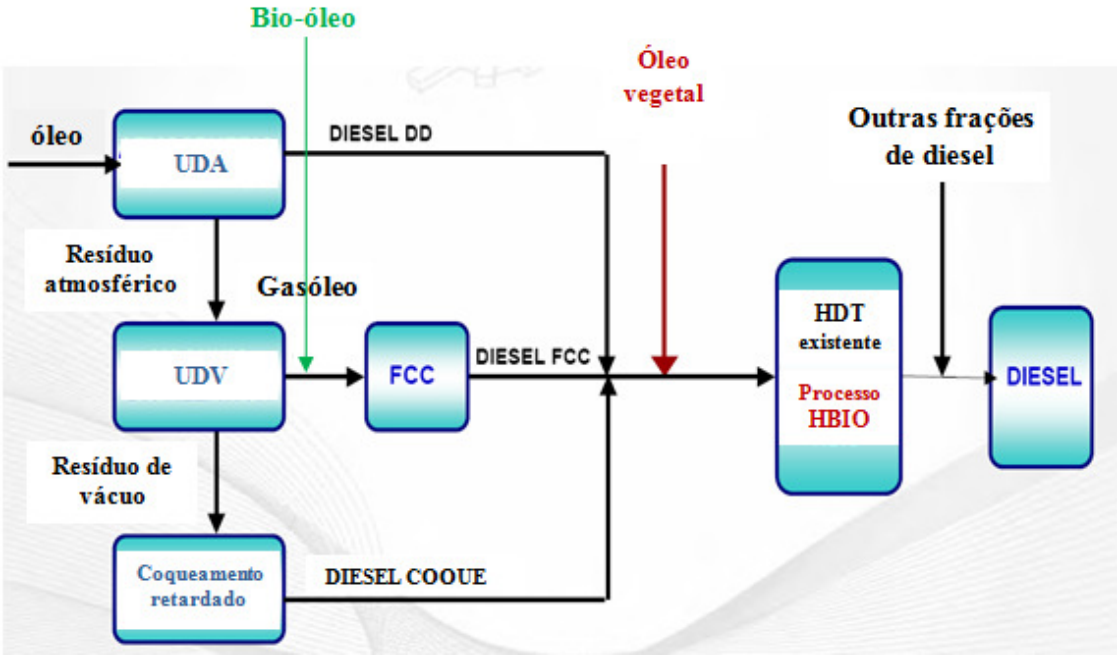


Figura 30 – FCC e HDT com bio-óleo e HBIO
Fonte: ROCHA (2008b)

3.5 - Rotas Tecnológicas

Portanto, basicamente as rotas tecnológicas trabalhadas são:

1) Hidrólise/Fermentação:

Hidrólise enzimática de hemicelulose e celulose com fermentação de pentoses e hexoses, visando produzir etanol ou butanol (alcoóis superiores). Ademais, produção de vapor e energia elétrica através da queima da lignina em caldeiras. Portanto, essa rota subdivide-se em: 1.1(etanol) e 1.2 (alcoóis superiores).

2) Hidrólise/Desidratação:

Hidrólise enzimática da hemicelulose e celulose com desidratação de pentoses e hexoses, visando obter furfural e HMF. Produção também de vapor e energia elétrica através da queima da lignina em caldeiras.

3) MixAlco/Etanol:

Após a desidratação e secagem dos carboxilatos, há a etapa de "Acid Springing", gerando um "Mix de Ácidos". Com uma etapa, após, de esterificação e hidrogenólise obtém-se etanol. Ademais, a gaseificação da lignina e uma etapa de WGS visando a produção de hidrogênio é realizada, gerando produção de calor que pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

4) MixAlco/Alcoóis Superiores:

Após a desidratação e secagem dos carboxilatos, há uma etapa de "Conversão Térmica", gerando um "Mix de Cetonas". Com uma etapa, após, de hidrogenação obtém-se alcoóis superiores. Ademais, a gaseificação da lignina e uma etapa de WGS visando a produção de hidrogênio é realizada, gerando produção de calor que pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

5) MixAlco/Oligomerização:

Após as etapas para produção de alcoóis, direciona-os a uma etapa de oligomerização visando a obtenção de gasolina, diesel e combustível de aviação.

6) Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica:

Após a etapa de limpeza do syngas, este é direcionado à turbina para geração de energia elétrica.

7) Gaseificação/*Syngas*/Hidrogênio:

Após a etapa de limpeza, uma etapa de WGS não com a intenção de ajustar a razão H_2/CO, mas de elevar a produção de H_2 é executada. Também ocorre a produção de energia elétrica, através do calor gerado pela etapa de WGS.

8) Gaseificação/*Syngas*/FT – Ceras e Diesel:

O syngas limpo é direcionado a reatores para processos FT que operam em temperaturas mais baixas, mais seletivos em C_{20+}. Em seguida é realizada uma etapa de "upgrading" (hidrocraqueamento brando) para produção de parafinas na faixa desejada. Também ocorre a produção de energia elétrica, através do calor gerado pela etapa.

9) Gaseificação/*Syngas*/FT - Combustível de Aviação:

Esta rota transcorre de forma idêntica a anterior (número 8), contudo, uma etapa posterior de upgrading é adicionada, com vistas a elevar a fração de aromáticos e ou naftênicos.

10) Gaseificação/*Syngas*/FT – Olefinas e Gasolina:

O syngas limpo é direcionado a reatores FT que operam em elevada temperatura, produzindo líquidos na faixa da gasolina. Estes seguem para uma unidade de upgrading. Também é produzida energia elétrica através do calor gerado pela etapa.

11) Gaseificação/*Syngas*/CH_4 sintético:

O syngas limpo é destinado a um reator visando produção de CH_4 sintético. Obtém-se 100% de seletividade. O calor gerado também pode ser usado na produção de energia elétrica.

12) Gaseificação/*Syngas*/Etanol e Alcoóis superiores:

Produz-se etanol e alcoóis superiores em um reator alimentado com syngas limpo, e, em seguida, também pelo calor gerado no processo, produz-se energia elétrica.

13) Gaseificação/*Syngas*/Metanol:

Assim como na produção de CH_4 sintético, possui 100% de seletividade e, como os demais, produz calor no processo, que pode ser aproveitado na geração de energia elétrica. O metanol pode ser utilizado como plataforma para obtenção de outros produtos, na chamada rota indireta.

14) Gaseificação/*Syngas*/DME:

Pode ser produzido através do syngas limpo, com a utilização de uma combinação dos catalisadores obtidos pela rota indireta, ou seja, syngas-metanol-DME. Também há a geração de energia elétrica através do calor gerado.

15) Pirólise/Bio-óleo/Gaseificação/*Syngas*:

Após a etapa de pirólise rápida é obtido majoritariamente o bio-óleo, o qual, em seguida é gaseificado. Essa gaseificação ocorre em reatores de leito de arraste, em grandes escalas. Após a geração do syngas, a rota segue idêntica às anteriores (6-14). Portanto, subdivide-se esta rota em: 15.6, 15.7, 15.8, 15.9, 15.10, 15.11, 15.12, 15.13 e 15.14.

16) Pirólise/Bio-óleo/Desoxigenação/Diesel:

Após a pirólise, obtém-se o bio-óleo que é direcionado a uma unidade de desoxigenação (HDO), transformando-o em um produto similar a um gasóleo. Com isso, em seguida sofre os mesmos processos aplicados em uma refinaria para um gasóleo, obtendo diesel no término do processo. Nesta rota, parte do bio-óleo, carvão e ou gás, é direcionada a uma unidade de gaseificação com vistas a produção de hidrogênio, pelo processo de WGS. Esse hidrogênio é então destinado a unidade de HDO. Também há a produção de calor que no processo, o qual pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

17) Pirólise/Bio-óleo

O bio-óleo obtido após a etapa de pirólise rápida além de pode ser utilizado como um insumo para o conjunto de rotas tipo 15 (15.6, 15.7, 15.8, 15.9, 15.10, 15.11, 15.12, 15.13 e 15.14) ou a rota 16, pode, para todos estes, ser encarada como uma zona de densificação (para transporte do insumo a distâncias superiores a 100 km). Contudo esse bio-óleo também pode ser utilizado em motores diesel ou óleo combustível estacionários, com vistas à geração de energia elétrica (típica de sistemas isolados).

Deve-se frisar que, para todas as rotas de 6 a 14, existe mais uma possibilidade que é a supracitada co-gaseificação (ou co-queima). Quando mencionada a gaseificação somente de biomassa, utilizar-se-á a classificação 6a-14a (15.6a-15.14a) e quando houver a co-gaseificação, 6b-14b (15.6b-15.14b). Esta última, porém, somente será realizada em reatores do tipo leito de arraste, otimizado para grandes escalas (que sempre vale para 15).

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO: ESTUDOS DE CASO

Com base na questão 2, formulada no capítulo 2 -"dado um determinado ambiente (combinação de variáveis exógenas), que características uma planta deveria possuir (combinação de variáveis endógenas) para atuar adequadamente naquele local?"-, conclui-se que a aplicação do modelo proposto (também no capítulo 2) se dará através de estudos de casos hipotéticos por meio de 5 etapas, que consistem em:

Etapa 1) Identificar as características que a planta deveria possuir para atuar adequadamente nas regiões hipotéticas selecionadas;

Etapa 2) Eliminar determinados ambientes que seriam improváveis de se encontrar no território nacional;

Etapa 3) Determinar quantidade de matéria-prima e perfil de mercado consumidor que preencham os requisitos das colunas;

Etapa 4) Detectar as variáveis endógenas existentes nas plantas de bio-refinarias listadas no item 3.5;

Etapa 5) Selecionar o conjunto de plantas mais adequado, ideal para operar na localização hipotética determinada (com mais chances de sucesso);

As regiões hipotéticas estão calcadas na figura 17, onde 8 colunas representam 8 combinações de 6 diferentes variáveis exógenas, o mesmo que 8 tipos de regiões distintas. As variáveis exógenas, como recapitulação, são:

I) Acesso a grandes quantidades de insumo
II) Difícil acesso a grandes quantidades de insumo
III) Mercado consumidor existente ou potencial (porte)
IV) Mercado consumidor restrito ou limitado (porte)
V) Demanda do mercado consumidor pelo conjunto de bens produzidos: existente ou potencial
VI) Demanda do mercado consumidor pelo conjunto de bens produzidos: restrita ou limitada

Os 8 tipos de regiões diferentes, formados pela combinação das 6 variáveis exógenas citadas estão representados na tabela 25.

Tabela 25 - Descrição simplificada sobre a composição das colunas (variáveis exógenas)

variáveis exógenas (regiões hipotéticas)		**DESCRIÇÃO**
COLUNA=j	**COMPOSIÇÃO**	
1	I+III+V	Acesso a grandes quantidades de insumo e a um mercado consumidor (existente ou potencial), cuja, demanda pelo conjunto de bens produzidos pela bio-refinaria também existe ou é potencial.
2	II+III+V	Difícil acesso a grandes quantidades de insumo, porém, o mercado consumidor é existente ou potencial, e, a demanda pelo conjunto de bens produzidos pela planta é existente ou potencial.
3	I+IV+V	Acesso a grandes quantidades de insumo, porém, o mercado consumidor que se tem acesso é restrito ou limitado. Todavia, a demanda pelo conjunto de produtos produzidos é existente ou potencial.
4	II+IV+V	Difícil acesso a grandes quantidades de insumo e a mercado consumidor restrito ou limitado. Contudo, existe uma demanda pelo conjunto de bens produzidos (ou é potencial).
5	I+III+VI	Acesso a grandes quantidades de insumo, a um mercado consumidor existente ou potencial, mas que, porém, possui uma demanda restrita ou limitada pelo conjunto de produtos que podem ser produzidos.
6	II+III+VI	Difícil acesso a grandes quantidades de insumo, porém, o mercado consumidor é existente ou potencial. Todavia, sua demanda pelo conjunto de produtos produzidos é restrita ou limitada.
7	I+IV+VI	Acesso a grandes quantidades de insumo, porém, a um mercado consumidor restrito ou limitado cuja demanda pelo conjunto de produtos produzidos também o é.
8	II+IV+VI	Difícil acesso a grandes quantidades de insumo, mercado consumidor restrito ou limitado cuja demanda pelo conjunto de produtos produzidos também o é.

Também como recapitulação, são 12 as variáveis endógenas do modelo[157], que consistem em:

A) Plantas com economia de escala
B) Plantas de características modulares
C) Horizonte promissor de redução de custos ao longo do tempo
D) Reduzido espaço para redução de custos ao longo do tempo
E) Alto grau de economia de escopo
F) Sem (ou com baixo grau de) economia de escopo
G) Sistemas de elevado grau de flexibilidade
H) Sistemas inflexíveis ou com baixo grau de flexibilidade
I) Potencial alto de ofertar produtos diferenciados
J) Potencial baixo (ou nulo) de ofertar produtos diferenciados
K) Mesma base tecnológica
L) Base tecnológica diferente

Como mostrado no capítulo 2, a construção destes possíveis arranjos de variáveis endógenas tem como base a fusão da tabela 10 e 14, porém, devem-se adicionar as variáveis *I*, *J*, *K* e *L*, representando, portanto, um conjunto contido no conjunto das 64 composições diferentes (linhas no caso do modelo), expostas na figura 16.

[157] Variações das "variáveis chaves" mostradas na figura 3, fundamentadas no capítulo 1: economia de escala, economia de escopo, flexibilidade, diferenciação e diversificação.

4.1 – Etapas 1 e 2: determinação de combinações compatíveis

Para determinar quais das 8 colunas da matriz completa (64x8) representadas na figura 17 são regiões compatíveis à implantação de bio-refinarias com base nas rotas descritas no capítulo 3, o estudo apoiou-se nas tabelas 10 e 14, construídas no capítulo 2.

A primeira constitui-se na relação entre atributos ligados ao grau de economia de escala estática (classificação *A* e *B*) e dinâmica (classificação *C* e *D*) frente a acesso a grandes quantidades de matéria-prima (classificação I e II) e porte do mercado consumidor (classificação III e IV). Já a segunda representa as relações existentes entre grau de economia de escopo (classificação *E* e *F*) e flexibilidade (classificação *G* e *H*) frente ao grau de diversificação do mercado consumidor (classificação *V* e *VI*).

Como atribuído no capítulo 2, as variáveis *I*, *J*, *K* e *L* não possuem uma relação tão direta com a questão da localização e sim, com competição. Por isso, elas devem combinar-se com cada uma das combinações expostas na tabela 26 (*I* ou *J* e *K* ou *L*).

Nesta pode ser verificado para todas as combinações da "vertente escala" que as variáveis exógenas II e ou IV estão presentes, plantas com a variável endógena *A* não podem ser implantadas. Neste caso, são favorecidas plantas de característica *B*, já que não possuem escala mínima eficiente, ou seja, não necessitam de uma escala específica para operar com custos mais baixos. Em *B*, estes tendem a não variar com relação a diferentes escalas de produção (figura 4, capítulo 1). Portanto, para ambientes onde há combinação de I com IV, uma solução seria utilizar plantas com este atributo.

Tabela 26 – Compatibilidade entre combinações de variáveis endógenas e exógenas

variáveis exógenas (regiões hipotéticas)		*composições compatíveis de variáveis endógenas (conjunto contido nas linhas da matriz 64x8)*	
COLUNA=j	**COMPOSIÇÃO**	**"vertente escala" (I a IV)**	**"vertente escopo" (V e VI)**
1	I+III+V	*A+C; A+D; B+C*	*E+G; E+H; F+G; F+H*
2	II+III+V	*B+C; B+D*	*//*
3	I+IV+V	*//*	*//*
4	II+IV+V	*//*	*//*
5	I+III+VI	*A+C; A+D; B+C*	*E+G; F+G; F+H*
6	II+III+VI	*B+C; B+D*	*//*
7	I+IV+VI	*//*	*//*
8	II+IV+VI	*//*	*//*

Contudo, para o caso especifico do trabalho, em que se tem a matéria-prima como um subproduto do processo industrial de açúcar e álcool, como mostrado no APENDICE III, surge uma contradição. Isso acontece porque em regiões que existe acesso à grande quantidade de bagaço (classificação I), necessariamente deve existir também grandes quantidades de álcool e ou açúcar sendo produzido em grandes escalas. Portanto, este açúcar e álcool devem possuir acesso a algum mercado que tenha capacidade de absorvê-los. Neste caso, este mercado deverá possuir a classificação III.

Como existe a possibilidade de, através do bagaço de cana, mostrada no capítulo 3, obter etanol, necessariamente a combinação da variável exógena I e IV torna-se inviável para o caso brasileiro. Pois, pelo menos um produto que pode ser obtido de material lignocelulósico é consumido em larga escala. Assim, regiões no território nacional que tenham essa composição são muito improváveis de existir, tendo que ser descartadas as colunas 3 e 7[158].

[158] Duas considerações bastante improváveis poderiam ser assumidas. Uma seria de que pudesse existir uma usina cuja produção em larga escala seja somente de açúcar, pois o mercado que ela tem acesso apenas tem capacidade de absorver açúcar em larga escala e não etanol. Outra seria que a quantidade de bagaço gerada no processo convencional de produção de açúcar e álcool (APÊNDICE III) tem capacidade de produzir uma quantidade menor de combustíveis (em volume) do que pode ser produzido em etanol (em volume). Daí em algumas situações a menor escala poderia não justificar o transporte, impedindo o acesso. Contudo, a alternativa das rotas 1, 3, 12 e 15.12 (que produzem etanol) descarta esta possibilidade, já que sua produção aumentaria o volume (conseqüentemente a escala) do produto comercializado (no caso etanol).

Outro resultado importante destacado pela tabela 31 é que em mercados do tipo VI, um sistema produtivo flexível (classificação G) é uma vantagem, especificamente para um caso de grau alto de economia de escopo na planta. Isso ocorre, pois, uma planta com esse atributo, mas com um sistema inflexível (classificação H) neste mercado, não consegue que alguns (ou maioria) de seus produtos sejam absorvidos pelo mesmo. Quando a planta possui baixo grau de economia de escopo (classificação F), dependerá somente do tipo de produto demandado. Se este for diferente do ofertado pela planta, a localização torna-se incompatível. Do contrário, a localização é compatível.

4.2 – Etapa 3: quantidade de matéria-prima e perfil do mercado consumidor

Na construção de regiões hipotéticas que possuam as composições requeridas nas colunas escolhidas na tabela 31, é necessário buscar critérios referentes à matéria-prima e mercado consumidor. No primeiro, deve-se limitar a busca a regiões que tenham disponibilidade de insumos compatíveis com uma planta de pequena escala e uma de grande escala. Para o segundo, deve-se esclarecer o que se caracteriza nesse estudo por um mercado consumidor existente ou potencial e restrito ou limitado no que diz respeito ao porte e à demanda do mesmo com relação ao conjunto de bens produzidos[159].

Assim, quanto à disponibilidade de bagaço de cana determinou-se um piso superior e um teto inferior. O piso superior, foi estabelecido com base em JORDAN et al (2009), que determinou para reatores tipo leito de arraste, uma escala de 30 t/h de lama para daqui a cinco anos. Tomando que o número de horas trabalhadas por dia seja 19,2[160], o

[159] Tal fato não precisou ser esclarecido na aplicação no refino de petróleo, em sua análise no capítulo 1, porque a esta se limitou à escolha das células em ambientes idealizados e não reais.

[160] Considerando uma produção na bio-refinaria durante 365 dias por ano, isto é, na safra e entressafra (via estocagem do bagaço) e, um fator de capacidade (FC), com base em NETL (2007), de 80% para plantas IGCC *single train*. O FC foi encontrado através do fator confiabilidade, que é de 90% para essas plantas, segundo EPRI (2005) apud NETL (2007) o que, deduzido de 30 dias (ou duas quinzenas) de parada para manutenção, leva a um fator de capacidade de 81,2%. Os 80% (aproximados) também foram obtidos, empiricamente, por HIGMAN et al (2006) apud NETL (2007) quando apura a disponibilidade das quatro plantas IGCC operantes no mundo (Polk, Wabash, Buggenum e Puertollano). Por isso, o FC utilizado para tais gaseificadores tipo leito de arraste (lama), é de 80%, o que, leva em consideração produção e parada para manutenção não somente em períodos, respectivamente, de safra e entressafra

montante equivale a aproximadamente 900 t/d de bagaço[161]. Contudo, como estabelecido no capítulo 3, com exceção de co-gaseificação e gaseificação de bio-óleo, reatores do tipo leito fluidizado são os mais utilizados para grandes escalas, porém, operam em escalas menores, apesar de próximas em teoria, dos reatores leito de arraste. Reduziu-se, portanto, para aproximadamente 800 t/d[162] [163], o montante correspondente ao piso para regiões cujo acesso a grandes quantidades de bagaço são grandes (classificação I)[164].

Para o teto inferior, tomou-se como referência o fato de rotas tecnológicas com base em gaseificação para pequena escala, como reatores de leito fixo tubulares, operar, segundo NSF (2008), com um teto de produção de 500 bbl/d (fato citado no capítulo 3), o que, pode representar aproximadamente 650 t/d de bagaço[165] [166]. Com isso, para regiões em que a disponibilidade desta biomassa encontra-se inferior a este montante, entende-se que o acesso a grandes quantidades de matéria-prima é ruim (classificação II). Neste caso, a instalação de plantas que operem em larga escala é naturalmente descartada.

Quando é pensado o acesso à matéria-prima, no caso, o bagaço de cana, deve-se limitar a área de instalação da bio-refinaria em um raio de 100 km[167], segundo estabeleceu MARQUES et al (2009) e mencionado no APENDICE III. Isso porque, quando a bio-refinaria não for integrada verticalmente com a usina, ela deverá obter esse insumo de terceiros (alguma usina, ou pool de usinas, que estejam localizadas a 100 km de distância). Neste caso, o bagaço comercializado é o excedido no processo produtivo. Como estabelecido no APENDICE III, mostrado na tabela 36, este montante gira em torno de 5 a 10% da quantidade de bagaço gerada.

(como ocorre no processo convencional de açúcar e álcool, mostrado no APÊNDICE III). Assim, pode haver, através de estocagem, produção e manutenção nos períodos de entressafra e safra, respectivamente.

[161] Partindo de um rendimento, com base em JORDAN et al (2009), de 0,64% do reator de pirólise rápida.

[162] Em torno de 80% das 900 t/d encontradas para gaseificadores leito de arraste (lama).

[163] Nessas regiões deve haver, portanto, no mínimo 800 t/d de bagaço durando todo o ano.

[164] Como salientado na figura 11, as plantas que operam em pequena escala, modulares, não estão impedidas de atuar em um ambiente como esse.

[165] Levando em consideração uma eficiência de 50% do reator micro-canais, de acordo com CASTELO BRANCO (2008).

[166] Nestas regiões deve haver, portanto, no máximo 650 t/d de bagaço durando todo o ano.

[167] Como foi afirmado em MARQUES et al (2009), em uma distância superior a 100 km, a comercialização de bagaço de cana, feita hoje por um número pequeno de usinas, sofre forte inibição.

Assim, é requisito à classificação I (acesso bom a grandes quantidades de matéria-prima) e II (acesso ruim a grandes quantidades de matéria-prima), haver respectivamente um montante superior a 800 e, um inferior a 650 t/d de bagaço, o que, corresponde a uma região com uma ou um conjunto de usinas (em um raio de 100 km à locação da bio-refinaria) cuja quantidade de cana seja respectivamente superior a 1.100.000 e inferior a 750.000 toneladas de cana moídas por safra.

Contudo, existem dois pontos mostrados no capítulo 3 que merecem ser destacados. Um refere-se ao fato de no caso da co-queima, utilizando bagaço mais coque de petróleo ou carvão[168] para gaseificação, essa parcela de biomassa pode girar em torno de 10%, o que facilita o acesso em regiões cuja disponibilidade deste insumo não é alta. O outro diz respeito ao fato de a restrição do raio de 100 km não se aplicar ao bio-óleo. Com isso, em regiões onde o acesso a grandes quantidades de bagaço não é facilitada, e houver o interesse de produzir em larga escala, o bio-óleo pode ser uma solução adequada.

Isso pode ser equacionado com zonas de densificação[169], como sugerido em PELÁEZ-SAMANIEGO et al (2008), localizadas próximas onde há produção de bagaço. Para o caso do bio-óleo, nestas zonas estariam dispostos reatores de pirólise rápida, descritos no capítulo 3. De acordo com JORDAN et al (2009), a proporção destes reatores poderia variar de 19 a 60 para cada gaseificador[170], dependendo da escala em que este trabalha (quanto maior, mais bio-óleo é necessário ser produzido).

Com relação ao mercado consumidor, buscam-se definir se seu porte é existente ou potencial (classificação III) ou, restrito ou limitado (classificação IV), para absorver a quantidade de produtos produzida pela planta. Tenta-se auferir, portanto, se a entrada daqueles produtos no mercado pode ser comportada pelo mesmo. Isto é, se existe uma

---

[168] Referente à oferta de carvão, esta se concentra segundo IAEA (2006), no sul do Brasil, mais especificamente nos Estados de SC e RS, que representam, de acordo com FERRARI BORBA (2002) apud IAEA (2006), respectivamente 0,5 Gt e 3,7 Gt (Outras regiões foram desconsideradas (ex.: Amazonas, Acre, Bahia, Minas e Pará) porque, segundo IAEA (2006), as reservas em maior quantidade e menos custosas encontram-se no sul do Brasil. A maior reserva está localizada na mina Candiota, no RS. Esta representa em torno de 23% das reservas economicamente provadas do país). Para coque de petróleo podem ser consideradas regiões próximas a refinarias com produção de resíduos de "fundo de barril". Estas plantas e seus respectivos produtos gerados podem ser encontrados em SZKLO e ULLER (2008) e ANP (2009).

[169] Também poderia ser realizada com produção de briquetes, fato mencionado no capítulo 3.

[170] Para este caso, JORDAN et al (2009) considera a produção excedente de bagaço e não produção total, que, em grande parte é destinada às caldeiras (sistema convencional descrito no APÊNDICE III).

"carência" de pelo menos um destes ou se o mercado consumidor se encontra bem abastecido pela oferta de produtos existente. Contudo, deve-se auferir não apenas se há uma demanda superior à oferta, mas se este déficit é alto, ou seja, se o mercado consumidor consegue absorver uma produção em larga escala. Existe um espaço para entrada em grande quantidade de, pelo menos um dos produtos no mercado? É, portanto, uma questão de quantidade e qualidade.

Ao analisar os dados fornecidos por ANP (2009), verifica-se que em todos os Estados onde há refinarias de petróleo, há pelo menos déficit em QAV e gasolina de aviação, o que prova que o Brasil é importador destes dois produtos. Com isso, pode-se classificar todo grande centro consumidor como III, já que, a presença de aeroportos nestas regiões torna-os grandes demandantes de pelo menos um destes produtos. Assim, as únicas localizações que podem ser classificadas como IV são as que a quantidade demandada não é significativa a ponto de esta região ser considerada de grande porte (ex.: pode faltar QAV e ou gasolina de aviação, mas a demanda não justifica a instalação de uma planta de grande porte para atender aquele mercado específico). Portanto, devem ser localidades com baixa densidade populacional, isoladas de grandes centros consumidores.

Com relação ao grau de diversificação do mercado frente ao conjunto de produtos produzidos pelas plantas, como neste trabalho, particularmente no capítulo 3, foram descritas possíveis rotas tecnológicas de bio-refinarias que podem produzir uma gama de produtos (comuns ou não entre elas), a análise foi delimitada para os produtos mais abordados no capítulo 3: etanol, energia elétrica, furfural, HMF, H_2, alcoóis superiores, gasolina, diesel, combustível de aviação, ceras, olefinas, CH_4 sintético, metanol, DME, bio-óleo e "petróleo vegetal" (bio-óleo após etapa de HDO).

Assim, ao considerar um mercado consumidor existente ou potencial com relação ao conjunto supracitado, entende-se que este demanda grande parte, ou todo o escopo de produtos que podem ser produzidos pelas bio-refinarias através das rotas tecnológicas compiladas no final do capítulo anterior (item 3.5). Do contrário, se este é restrito ou limitado, compreende-se que demanda apenas um ou poucos produtos que podem ser produzidos pela mesma. Tratar-se-ia de um mercado mais especializado. Portanto, detectar se a demanda do mercado é diversificada ou não frente a um conjunto de

produtos que podem ser obtidos pelas bio-refinarias, trata-se de uma questão de variedade, e não de quantidade.

TABELA 27 - Regiões hipotéticas e suas características em termos de materia-prima (em quantidade) e mercado consumidor (quantidade e variedade)

variáveis exógenas (regiões hipotéticas)		**DESCRIÇÃO MAIS DETALHADA**
COLUNA=j	**COMPOSIÇÃO**	
1	I+III+V	Acesso a no mínimo 800 toneladas de bagaço por dia e a um grande centro consumidor existente ou potencial (com déficit elevado em pelo menos um dos produtos), e existe ou é potencial a demanda por grande parte ou todo conjunto de bens produzidos pela bio-refinaria.
2	II+III+V	Acesso a no máximo 650 toneladas de bagaço por dia, porém, há acesso a um grande centro consumidor existente ou potencial (com déficit elevado em pelo menos um dos produtos), e existe ou é potencial a demanda por grande parte ou todo conjunto de bens produzidos pela bio-refinaria.
3	**I+IV+V**	**Descartada (etapa 2)**
4	II+IV+V	Acesso a no máximo 650 toneladas de bagaço por dia e a mercado consumidor incapaz de absorver pelo menos um dos produtos ofertados em grande escala. Contudo, existe ou é potencial a demanda por grande parte ou todo conjunto de bens produzidos pela bio-refinaria.
5	I+III+VI	Acesso a no mínimo 800 toneladas de bagaço por dia e a um grande centro consumidor existente ou potencial (com déficit elevado em pelo menos um dos produtos), mas que, porém, demanda um ou poucos produtos que podem ser produzidos pela bio-refinaria.
6	II+III+VI	Acesso a no máximo 650 toneladas de bagaço por dia, porém, há acesso a um grande centro consumidor existente ou potencial (com déficit elevado em pelo menos um dos produtos). Demanda um ou poucos produtos que podem ser produzidos pela bio-refinaria.
7	**I+IV+VI**	**Descartada (etapa 2)**
8	II+IV+VI	Acesso a no máximo 650 toneladas de bagaço por dia e a mercado consumidor incapaz de absorver pelo menos um dos produtos ofertados em grande escala. Ademais, demanda um ou poucos produtos que podem ser produzidos pela bio-refinaria.

4.3 – Etapa 4: composição das variáveis endógenas das rotas sintetizadas no item 3.5

Este tópico tem como objetivo definir para cada rota citada no item 3.5, as possibilidades de variáveis endógenas que possam ser associadas a cada uma delas. Portanto, são averiguadas quais destas rotas possuem determinados atributos: plantas com economia de escala (classificação *A*), de característica modular (classificação *B*), horizonte promissor de redução de custos ao longo do tempo (classificação *C*), reduzido espaço para redução de custos ao longo do tempo (classificação *D*), alto grau de economia de escopo (classificação *E*), sem (ou com baixo grau de) economia de escopo (classificação *F*), sistemas de elevado grau de flexibilidade (classificação *G*), sistemas inflexíveis ou com baixo grau de (classificação *H*), potencial de ofertar produtos diferenciados (classificação *I*), potencial baixo (ou nulo) de ofertar produtos diferenciados (classificação *J*), mesma base tecnológica (classificação *K*) e base tecnológica diferente (classificação *L*)[171].

4.3.1 – Grau de economia de escala estática e dinâmica: "Vertente Escala"

No tópico "1.1.2 – modularidade e economia de escala" foi expresso o objetivo de se buscar fatores de escala do tipo mostrado na equação 6 para que seja mensurada redução de custo por meio de aumento na escala de produção.

Em HAMELINCK et al (2005) são expressos fatores de escala para principais unidades de plantas da rota "hidrólise" e inclusive de gaseificadores. O estudo atribuiu em torno de 0,8 o fator de escala para as etapas de hidrólise e fermentação[172]. Para o pré-tratamento, dentre um conjunto dos processos mencionados no item "3.1 - hidrólise" do capítulo 3 pode-se citar um fator de escala de aproximadamente 0,78 e, para unidades de destilação foi mencionado um fator na ordem de 0,7. Em gaseificadores (com vistas à

[171] Para entendimento desta classificação, vide capítulo 2.
[172] O que inclui plantas do tipo SSF, SSCF e CBP cujo fluxograma pode ser verificado no capítulo 3, na figura 21.

geração de energia elétrica), foi atribuído um fator de escala também na ordem de 0,7 e, para a rota MixAlco, segundo HOLTZAPPLE et al (1999) foram calculados os fatores de escala de principais componentes da planta. Com exceção do fermentador e um dos trocadores de calor, cujos fatores foram citados como 1,0, dez componentes tiveram atribuídos seus fatores de escala superior a 0,6 enquanto 3 tiveram fatores inferiores a 0,5.

Contudo, como salientado no tópico "1.1.1 – fontes de economia de escala", a caracterização do fenômeno pode-se dar através da identificação de suas fontes, como economia geométrica e indivisibilidades tecnológicas. Assim, de acordo com o tópico "1.1.2 – modularidade e economia de escala", unidades capazes de intensificar os processos conseguem reduzir os fatores de indivisibilidade e economias geométricas aproximando o "fator de escala" de 1 (figura 4).

Neste caso, compreende-se que os valores atribuídos a fatores de escala dependem muito mais da capacidade que a rota tem de intensificar os processos. Com isso, para rotas cuja capacidade de intensificação é elevada, mas que, dependendo do tipo de tecnologia também podem ter ganhos de escala, atribuir um fator que a represente pode não ser um bom indicador. Tal fato é mostrado em NSF (2008), que define que para rotas que utilizam catalisadores biológicos seus tempos de residência no reator são elevados. O contrário é observado em rotas que utilizam catalisadores químicos e adição de calor. Estas possuem tempos de residência menores.

Com intensificação de processo, menor quantidade de matéria-prima é processada e conseqüentemente menor quantidade de produto é produzida, exigindo um tempo de residência mais curto. Não é rentável uma produção em pequena escala utilizando-se de reatores com tempo de residência longo. Não é economicamente viável produzir pouco em muito tempo. Caso a produção seja em pequena escala, o processo deve ser rápido.

Portanto, considerou-se que as rotas oriundas da plataforma termoquímica possuem uma maior aptidão para intensificação de processos do que as da plataforma bioquímica, que opera de forma mais econômica nas grandes escalas. Para as primeiras, tanto são viáveis plantas que operem em larga escala quanto as que operem em pequena escala, de caráter modular. Este fato pode ser observado no capítulo 3, onde foi mencionada a aplicação tanto de reatores micro-canais quanto leito fluidizado circulante e leito de arraste.

Contudo, para rotas de co-gaseificação e gaseificação de bio-óleo (todas as de número 15), serão consideradas apenas as grandes escalas, devido à possibilidade de se utilizar reatores leito de arraste. Ademais, para a rota 16, quando o bio-óleo é destinado a uma unidade de HDO, não será também considerada pequenas escalas devido à unidade de desoxigenação, que opera em grande escala.

A alocação das variáveis endógenas *A* e *B* às rotas sintetizadas no tópico 3.5 estão na tabela 28, a seguir.

Tabela 28 – Rotas com variáveis endógenas *A* e *B*

	Variáveis endógenas	
	A	*B*
Rotas	Todas	Somente termoquímica, porém, com exceção das rotas de 6.b-14.b, 15.6ab-15.14ab e 16.

Quanto ao grau de economia de escala dinâmica, IEA (2008) estimou para 10% ao ano um fator de aprendizado para combustíveis FT e para etanol lignocelulósico. Para gaseificadores de biomassa com vistas à geração de energia elétrica foi estimado um fator de aprendizagem de 5% ao ano.

No tópico "1.1.1 – fontes de economia de escala", foram citadas duas fases, com base em ENOS (1958), do processo de redução de custos ao longo do tempo. Na primeira, que consiste na introdução de um novo processo, a redução de custo se dá de forma mais acentuada já que a tecnologia está ou em fase de laboratório, ou planta piloto ou em sua primeira unidade comercial. Portanto, estes ganhos ocorrem respectivamente através de redução de custo com aumento de escala (principalmente para tecnologias com a variável endógena *A*), com busca por fatores de produção mais eficientes ou com ganhos na engenharia de processos.

Na segunda fase, que é referente às tecnologias com alguma maturidade, as reduções de custo se devem a um aperfeiçoamento de um processo já consolidado, fazendo com que as taxas de aprendizado sejam menores.

Todas as rotas apresentadas no capítulo 3 se enquadram na primeira fase definida por ENOS (1958)[173]. Por isso, a alocação das variáveis endógenas *C* e *D* às rotas sintetizadas no tópico 3.5 segue o perfil mostrado na tabela 29:

TABELA 29 - Rotas com variáveis endógenas *C* e *D*

	Variáveis endógenas	
	C	*D*
Rotas	Todas	Perfil mais indicado às tecnologias maduras, já consolidadas. Não é o caso das rotas avaliadas no trabalho.

4.3.2 – Grau de economia de escopo e flexibilidade: "Vertente Escopo"

Segundo foi afirmado no tópico "1.2.1 – fontes de economia de escopo", são duas as principais fontes geradoras de economia de escopo consideradas neste trabalho: existência de fatores comuns e reserva de capacidade. A primeira está mais relacionada à questão da redução nos custos fixos e a segunda às indivisibilidades tecnológicas, logicamente, à economia de escala.

No item 3.5 as rotas são estruturadas de forma que é possível visualizar a existência destes dois elementos entre as rotas[174]. Por isso, pode-se afirmar que todas estas, com

[173] Evidente que umas se encontram em estágios mais avançados do que outras. Neste caso, para delimitá-los, é necessário um estudo mais aprofundado através da estimação da curvas de aprendizado tipo as expostas em DUTRA (2007) e ENOS (1958). Porém, deve-se frisar que todas enquadram-se na primeira fase.

exceção da de número 6[175], que visa gaseificação de biomassa para a produção unicamente de energia elétrica, apresentam algum grau de economia de escopo. Assim, como as classificações *E* e *F* dizem respeito, respectivamente, à plantas com alto ou baixo (ou nulo) grau de economia de escopo, consideram-se plantas que produzem 3 ou mais produtos como enquadradas em *E* e as que produzem no máximo 2 como *F*.

TABELA 30 – Rotas com variáveis endógenas *E* e *F*

	Variáveis endógenas	
	E	*F*
Rotas	2, 3, 4, 5, 8ab[176], 9ab, 10ab, 12ab, 15.8ab, 15.9ab, 15.10ab, 15.12ab e 16	1.1, 1.2, 6ab, 7ab, 11ab, 13ab, 14ab, 15.6ab, 15.7ab, 15.11ab, 15.13ab, 15.14ab e 17

Sistemas com elevado grau de flexibilidade devem ser reconhecidos quando estes conseguem alterar o tipo de produto a ser produzido em um curto espaço de tempo. O que foi asseverado no tópico "1.3 - flexibilidade", é que a detecção do grau de flexibilidade pode ser realizada por meio da arquitetura do sistema. Portanto, a definição desta variável para as rotas selecionadas está no capítulo 3.

Basicamente pode-se afirmar que a maioria das rotas "gaseificação" podem não realizar a etapa de hidrogenação de CO e passar a produzir energia elétrica[177]. Contudo, um grau maior de flexibilidade pode ser alcançado, por exemplo, na rota 9, que objetiva a produção de combustíveis de aviação. Neste caso, se for decidido alterar os produtos

---

[174] Este fato também seria observado caso as rotas que consideradas fossem do tipo: "hidrólise", MixAlco", "Gaseificação" e "Pirólise". Sem as subdivisões do item 3.5 o grau de economia de escopo tenderia a aumentar. Contudo, o objetivo é avaliar as rotas considerando da matéria-prima ao produto final. Apesar de se assumir que existem fatores comuns dentro dos "grupos", deve-se afirmar que uma alteração no tipo de produtos produzidos resume-se em custos e na maioria das vezes, uma impossibilidade de se realizá-la no curto prazo.

[175] Neste caso, valem 6a e 6b, assim como 15.6a e 15.6b, cujo grau de economia de escopo é mais elevado

[176] Como esta rota (gaseificação/syngas/FT – combustíveis de aviação) é um FT – diesel com mais uma etapa de upgrading, deve ser considerada *E*.

[177] Com exceção da 6, que objetiva produção somente de energia elétrica.

produzidos pode-se deixar de realizar a segunda etapa de *upgrading* e produtos tipo diesel e ou ceras já estarão disponíveis. O mesmo se observa na rota 5, 15 e 16.

Em todas é possível deixar de produzir os produtos finais de maior valor agregado, para ofertar algum localizado em uma etapa anterior na cadeia produtiva. Na rota 5 pode-se passar a produzir alcoóis e na 15 e 16 o bio-óleo com certa facilidade. Ademais, as rotas 8, 11 e 14 também podem elevar sua produção de energia elétrica caso direcionem respectivamente o diesel, CH_4 e DME produzidos para um gerador de energia elétrica. O mesmo ocorre para a 17 (produção de bio-óleo), porém, para todas estas seria preciso ter o moto-gerador na planta.

A inflexibilidade também pode ser citada na rota 10, por exemplo, que visa produtos FT na faixa da gasolina e olefinas e deseja passar a obter mais produtos na faixa do diesel e ceras, correspondente à rota 8, como mostrado no capítulo 3. Para isso será necessário alterar o catalisador e a temperatura utilizada no reator (no caso, reduzi-la). O uso de outros catalisadores também é necessário, como se verifica no capítulo 3, para produção de outros produtos. Especificamente na rota 1.1 e 1.2, não há como deixar de produzir um produto para passar a produzir outro (respectivamente, etanol e energia elétrica e butanol e energia elétrica). Tais fatos reduzem o grau de flexibilidade nestas rotas, fazendo com que estas sejam classificadas como *H*.

TABELA 31 – Rotas com variáveis endógenas *G* e *H*

	Variáveis endógenas	
	G	*H*
Rotas	5, 7ab-14ab, 15.6ab-15.14ab e 16	1.1, 1.2, 2, 3, 4, 6ab e 17

5.3.3 – Diferenciação e Diversificação: varáveis relacionadas à competição

Como mostrado no item sobre diferenciação no capítulo 1, esta ocorre quando um produtor consegue ofertar seus produtos a um preço superior ao ofertado pelo mercado. Para isso, é preciso que o consumidor identifique uma diferença entre os dois produtos.

Como asseverado no capitulo 1 se considera neste trabalho que a diferença seja ou por natureza de qualidade do produto ou por melhor localização da planta. Em suma, pode-se dizer que a diferenciação se dá entre produtos não homogêneos alocados no mesmo mercado, porém, em nichos de mercado diferentes.

Através de uma análise baseada na qualidade dos produtos, identificam-se nas rotas apresentadas no item 3.5 algumas com potencial alto de ofertar produtos diferenciados. Este pode ser destacado nas rotas que possuem o *syngas* como plataforma. Exceto a rota 6, que visa produzir energia elétrica e 7, produção de hidrogênio, todas as demais ofertam produtos de qualidade superior a de seus concorrentes no mercado[178]. São derivados sintéticos, sem impurezas e com alto desempenho.

A rota 1.2, 2 e 4 representam também um potencial elevado, já que HMF, furfural e álcoois superiores são produtos de valor energético superior ao etanol. O maior poder calorífico e a menor polaridade de álcoois superiores em relação ao etanol permite que este seja misturado à gasolina e utilizado em motores convencionais. Portanto, uma utilização destes em carros flex pode significar uma entrada destes combustíveis no mercado de álcool e gasolina. Uma analogia pode ser aplicada para a rota 14 (produção de DME via gaseificação) e diesel.

Para finalizar, as rotas que têm o bio-óleo como plataforma também poderiam ser enquadradas. Quando este produto é destinado para mercados que o demandam especificamente para geração de energia elétrica através de moto-geradores (competindo com o com diesel) ele é ofertado a preços menores do que o outro por uma questão de qualidade. Como pode ser observado na tabela 24, sua qualidade é inferior. Assim, qualquer uma das rotas que agregam maior valor ao bio-óleo, podem ser consideradas com elevado potencial de diferenciação de produto. As não incluídas podem ser classificadas como *J*.

[178] Energia elétrica poderia ser diferenciada apenas no caso de ser valorada como prêmio a sua origem em fonte renovável de energia.

Tabela 32 - Rotas com variáveis endógenas *I* e *J*

	Variáveis endógenas	
	I	*J*
Rotas	1.2, 2, 4, 8ab-14ab, 15.8ab-15.14ab e 16	1.1, 3, 5, 6ab, 7ab, 15.6ab, 15.7ab e 17

Com relação às direções do processo de diversificação no item "diversificação" do capitulo 1, foi especificado que duas plantas quando pertencentes à mesma base tecnológica possuem uma fronteira muito próxima entre suas atividades produtivas. A base tecnológica envolve basicamente os processos industriais, conhecimentos sobre a matéria-prima utilizada, sobre pessoal especializado, mão-de-obra, ou seja, o processo de produção como um todo. É um conceito estritamente tecnológico.

Como afirmado no item supracitado, ao se considerar a indústria sucroalcooleira ou a indústria do refino de petróleo como prováveis progenitores da indústria de bio-refinaria, entende-se que o processo de diversificação se dará por meio da mesma base tecnológica, caracterizando-se como um processo de integração vertical ou horizontal, ou não se dará por meio desta, caracterizando-se como uma diversificação concêntrica. Descartou-se, portanto, diversificação em conglomerado[179].

Assim, ao tomar cada uma das regiões selecionadas e suas respectivas rotas tecnológicas indicadas, espera-se diagnosticar que rotas possuem uma base tecnológica mais similar. Esta se traduz por uma fronteira mais próxima entre as atividades antigas, referentes ou à indústria do refino ou à sucroalcooleira e novas, que diz respeito às rotas de bio-refinaria compatíveis com a região selecionada.

Na tabela 33 é sumarizada a relação entre as bases tecnológicas da "indústria nascente" e da "indústria progenitora", isto é, das rotas de bio-refinaria analisadas frente à indústria do refino de petróleo (representada como R) e da indústria sucroalcooleira (representada como S), quanto ao processo industrial e conhecimento sobre a matéria-prima. O "R", portanto, representa quando a indústria do refino de petróleo pertence à

[179] Quando não há nenhuma relação entre as atividades (nem tecnológica, nem mercadológica e nem gerenciais, por exemplo). Não é o caso das industrias em questão.

mesma base tecnológica da rota (variável endógena *K*), quanto ao processo industrial e quanto ao conhecimento sobre a matéria-prima. O mesmo vale para o "S", que se refere à indústria sucroalcooleira.

Quando pelo menos um "R" (para o refino de petróleo) ou um "S" (para setor sucroalcooleiro) estiver presente em uma das lacunas da rota, independente de ser processo industrial ou conhecimento sobre matéria-prima, pode-se afirmar que esta desfruta da mesma base tecnológica da rota de bio-refinaria. O fato de um estar presente nas duas lacunas enquanto outro estiver somente em uma, indica que o primeiro possui mais similaridade na base tecnológica[180]. Quando a indústria não está presente em nenhuma lacuna, indica que este processo de diversificação seria do tipo diversificação concêntrica, isto é, com base tecnológica diferente (variável endógena *L*).

O uso de "s" (em letra minúscula) serve para indicar que em rotas de co-gaseificação (seja biomassa ou bio-óleo) a presença de outros insumos tipo coque de petróleo ou carvão, por exemplo, reduz a similaridade entre as bases tecnológicas da indústria sucroalcooleira e a rota avaliada. Tal fato se deve em razão à menor proporção de biomassa frente ao coque de petróleo ou carvão, como carga.

As razões para que uma determinada rota seja considerada de mesma base tecnológica de "R" e ou de "S" estão no capítulo 1, 3 e APÊNDICE III, porém, serão sintetizadas a seguir.

[180] O esforço empregado pelo segundo no processo de diversificação seria, em tese, maior do que o empregado pelo primeiro.

TABELA 33 – Similaridades entre as bases tecnológicas das rotas de bio-refinaria e, das indústrias do refino de petróleo (representada como R) e da sucroalcooleira (representada como S), quanto ao processo industrial e conhecimento sobre a matéria-prima

	BASE TECNOLÓGICA			
	Quanto ao processo industrial		Quanto ao conhecimento sobre a matéria-prima	
ROTAS	a	b	a	b
1.1 e 1.2	S		S	
2	R e S		S	
3	R e S		S	
4	R e S		S	
5	R e S		S	
6	R e S	R e s	S	R e s
7 – 14	R	R	S	R e s
15.6	R	R	S	R e s
15.7 – 15.14	R	R	S	R e s
16	R		S	
17	R		S	

As duas primeiras rotas, 1.1 e 1.2, se baseiam em hidrólise do material lignocelulósico e fermentação de açúcares (pentoses e hexoses), como se observa na figura 20 do capítulo 3. Por isso, não apresentam nenhuma similaridade com a indústria do refino de petróleo com relação aos processos industriais empregados. O mesmo não se pode afirmar da indústria sucroalcooleira, que se baseia em processos de fermentação de glicose (hexose), como mostra o APÊNDICE III, para conseguir produzir etanol. Por isso foi indicada que ambas as rotas possuem a base tecnológica similar a S.

Quanto às rotas 2, 3, 4 e 5, estas foram classificadas no capítulo 3 como pertencentes à plataforma bioquímica, contudo, como afirmado no mesmo capítulo, possuem um caráter também termoquímico, o que as poderia caracterizar como rotas hibridas. Pode-se citar a rota 2, onde após processos de hidrólise é iniciado um processo de

desidratação de pentoses e hexoses através de adição de calor para obtenção de furfural e HMF (para obter DMF após).

Nas demais, pode ser verificado na figura 22 do capítulo 3 que as rotas 4 e 3 possuem unidades de hidrogenação e esterificação/ hidrogenólise, características da indústria de refino, para obtenção respectivamente de alcoóis superiores e etanol. Na rota 5 com uma etapa de oligomerização, também inseridas em plantas da indústria de refino petróleo, podem ser obtidos gasolina, diesel e ou combustíveis de aviação. Ademais, pela demanda de hidrogênio da rota MixAlco, deve existir uma unidade de produção através de "gaseificação" de resíduos sólidos e metano obtidos como resíduos na etapa de fermentação. Esta a caracteriza como uma rota bioquímica e a assemelha a usinas de produção de etanol[181]. Por isso a definição de bases tecnológicas similares a R e S.

Para a rota 6, de gaseificação com vistas à produção de energia elétrica, foi dada classificação R e S porque compreende-se que a etapa de gaseificação, como observa-se no capítulo 3, através do uso de reatores em altas temperaturas e de catalisadores químicos, possui características no processo industrial similar à industria do petróleo. Porém, pelo fato da indústria sucroalcooleira ser uma ofertante de energia elétrica, como demonstrado no APÊNDICE III, através da queima ineficiente de bagaço em caldeiras (em grande parte em baixa e média pressão), observa-se uma possibilidade de aumento de rendimento do processo de geração de energia elétrica via gaseificação. Por isso a classificação R e S.

Com relação às rotas 7ab-14ab, 15.6ab, 15.7ab-15.14ab, 16 e 17, entende-se com base em suas descrições executadas no capítulo 3 e na descrição do processo produtivo convencional de açúcar e álcool no APENDICE III, que não há semelhança entre estas e a indústria sucroalcooleira com relação aos processos industriais empregados.

O contrário foi verificado para indústria do refino de petróleo com base na mesma argumentação feita sobre a rota 6. Com relação à gaseificação, tal fato pode ser potencializado quando se leva em consideração, como pode ser verificado em ULLER et al (2008) e SCHAEFFER e SZKLO (2006), uma tendência de aumento na demanda por hidrogênio causada por uma elevação na complexidade de parques de refino,

[181] Apesar do tipo de fermentação, incluindo microorganismos e ambiente utilizado, ser distinto.

provocada pelo consumo cada vez maior de petróleos de pior qualidade e aumento das especificações nos mercados. Para finalizar, na rota 16, a semelhança entre as bases tecnológicas desta com a indústria do refino de petróleo é evidente, pois o bio-óleo passa a ser considerado um produto similar a um gasóleo, ou seja, ele usufrui de unidades de processamento convencionais em refinarias. Um exemplo é o processo HBIO, mostrado na figura 30 do capítulo 3. Por isso as classificações R em todas.

Quanto à semelhança nas bases tecnológicas com relação ao conhecimento sobre a matéria-prima, consideram-se similar as bases das rotas de bio-refinaria a partir de bagaço com a indústria sucroalcooleira pelo fato de esta última já produzir e consumir o bagaço atualmente (APENDICE III).

Este, portanto, é o maior desafio de indústrias de refino de petróleo caso queiram investir em novas plantas de bio-refinaria. O fato é que, como mostrado no APÊNDICE III, são poucas as usinas que comercializam o bagaço, o qual é excedido em proporções entre 5-10%, inibindo o acesso a grandes quantidades (variável exógena I) quando a planta não é integrada verticalmente com a usina. Como citado por TIROLE (1988), no capítulo 1, para insumos comercializados em mercados que se distanciam de concorrência perfeita, a integração vertical para trás se torna uma solução de menor risco para a planta adquirir a matéria-prima. Neste caso, para grupos econômicos oriundos da indústria de refino de petróleo, que queiram investir em bio-refinarias em larga escala, talvez a melhor opção seja adquirir usinas de açúcar e álcool para ter segurança no fornecimento de bagaço. Tal fato os classificaria como de base tecnológica similar com relação ao conhecimento da matéria-prima.

Uma alternativa para a dificuldade de obtenção do bagaço são as zonas de densificação, citadas por PELAEZ-SAMANIEGO (2008) e ROCHA et al (2009). Através destas, seria mais viável uma planta não integrada verticalmente com uma usina ter acesso a grandes quantidades de matéria-prima. Estes são os casos das rotas 15ab (com todas as variações), 16 e 17.

Pode-se dizer, portanto, que a indústria sucroalcooleira compartilha de base tecnológica semelhante a todas as bases das rotas de bio-refinaria citadas no trabalho. Em algumas rotas essa semelhança é maior, como nas de plataforma bioquímica, em especial 1.1 e 1.2, e, em outras é menor, como nas rotas 6b-15b. O inverso, que é verificado na tabela

33, acontece com a indústria do refino de petróleo. Esta, por sinal, é a única que apresentaria um processo de diversificação do tipo diversificação concêntrica, quando não há uma base tecnológica similar entre a atividade "antiga" e a "nova". Este caso se verifica nas rotas 1.1 e 1.2.

4.4 – Etapa 5: seleção de rotas mais indicadas para operar nas regiões hipotéticas selecionadas

Esta etapa se inicia com a junção das informações obtidas na Tabela 28 (rotas com variáveis endógenas *A* e *B*), 29 (rotas com variáveis endógenas *C* e *D*), 30 (rotas com variáveis endógenas *E* e *F*) e 31 (rotas com variáveis endógenas *G* e *H*) com as fornecidas na tabela 26 (combinação de variáveis endógenas compatíveis com as variáveis exógenas das regiões). O resultado desta junção está exposto na tabela 34. São as rotas compatíveis com as variáveis exógenas das regiões selecionadas.

TABELA 34 – Rotas compatíveis com a combinação de variáveis exógenas das regiões selecionadas

variáveis exógenas (regiões hipotéticas)		*Rotas compatíveis*
COLUNA=j	**COMPOSIÇÃO**	
1	I+III+V	**Todas**
2	II+III+V	**6a-14a e 17**
4	II+IV+V	**6a-14a e 17**
5	I+III+VI	**Todas menos 2, 3 e 4**
6	II+III+VI	**6a-14a e 17**
8	II+IV+VI	**6a-14a e 17**

Na coluna 1, como se pode verificar na tabela 26, não existe nenhuma restrição, logo, esta apresenta todo tipo de rota proposto no trabalho. Contudo, nas demais colunas há a presença de restrições. Para 2 e 4, há impossibilidade do uso de plantas com perfil *A*,

que operam em larga escala, por isso é restringido o escopo de rotas compatíveis para 6a-14a e 17, de característica *B*, para plantas modulares.

No caso da coluna 5, a restrição ocorre pelo impedimento de se trabalhar com plantas que possuam grau elevado de economia de escopo (classificação *E*) e que sejam inflexíveis (classificação *H*). Para finalizar, as colunas 6 e 8 tiveram suas restrições provocadas tanto pela impossibilidade de operarem com plantas tipo *A* (como nas colunas 2 e 4) quanto por trabalharem com plantas com elevado grau de economia de escopo e inflexíveis (como na coluna 5). Todavia, como o conjunto das rotas que respondem à primeira restrição está contido no conjunto das rotas que respondem à segunda, vale o primeiro.

Com isso, tem-se o conjunto de rotas tecnológicas (descritas no item 3.5) compatíveis com cada uma das regiões hipotéticas selecionadas. Falta, portanto, identificar o escopo de rotas mais adequadas e ideais para operar em cada uma destas regiões. Para a primeira, é necessária a introdução das variáveis relacionadas à competição, no caso, diferenciação (classificação *I* e *J*) e diversificação (classificação *K* e *L*), contudo, também é relevante, sobretudo para encontrar o escopo de rotas ideais, o conhecimento de informações sobre o mercado consumidor mais especificas do que as encontradas na tabela 27. Porém, utilizando-se de regiões hipotéticas, caso deste trabalho, torna-se impossível atingir tal resultado. Neste caso, não tem como identificar o conjunto de produtos demandado, muito menos seu montante, o que inviabiliza uma aplicação mais apurada do modelo proposto no capítulo 2.

Ao realizar uma aplicação das variáveis relacionadas à diferenciação, tem-se a tabela 35, resultado da escolha de rotas cujo grau de diferenciação é mais elevado. Segundo a teoria exposta no capítulo 1 e 2, estas oferecem vantagens frente as demais por possuírem maior capacidade de elevar seus preços, atingindo um nicho diferente do mesmo mercado.

Todavia, em determinados mercados consumidores onde a quantidade demandada é baixa, os caracterizando como de porte restrito ou limitado (classificação IV), pode ser que estes não absorvam produtos com elevado grau de diferenciação. O mesmo vale para mercados não diversificados (classificação VI). Assim, não é correto afirmar ser mais interessante inserir um produto no mercado somente por ser mais diferenciado se

este não é demandado pelo mesmo. Com isso na tabela 35, as colunas 4, 5, 6 e 8 permaneceram similares às da tabela 34.

TABELA 35 – Rotas adequadas com a combinação de variáveis exógenas das regiões selecionadas

variáveis exógenas (regiões hipotéticas)		*Rotas adequadas*
COLUNA=j	**COMPOSIÇÃO**	
1	I+III+V	**1.2, 2, 4, 8ab-14ab, 15.8ab-15.14ab e 16**
2	II+III+V	**8a-14a**
4	II+IV+V	**6a-14a e 17**
5	I+III+VI	**Todas menos 2, 3 e 4**
6	II+III+VI	**6a-14a e 17**
8	II+IV+VI	**6a-14a e 17**

Quanto ao quesito diversificação[182], informações referentes ao mercado consumidor tornam-se ainda mais necessárias para que seja inferido algum resultado. Isso ocorre porque a carência de algum determinado produto nos mercados em que a localidade possui acesso permite não apenas realizar a seleção de algum tipo de rota como, naturalmente, qual das indústrias, sucroalcooleira ou do refino de petróleo, estas possuem mais similaridades em termos de base tecnológica. Tal procedimento foi expresso na tabela 33.

Contudo, é importante o conhecimento não somente do tipo de produto a ser produzido como do tipo de acesso à matéria-prima. Em uma localização, por exemplo, em que há o acesso a grandes quantidades de matéria-prima por meio do excedente de bagaço de usinas em um raio de 100 km[183], a integração vertical com uma usina não passa a ser

[182] Na realidade, "direções do processo de diversificação".
[183] E que haja um mercado que não dificulte a obtenção deste insumo.

quesito primordial para que haja sucesso no empreendimento[184]. Isso facilitaria investimentos oriundos de empresas pertencentes à indústria de petróleo.

O contrário é observado quando a localização permite um acesso a grandes quantidades de insumo, porém, este bagaço gerado como resíduo é destinado em sua maioria para as usinas existentes. Neste caso, uma integração vertical se tornaria necessária para o sucesso do empreendimento, criando maiores condições para que a direção do processo de diversificação seja mais bem sucedida quando tiver origem na indústria sucroalcooleira. Como explicitado no capítulo 1, 2 e exposto na tabela 33, trata-se de uma questão de similaridades entre bases tecnológicas.

[184] Ou quando o excedente, que está disponível em um raio de 100 km da planta, não é suficiente para uma aplicação em larga escala, porém, há a produção no entorno de grandes quantidades de coque de petróleo e ou carvão, viabilizando rotas do tipo "b", de co-gaseificação em larga escala.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou estabelecer um escopo de rotas tecnológicas de bio-refinarias com base em bagaço de cana-de-açúcar. Com isso, no item 3.5 foram selecionadas 26 rotas tecnológicas diferentes, que, derivam basicamente das ramificações Hidrólise, MixAlco, Gaseificação/ Syngas e Pirólise/ bio-óleo.

Assim, como mostrado na introdução, objetivou-se propor um modelo de localização e competição destas plantas de bio-refinaria, inseridas nas rotas propostas no item 3.5, identificando as mais interessantes para operar em distintas regiões hipotéticas. Conseguiu-se, portanto, detectar compatibilidades existentes entre as rotas e as regiões selecionadas. Todavia, em virtude de não terem sido trabalhadas regiões reais, uma aplicação mais refinada do modelo não pode ser efetivada.

Neste caso, o menor escopo de rotas para cada uma das regiões hipotéticas trabalhadas é encontrado na tabela 35, que, basicamente pode ser traduzida como:

Região hipotética da coluna 1 (classificação I, III e V): Hidrólise/Fermentação/ alcoóis superiores; Hidrólise/Desidratação/ furfural e HMF; MixAlco/Etanol; MixAlco/Alcoóis Superiores; Gaseificação/*Syngas*/FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético; Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME; Pirólise/Bio-óleo/Gaseificação/*Syngas*/FT – Ceras e Diesel; FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético; Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME; Pirólise/Bio-óleo/Desoxigenação/Diesel;

Região hipotética da coluna 2 (classificação II, III e V): Gaseificação/*Syngas*/FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético, Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME;

Região hipotética da coluna 4 (classificação II, IV e V): Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica, Hidrogênio, FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas

e Gasolina, CH_4 sintético, Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME; Pirólise/Bio-óleo;

Região hipotética da coluna 5 (classificação I, III e VI): Hidrólise/Fermentação/ etanol; Hidrólise/Fermentação/alcoóis superiores; Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica, Hidrogênio, FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético, Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME;; Pirólise/Bio-óleo/Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica; Hidrogênio; FT – Ceras e Diesel; FT – Combustíveis de Aviação; FT – Olefinas e Gasolina; CH_4 sintético; Etanol e Alcoóis superiores; Metanol; DME; Pirólise/Bio-óleo/Desoxigenação/Diesel; Pirólise/Bio-óleo;

Região hipotética da coluna 6 (classificação II, III e VI): Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica, Hidrogênio, FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético, Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME; Pirólise/Bio-óleo;

Região hipotética da coluna 8 (classificação II, IV e VI): Gaseificação/*Syngas*/Energia Elétrica, Hidrogênio, FT – Ceras e Diesel, FT - Combustível de Aviação, FT – Olefinas e Gasolina, CH_4 sintético, Etanol e Alcoóis superiores, Metanol, DME; Pirólise/Bio-óleo;

Assim, para que este escopo seja reduzido é relevante uma aplicação para localizações reais, onde informações sobre características do mercado consumidor e no tipo de acesso à matéria-prima complementam a análise. Neste caso, resta para futuros trabalhos aplicar a mesma metodologia, porém, para todo território nacional. Pode-se descobrir com isso qual distribuição mais próxima da realidade, das 8 colunas distinguidas em todo o país. Existe grande possibilidade das regiões do tipo a da coluna 1 e 2, em especial a primeira, sejam as mais encontradas.

Isso ocorre porque em grande parte das regiões do país existe o acesso a mercados consumidores que demandam em larga escala, como explicitado no item 4.2, pelo menos QAV e gasolina de aviação, o que caracterizaria esta região como III. Da mesma forma, pode-se afirmar que todo grande centro consumidor deva ser classificado como V, isto é, que seja demandante de grande parte do escopo de produtos obtidos através das rotas selecionadas no item 3.5. Nesta etapa, poder-se-ia utilizar SIG (Sistema de Informação Geográfica) como ferramenta de identificação do território.

Com isso, poderia ser detectado o conjunto de rotas tecnológicas de bio-refinarias, a partir do modelo construído no capítulo 2, mais indicado para operar em cada região do território mapeado[185]. Após, mensurar os custos financeiros das rotas identificadas e compará-los com de tecnologias dominantes (rotas oriundas de petróleo convencional[186] ou etanol convencional, obtido pelo processo exposto no APÊNDICE III). O resultado poderia ser um estudo completo referente não só à questão da localização como da competitividade destas rotas frente às rotas convencionais.

A partir disso, uma construção de um cenário referencia onde se busca determinar um cenário de longo prazo (aproximadamente 20 anos) com base nos custos financeiros encontrados na etapa anterior, porém, estimando-lhes funções de redução de custo através de ganhos tecnológicos ao longo do tempo seria uma forma de tentar entender a dinâmica dos custos destas rotas, logo, sua competitividade, considerando que a cesta de petróleo consumida hoje permaneça para o período analisado assim como, não se leve em consideração a custos relativos à emissão de gases de efeito estufa.

Em seguida, seria interessante incluir à modelagem do cenário referencia um cenário com uma cesta de petróleo de pior qualidade, ou seja, assumindo o crescimento da

---

[185] Seria interessante adicionar a estas rotas um conjunto de rotas não trabalhado nesta Dissertação, como por exemplo, rotas de caráter híbrido, tipo, fermentação de *syngas* ou do bio-óleo. Outra rota razoável de se incluir seria a liquefação, por exemplo.

[186] Uma definição para petróleo não convencional pode ser encontrada em LAHÈRRERE (2001), que o descreve como todo óleo oriundo de reservatórios de características incomuns, recuperação avançada (recuperação terciária), óleos extra-pesados (mais pesados que a água), areias betuminosas (definidas segundo sua viscosidade, acima de 10.000cP), metano de minas de carvão, aqüíferos geopressurizados, hidratos de metano e xisto betuminoso. Segundo o mesmo, para muitos autores, também é considerado o óleo oriundo de águas profundas (200m a 1000m, variando conforme o autor), de águas ultra-profundas (acima de 2000m) e do Ártico.

participação relativa de petróleos não convencionais[187] na cesta de petróleos produzida e consumida no país. E por último, poderia ser adicionado um cenário de longo prazo (aproximadamente 20 anos) onde as empresas devessem assumir custos com emissão de gases causadores do efeito estufa.

Deve-se salientar que é possível que tenha que ser mensurado uma taxa de redução de custos ao longo do tempo menor para bio-refinarias no "cenário referência" e, maior para o de "mudanças climáticas". Isso pode ocorrer porque um ambiente mais favorável pode permitir um maior número de bio-refinarias instaladas, o que, deve influenciar positivamente na taxa de aprendizado, como se pode ver no item "1.1.1 – fontes de economia de escala".

Espera-se com isso testar a hipótese: "bio-refinarias no Brasil serão competitivas com derivados de petróleo, ainda mais se considerando petróleo não convencional e custos advindos de mudança climática".

Naturalmente, caso a competitividade seja detectada no cenário referencia, ela será também nos demais. O que vale destacar é que o tempo necessário para que uma rota tecnológica atinja patamares competitivos provavelmente varie entre os cenários destacados. Caso no último cenário alguma rota se mostre não competitiva em todo período analisado, em nenhum dos demais cenários esta poderá ser. Isso precisa ser testado. Eis uma sugestão para futuros trabalhos.

[187] Para o conceito de hoje, desconsiderando o fato que algum petróleo não convencional hoje possa ser considerado convencional amanhã.

REFERÊNCIAS

AHN, S., KIM, S., JUNG, K. and HAHM, H., 2008, "Effect of pressure on direct synthesis of DME from syngas over metal pillared ilerites and metal/metal-pillared ilerites" ***Korean Journal Chemical Engineering*****,** v. 25, n. 3, pp. 466-470.

ANP, 2009, Anuário estatístico, disponível em: www.anp.gov.br, acessado em: 15 de novembro de 2009.

ANUARIO DA CANA, 2009, "Guia Brasileiro de Açúcar e do Etanol", **Procana**. Impresso.

BAILEY, E.E., FRIEDLÄNDER, A.F, 1982, "Market structure and multiproduct industries", ***The Journal of Economic Literature***, v. 20 n.3, pp.1024-48.

BALAT, M., BALAT, H., and ÖZ, C., 2008, "Progress in Bioethanol Processing", ***Progress in Energy and Combustion Science***, v. 34, pp. 551-573.

BALAT, M., BALAT, H., 2009, "Recent Trends in Global Production and Utilization of Bio-ethanol Fuel", Applied Energy, v.86, pp. 2273-2282.

BALAT, M., BALAT, M., KIRTAY, E. and BALAT, H., 2009a, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems", ***Energy Conversion and Management***, v. 50, pp. 3147-3157.

BALAT, M., BALAT, M., KIRTAY, E. and BALAT, H., 2009b, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems", ***Energy Conversion and Management***, v. 50, pp. 3158-3168.

BAUER, G., HOFBAUER, H., 2008, "Fisher Tropsch via synthesis gas from biomass gasification", **World Renewable Energy Congress** (WRECX).

BIRUEL JUNIOR, J., 2008, **Análise Comparativa das Tecnologias Embarcadas de Aproveitamento de Gás natural**. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético – PPE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BRIDGWATER, T., 2007, **Pyrolysis of biomass. IEA bioenergy: task 34**. Birmingham, UK: Bioenergy Research Group, Aston University.

CARLTON, D. e W, PERLOFF, J. M., 2000, **Modern Industrial Organization**, 3hd Ed Nova York: Addison-Wesley.

CASTELO BRANCO, D. A., 2008, **Análise Técnica e Econômica da Aplicação da Tecnologia GTL de Pequena Escala para Monetização do Gás Natural Associado Remoto Offshore no Brasil**. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético – PPE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CGEE/ NIPE-UNICAMP, 2005, **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 1**. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos.

CGEE/ NIPE-UNICAMP, 2007, **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2**. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos.

COMPACTGTL, 2009, disponível em: <http://www.compactgtl.com/ourprocess.php> Acesso em: 04 de maio de 2009.

DOE, 2001, **Coproduction of power, fuels and chemicals—CCT program. Topical Report Number 21**.

DUTRA, R. M., 2007, **Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a Primeira Fase do PROINFA**. Tese de Dsc., Programa de Planejamento Energético – PPE/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de janeiro, RJ, Brasil.

ELY, R. N., 2007, **Uma Análise da Indústria Sucroalcooleira no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Ciências Econômicas. Instituto de Economia/ IE, Universidade Federal do Rio de janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ELY, R. N., 2008, "Um Estudo sobre a Geração de Energia Elétrica da Ilha de Fernando de Noronha, Brasil: É Viável o Aumento da Proporção das Fontes Alternativas em seu Sistema?". In: **XII Congresso Brasileiro de Energia**, v. 1, pp. 439-452, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Novembro.

ENOS, J. L., 1958, "A Measure of the Rate of Technological Progress in the Petroleum Refining Industry", **The Journal of Industrial Economics**, pp. 180-197.

EPRI, 2005, "Evaluation of Alternative IGCC Plant Designs for High Availability and Near Zero Emissions: RAM Analysis and Impact of SCR," **EPRI (Electric Power Research Institute)**, Palo Alto, CA, 2005, 1010461

FERRARI BORBA, R., "Carvão mineral", Balanço Mineral Brasiliero 2001, Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministry of Mines and Energy, Brasilia (2002),www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/BalancoMineral2001/carvao.pdf.

FERGUSON, C. E., 2003, **Microeconomia**, 20ª ed. Rio de janeiro: Forense Universitaria.

GAITHER, N. e FRAZIER, G., 2001, **Administração da Produção e Operações**, 8ª Ed., São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

GARY, J. H., HANDWERK, G. E., 1975, **Petroleum Refining: Technology and Economics**, 1th ed., New York: Marcel Dekker Inc.

GARY, J. H., HANDWERK, G. E., 2001, **Petroleum Refining: Technology and Economics**, 4th ed., New York: Marcel Dekker Inc.

GÜRÜ, M., KARAKAYA, U., ALTIPARMAK, D., ALICILAR, A., 2002, "Improvement of diesel fuel properties by using additives". ***Energy Conversion and Management***, v. 43, pp. 1021–1025.

HALDI, J. e WHITCOMB, D., 1967, "Economies of Scale in industrial Plants", ***Journal of Political Economy***, pp. 373-385.

HAMELINCK, C. N., VAN HOOIJDONK, G., FAAIJ, A. P. C., 2003, **Prospects for Ethanol from Lignocellusosic Biomass: techno-economic performance as**

development progresses. Universiteit Utrecht: Copernicus Institute, Science Technology Society.

HAMELINCK, C. N., VAN HOOIJDONK, G. and FAAIJ, A. PC., 2005, "Ethanol from Lignocellulosic Biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term", ***Biomass and Bioenergy***, v. 28, pp. 384-410.

HE, J. and ZHANG, W., 2008, "Personal Review: Research on ethanol syntesis from syngas" ***Journal of Zhejiang University***, v. 9, n. 5, pp. 714-719.

HIGMAN, C., DELLAVILLA, S., STEELE, B., 2006, "The Reliability of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Power Generation Units", **Achema 2006**, May 2006

HOPPER, C., 2009, Modular Syncrude Conversion Drives Oilfield GTL Solution for Associated Gas, Disponível em: http://www.compactgtl.com/ourprocess.php, Acesso em: 06 de maio de 2009.

HORTA NOGUEIRA, L. A.; SEABRA, J. E. A.; Best, G.; Leal, M.R.L.V.; Poppe, M.K. (2008), Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1. ed. Rio de Janeiro: BNDES, v. 1. 316 p.

HU, J., WANG, Y., CAO, C., ELLIOTT, D. C., STEVENS, D. J and WHITE, J. F., 2005, "Conversion of Biomass Syngas to DME Using a Microchannel Reactor", ***Industrial & Engineering Chemistry Research***, v. 44, n. 6, pp. 1722-1727.

IAEA, 2006. "Brazil: A Country Profile on Sustainable Energy Development" ***International Atomic Energy Agency***, Vienna, 2006

IBENHOLT, K., 2002, "Explaining learning curves for wind power". ***Energy Policy***, v. 30, pp. 1181–1189.

IEA, 2008, **Deployment costs of Research Energy Security, ETP**. Pp. 202 – 220

JORDAN, R. A., MESA-PÉREZ, J. M.,ROCHA, J. D., CORTEZ, L. A. B., 2009, ***Roadmap*** **tecnológico da termoconversão de biomassa para a tecnologia BTL (*Biomass To Liquid*)**, Workshop sobre Roadmaps Tecnológicos, Projeto PPP Etanol FAPESP, Unicamp, Campinas-SP, 11 de setembro de 2009.

KAISER, M. J., GARY, J. H., 2007, "Study updates refinery investiment cost curves", ***Oil & Gas Journal***, pp. 84-92.

KAISER, M. J., GARY, J. H., HANDWERK, G. E., 2007, **Petroleum Refining: Technology and Economics**, 5th ed., New York: Marcel Dekker Inc.

KAMM, B., GRUBER, P. R., KAMM, M., KROMUS, S., 2006, "Biorefinery Systems – An Overview". In: Kamm, B., Gruber, P. R., Kamm, M. (eds), **Biorefineries – Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions**, v.1, chapter 1, Weinheim, Germany, WILEY-VCH Verlah GmbH & Co. KGaA.

KIRUBAKARAN, V., SIVARAMAKRISHNAN, V., NALINI, R., SEKAR, T., PREMALATHA, M and SUBRAMANIAN, P., 2009, "A review on gasification of biomass", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 13, pp. 179-186.

KUPFER, D., HASENCLEVER, L., 2002, **Economia Industrial: Fundamentos Teóricos e Práticas no Brasil**, 2ª ed., Rio de Janeiro: Campus.

LAPUERTA, M., HERNÁNDEZ, J. J., AMPARO PAZO, J. L., 2008, "Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions", ***Fuel Processing Technology***, v. 89, pp. 828-837.

LARSON, E. (1998), Small-Scale Gasification-Based Biomass Power Generation, Prepared for: Biomass Workshop, Changchun, Jilin Province, China, 12-13 January. Disponível em: http://www.princeton.edu/pei/energy/publications/texts/Small_scale_-gasification.pdf, Acessado em 15 de setembro de 2009.

LARSON, E. (2007), "Gasification-Based Production of Electriciy and/or Liquid Transportation Fuel", Prepared for: **Instituto de Tecnologia Promon (ITP)**. Apresentação.

LEE, Seung-Ho, MO, Yong-Gi, LEE, Kyunghae, JANG, Eunmee, YAN, Yun Bin, CHO, Wonihl and JU, Woo-Sung, 2006, "Direct DME synthesis from syngas over Cu/ZnO based catalysts prepared from various methods: promoters and co-precipitation" **23rd World Gas Conference**, Amsterdam.

LORA, E. E. S., VENTURINI, O. J., 2009, Termoquímica para Biocombustíveis: Disponível:http://xiiimet.cpatu.embrapa.br/arquivos/Termoquimica%20para%20Biocombustiveis%20-%20P1.pdf, Acessado em: 04 de outubro de 2009.

LYND, L. R., ELANDER, R. T., WYMAN, C. E., 1996, "Likely features and costs of mature biomass ethanol technology." **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 57/58, pp. 741-761.

MANIATIS, K. (2001), Progress in Biomass Gasification: An Overview. Disponível em:http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/bioenergy/2001_km_tyrol_tony.pdf, Acessado em 14 de outubro de 2009.

MARANO, J., CIFERNO, J., 2001, Life-cycle greenhouse-gas emissions inventory for Fischer–Tropsch fuels. Technical report prepared for US Department of Energy National Energy Technology Laboratory. June.

MARQUES, P.V. (Coord.) (2009) **Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 194 p. Relatório apresentado a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA.

NPC (National Petroleum Council, 2004, Observations on petroleum product supply. Washington: NPC Press.

NSF, 2008,. **Breaking the Chemical and Engineering Barriers to Lignocellulosic Biofuels: Next Generation Hydrocarbon Biorefineries**, Ed.George W. Huber, University of Massachusetts Amherst, National Science Foundation. Chemical, Bioengineering, Environmental, and Transport Systems Division, Washington D.C. 180 p.

PALOMBO, F., 2008, "Novas Tecnologias de Refino para a Produção de Combustíveis", **Simpósio Internacional de Combustíveis, Biocombustíveis e Emissões**, 15 de maio de 2008.

PELAÉZ-SAMANIEGO, M. R., GARCIA-PEREZ, M., CORTEZ, L. B., ROSILLO-CALLE, F. and MESA, J., 2008, "Improvements of Brazilian carbonization industry as

part of the creation of a global biomass economy", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 12, pp. 1063-1086.

PEREIRA JUNIOR, N. — Second Generation Biofuels: Trends & Challenges – Seminário: Inovação e Sustentabilidade na indústria Química, promovido pela Associação Brasileira de Indústria química (ABEQ). Rio de Janeiro, RJ, Junho de 2009. Apresentação. Disponível em http://www.abeq.org.br/palestras/tema2/junior.pdf

PETROBRAS DISTRIBUIDORA, 2009, Disponível em: www.br.com.br, Acessado em: 01 de julho de 2009.

PINDYCK, R. S., RUBINFELD, D. L., 2002, **Microeconomia**, 5ª ed. São Paulo: Prentice Hall.

PIRES DE LIMA, E. N., 2009, **Perspectivas de Reestruturação das Indústrias da Química e da Energia: A via metanol**. Tese de Dsc. (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química – EQ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PRAHALAD, C. K., HAMEL, G., 1990, **The core competence of the corporation**, Harvard Business Review.

PRINS, M. J., PTASINSKI, K. J. and JANSSEN, F. J. J. G., 2007, "From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency", ***Energy***, v. 32, pp. 1248-1259.

ROBINSON, A., BAXTER, L., JUNKER, H., SHADDIX, C., FREEMAN, M., JAMES, R., DAYTON, D., 1998, "Fireside issues associated with coal-biomass cofiring", **Presented at Bioenergy`98**, October 4-8, Madison, WI, USA.

ROCHA, J. D., MESA PÉREZ, J. M. e CORTEZ, L. A. B. (2004), Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa. Curso "Energia da Indústria do Açúcar e do Álcool", Unifei, Itajubá, 12-16 de julho. Disponível em: http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/novidades/curso_cyted/files/pdf/Tema%202%20%20Processos%20e%20Tecnologias%20para%20a%20Conversao%20do%20Bagaco%20em%20Energia%20e%20Combustiveis/Pirolise.pdf. Acessado em 10 de outubro de 2009.

ROCHA, J. D., 2008a, **Carvoejamento, Carbonização e Pirólise. I Seminário Madeira Energética**, MADEN 2008, ABC, Rio de Janeiro, 2 e 3 de setembro. Apresentação. Disponível em: http://maden2008.inee.org.br/programa.html

ROCHA, J. D., 2008b, **Combustíveis Sintéticos. I Seminário Madeira Energética**, MADEN 2008, ABC, Rio de Janeiro, 2 e 3 de setembro. Apresentação. Disponível em: http://maden2008.inee.org.br/programa.html

SAMMONS JR., N. E., YUAN, W., EDEN, M. R., AKSOY, B., CULLINAN, H. T., 2008, "Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling", **Chemical Engineering Research and Design**.

SAXENA, R. C., ADHIKARI, D. K., GOYAL, H. B., 2009, "Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, pp. 167-178.

SCHAEFFER et al., 2007, ***Matriz Energética Minas Gerais (2007-2030)***, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE /PPE.

SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, A. F. P., SOUSA, R. R., BORBA, B. S. M. C., COSTA, I. V. L., PEREIRA JR, A., CUNHA, S. H. F., 2008, **Climate Change: Energy Security, Final Report**.

SIMONSEN, M. H., 1985, **Teoria Microeconômica**, 7ª ed., Rio de janeiro: Fundação Getúlio Vargas.

SIMON, C. P., BLUME, L., 2004, **Matemática para Economistas**, 1ª ed. Porto Alegre: Bookman.

SZKLO, A. S., 2005, **Fundamentos do Refino de Petróleo**, 1ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência.

SZKLO, A. S., ULLER, V. C., 2008, **Fundamentos do Refino de Petróleo: Tecnologia e Economia**, 2ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência.

SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R., 2006, "Alternative energy sources or integrated alternative energy systems? Oil as a modern lance of Peleus for the energy transition", ***Energy***, UK, v. 31, n. 14, p. 2177-2186.

SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R., 2007, “Fuel specification, energy consumption and CO_2 emission in oil refineries”, ***Energy***, v. 32, n. 7, pp. 1075-1092.

SLACK, N., CHAMBERS, S. e JOHNSTON, R., 2008, **Administração da Produção**, 2ª ed. São Paulo: Atlas S.A.

TALAYSUM, A. T., HASSAN, M. Z., GOLDHAR, J. D., 1986, "Scale versus Scope Considerations in the CIM/FMS Factory". In: A.Kusiak (Ed.), **Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies**, pp.45-56.

TAYLOR, G., 2008, “Biofuels and the biorefinery concept”, **Energy Policy**, v. 36, pp. 4406-4409.

TERRABON, 2009, Disponível em: http://www.terrabon.com/index.html, Acessado em: 09 de novembro de 2009.

TIROLE, J., 1988, **The Theory of Industrial Organization**, 1st Ed. Cambridge, MA: MIT Press.

TONKOVICH, A. L., MAZANEC, T., JAROSCH, K., FITZGERALD, S., YANG, B., TAHA, R., KILANOWSKI, D., LEROU, J., MCDANIEL, J., DRITZ, T., 2008, Improved Fischer-Tropisch Economics Enabled by Microchannel Technology, Disponível em: http://www.velocys.com/market/synthetic.php , Acessado em: 06 de maio de 2009.

UNICA, 2009, Disponível em: http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/, Acessado em: 18 de agosto de 2009.

VALERO, A. and USÓN, S., 2006, “Oxy-co-gasification of coal and biomass in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant”, ***Energy***, v. 31, pp. 1643-1655.

VARIAN, H. R., 1992, **Microeconomic Analysis**, 3rd Ed. New York: W. W. Norton & Compay.

VELOCYS, 2009, Disponível em: http://www.velocys.com/market/synthetic.php, Acessado em: 04 de maio de 2009.

VOSLOO A.C., 2001, “Fischer–Tropsch: a futuristic view”, ***Fuel Processing Technology,*** v. 71, pp. 149 –155.

YAMAN, S., 2004, “Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks”, ***Energy Conversion and Management***, v. 45, pp. 651-671.

YERGIN, D, 1993, **O Petróleo: Uma História de Ganância, Dinheiro e Poder**, 1 ed., São Paulo, SP, Scritta.

ZHENG L, and FURINSKY E., 2005, “Comparison of shell, Texaco, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations” ***Energy Conversion and Management***, v. 46, pp. 1767–79.

APÊNDICE I

Para definir economia de escala é preciso delimitar o período de tempo da análise. Objetivamente pode-se resumir o curto prazo como o período de tempo em que pelo menos um insumo do processo produtivo permanece fixo. Ao contrário, no longo prazo, todos os insumos variam, ou não existem fatores de produção fixos.

Por exemplo, considerando-se uma função de produção homogênea[188], com dois insumos, tem-se uma representação do curto prazo no item 29, enquanto o item 30 representa o longo prazo.

29) $Q = f(K\square, L)$ ou $Q = f(K, L\square)$

30) $Q = f(K, L)$

Sendo Q = quantidade produzida, K = capital e L = trabalho

Assim, na primeira equação de 29, o fator determinante de a função ser de curto prazo é o capital ser fixo. Na segunda, isto se deve ao trabalho. Com isso, observa-se que a escala de tempo não determina nem curto nem longo prazo. O determinante está na existência ou não de fatores fixos na função de produção.

Ademais, no longo prazo, em conseqüência de todos os fatores serem variáveis, todos os custos também o são. Já no curto prazo, os custos totais são representados por custos

[188] Dado um escalar k diz-se que uma função $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ é homogênea de grau k se, $f(tx_1, tx_2, ..., tx_n) = t^k f(x_1, x_2, ..., x_n)$ para quaisquer $x_1, ..., x_n$ e $t > 0$. Assim, a soma de monômios de grau k caracteriza-se por uma função homogênea de grau k e uma função constituída de diversos monômios em que pelo menos um par deles possui grau distinto, não pode ser homogênea. É necessário que todos os monômios possuam graus idênticos. Para maior detalhe, inclusive das propriedades que envolvem estas funções, ver SIMON e BLUME (2004) ou VARIAN (1992).

fixos somados aos custos variáveis. Seguindo a mesma idéia da representação anterior, têm-se no item 31 os custos no curto prazo e, no item 32, os de longo. Neste caso, a homogeneidade também se aplica às funções de custo.

31) $CT = CF + CV$

32) $CT = CV$

Sendo CT = custos totais, CF = custos fixos e CV = custos variáveis

Onde,

33) $CV = \varphi(q)$

Sendo q = quantidade produzida

A seguir são apresentados os conceitos de produtividade marginal e média de um fator. O primeiro, item 34, representa o quanto é acrescido, reduzido ou mantido da oferta de um bem final, devido a um aumento da quantidade de um dos insumos. O segundo, item 35, diz respeito a quanto a quantidade empregada do fator representa na quantidade produzida do bem final.

34) $PMgL = \partial Q/\partial L$; $PMgK = \partial Q/\partial K$

Sendo PMg = produtividade marginal

35) PmeL = Q/L; PmeK = Q/K

Sendo Pme = produtividade média

Seguido ao conceito de produtividade é apresentado respectivamente os conceitos de custo marginal e custo médio, abrangendo as noções de curto e longo prazo. A idéia que fundamenta o custo marginal é de quanto variará o custo final em conseqüência de uma variação de um dos insumos. Já os custos médios são o custo total da produção dividido pela quantidade produzida. É o custo de cada unidade produzida.

36) $CMg = \partial CT/\partial q = \partial CV/\partial q = \partial \varphi(q)/\partial q$

Sendo CMg = cuto marginal

37) CFme = CF/q e CVme = CV/q = φ(q)/q

Sendo CFme = custo fixo médio e CVme = custo variável médio

38) CmeCP = CF/q + CV/q

Sendo CmeCP = custo médio de curto prazo

39) CmeLP = CT/q = CV/q = φ(q)/q

Sendo CmeLP = custo médio de longo prazo

Tomada essas definições, se pode inserir o conceito de rendimentos, onde, se caracterizam três tipos. São eles: rendimentos de um fator, rendimentos de escala e rendimentos de origem pecuniária[189].

O primeiro ocorre no curto prazo, quando, ao manter pelo menos um fator fixo, analisa-se como se comporta a função de produção tendo um acréscimo cada vez maior do fator variável. Estima-se que a função de produção apresente rendimentos crescentes e decrescentes do fator variável. Estes rendimentos estão relacionados com o conceito de produtividade marginal e média de um fator.

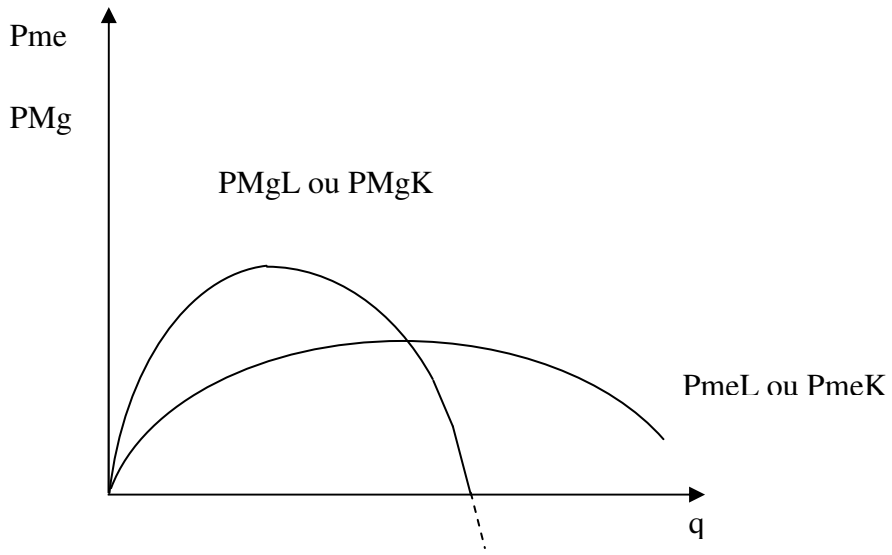


Figura 31 – Variação do PMg e PMe frente a quantidade produzida

[189] Redução no preço pago pelo insumo. Não tem relevância nesse estudo. Teoricamente pode ser entendido como economia de escala do fornecedor. Ver Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002).

Rendimentos crescentes de um fator se traduzem por uma produtividade marginal do fator variável crescente até seu ponto de máximo, onde ela decresce e atinge o ponto de máximo da curva de produto médio. Portanto, esta é sempre crescente para rendimentos crescentes de um fator, ao contrário de rendimentos decrescentes, onde, possuem um produto médio declinante, assim como o marginal que, segundo PINDYCK e RUBINFELD (2002), não necessariamente se torna negativo, o que sinalizaria um decaimento da produção[190].

Concluindo, um rendimento crescente de um fator pode ser entendido como quando um acréscimo em quantidade do insumo variável, tendo pelo menos um insumo fixo, provoca um aumento em maior proporção do produto. Segundo SIMONSEN (1985), esse fenômeno possui pouca relevância do ponto de vista prático. Um Produto marginal positivo de um fator variável implicaria em um produto marginal negativo do fixo[191].

De acordo com FERGUSON (2003), um nível considerável aceitável para a firma operar no curto prazo está entre o ponto máximo da função de produto médio do fator variável até o nível em que seu produto marginal é zero. Parte disso pode ser observado em Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002), quando exprimem uma relação inversa entre produtividade média de um fator e o custo variável médio:

40) $CVme = wL/q$

Sendo w = remuneração do trabalho e L o fator variável

[190] Muitos autores argumentam que não existe PMg negativo. A existência deste fere o princípio da monotonicidade, onde com um aumento da quantidade de pelo menos um dos insumos deve ser possível produzir pelo menos a mesma quantidade produzida anteriormente. Fere a hipótese da racionalidade, pois uma firma operando com um fator de produtividade negativa não estaria sendo racional, conseqüentemente, não se trataria de uma função de produção, a qual representa a melhor combinação dos insumos dada uma determinada quantidade de produto final (isoquantas são curvas de nível). Como um ajuste, SIMONSEN (1985) nomeia estas de quase-função de produção.

[191] Em FERGUSON (2003) é demonstrado graficamente a simetria existente entre fatores fixos e variáveis com relação à produtividade marginal e média destes.

Com isso:

41) CVme = w/PmeL

Ou seja, em uma situação de produtividade média do trabalho declinante o custo variável médio é crescente, e, portanto é caracterizado o quadro de rendimentos decrescentes do fator trabalho. Os mesmos autores demonstram que essa relação persiste no que diz respeito a custos e produtos marginais.

42) CMg = w/PMg

Com isso, rendimentos decrescentes de um fator acontecem quando uma elevação no insumo acarreta uma elevação menor no produto, para o caso da produtividade marginal e média declinante e uma redução na quantidade ofertada para produto marginal negativo.

Essa é a idéia que a "Lei dos rendimentos decrescentes" está sustentada. Isto é, com um fator variando, tendo pelo menos outro constante, inevitavelmente rendimentos decrescentes surgirão. Como analisado em VARIAN (1992), os rendimentos decrescentes podem ser entendidos como o surgimento de alguma restrição tecnológica dos retornos constantes de escala.

Isso possui o mesmo significado quando se compreende que tudo se realiza em ambiente de escassez, isto é, em um mundo limitado. Fazendo com que toda função de produção possa ser entendida hipoteticamente como homogênea de grau um, acarretando o que será visto logo a seguir como rendimentos constantes de escala. Porém, a impossibilidade de variar todos os insumos acaba por provocar rendimentos decrescentes.

Finalmente, saindo da esfera do curto e entrando no longo prazo, onde todos os insumos variam, inicia-se a compreensão dos rendimentos de escala e em seguida, das economias e deseconomias de escala.

APÊNDICE II

Voltando ao uso de funções contínuas e diferenciáveis, para facilitar o entendimento é recorrido ao uso de gráfico[192] de custo médio e marginal de longo prazo.

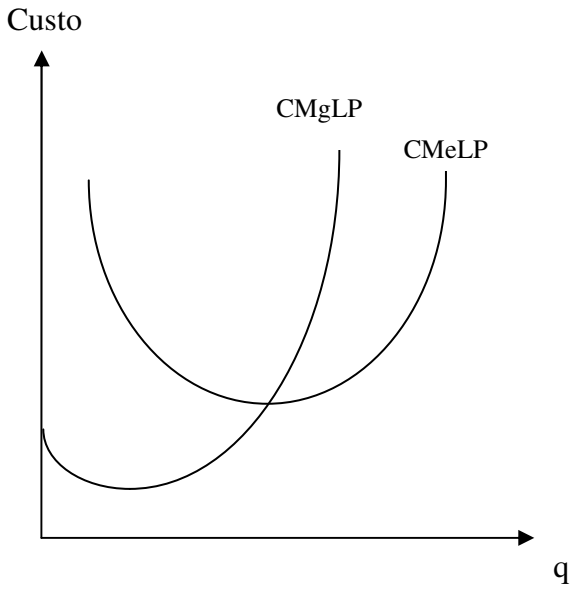


FIGURA 32 – Esboço das curvas de CMe e CMg de longo prazo

Assim, conhecendo as funções de custo da firma, calculando-se o custo marginal e o custo médio de longo prazo, consegue-se auferir se esta possui economias ou deseconomias de escala. No caso, se o custo marginal for inferior ao custo médio de longo prazo, esta possui economia de escala. Caso o custo médio seja inferior, há deseconomias de escala. Se o custo marginal e o custo médio de longo prazo foram iguais, ela está operando em escala mínima eficiente.

CMg < CmeLP → indica economia de escala

[192] Destaca-se que este é apenas um esboço de uma curva de custo médio de longo prazo. Para uma discussão mais aprofundada sobre o formato da mesma ver Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002).

CMg > CmeLP → indica deseconomia de escala

CMg = CmeLP → se os fatores de produção variarem em proporções fixas pode ser considerado rendimento constante de escala. Caso contrário não.

Outra forma de identificar economia de escala é por meio de um índice baseado na elasticidade-custo. Formalmente tem-se:

$$\varepsilon_c = (\Delta C/C)/(\Delta Q/Q)$$

O que se traduz em[193]:

$$\varepsilon_c = (\Delta C/C)/(\Delta Q/Q) = (\Delta C/C) \times (Q/\Delta Q) = CMg/CmeLP$$

Para estabelecer o índice:

$$IEE = 1 - \varepsilon_c$$

Com isso, quando IEE é igual a zero não existem economias de escala. Quando é maior do que zero há economias de escala e quando é menor existem deseconomias de escala.

Similarmente, através da construção de uma fração, com base na inequação 11, também pode ser calculado um índice para economia de escopo (IEEsc).

---

[193] É baseado no mesmo princípio de se estabelecer comparação entre custo marginal e custo médio de longo prazo das curvas apresentadas anteriormente. Ver também, VARIAN (1992), PINDYCK e RUBINFELD (2002) e Lootty e Szapiro in KUPFER e HASENCLEVER (2002).

Nesta fração, coloca-se o primeiro termo da inequação, o qual representa uma planta que produz um conjunto de produtos finais, no denominador e o segundo termo, que representa a produção destes produtos só que em plantas separadas, no numerador. Este pode ser verificado na equação 43.

43)

$$\text{IEEsc} = \frac{\sum_{i=1}^{m} C_i\,(q_i)}{C(q_1, \ldots, q_m)} > 1 = economia\ de\ \text{escopo}$$

Analogamente quando o IEEsc é igual a 1 (um), é indiferente em termos de custo produzir todos os produtos na mesma planta ou em plantas separadas. Da mesma forma, quando este é menor do que 1 (um), a soma dos custos de produzi-los em plantas separadas é inferior da de produzi-los todos na mesma planta, ocasionando uma deseconomia de escopo. Acrescenta-se que este índice nunca será menor do que zero, já que não faz sentido levar em consideração a existência de custos negativos

APÊNDICE III

Este apêndice tem como objetivo descrever a produção de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil e mensurar sua quantidade em território nacional. Para isso é preciso fazer uma descrição sucinta, objetiva do processo produtivo de cana-de-açúcar e dos produtos finais oriundos dessa matéria-prima. Neste caso, esta descrição abrange as atividades agrícolas e as industriais do setor sucroalcooleiro tendo como maior foco as etapas responsáveis pela produção do resíduo tido como foco no trabalho e, principalmente neste apêndice: o bagaço. As etapas posteriores não deixarão de ser citadas, porém, não é necessário haver maior detalhamento de suas atividades. O foco, portanto, está na produção do bagaço de cana-de-açúcar.

Atualmente este é um subproduto do processo de produção de açúcares e alcoóis nas usinas. Tal subproduto ganha maior relevância quando há um maior interesse em investimentos na produção de energia elétrica assim como no avanço de tecnologias de conversão deste insumo em outros produtos finais, o que, cada vez mais ao longo do tempo faz com que este ultrapasse a condição de subproduto e ganhe status de produto final, penetrando, portanto, no ambiente das bio-refinarias. Neste caso, não só é preciso defini-la como mensurar a quantidade de bagaço produzido e disponível nas diferentes regiões do Brasil.

Como demonstrado no item 2.1, determinar a quantidade e localização da matéria-prima existente é de suma importância na compreensão da questão da localização e competição das plantas industriais. Portanto, esta atividade representa um dos pilares de sustentação da análise de competição e localização das rotas tecnológicas de bio-refinaria expostas no capítulo 3. Assim, compreender os fatores responsáveis pela produção da matéria-prima básica das plantas industriais analisadas é um passo necessário, da mesma forma que, entender o funcionamento destas plantas também o é.

A seguir, portanto, serão expostas de forma objetiva, as etapas existentes na cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira. Estas etapas iniciam-se na agricultura e terminam na indústria.

III.1 – Produção de cana-de-açúcar: parte agrícola

A cadeia produtiva neste setor tem seu início no campo, na produção da cana-de-açúcar. Esta etapa é extremamente relevante, pois, quando bem sucedida eleva sua competitividade, reduzindo os custos da matéria-prima principal, a cana-de-açúcar e contribuindo, portanto para que se alcancem níveis competitivos de preços dos bens finais produzidos por estas empresas.

De acordo com MARQUES et al (2009), a cana-de-açúcar pode ser dividida em duas partes: aérea e subterrânea. Na parte aérea estão incluídas as pontas, as folhas secas e verdes, os colmos, inflorescências e frutos. Das quais, merece destaque os colmos, que são as partes principais da planta atualmente, sendo, portanto, o que mais é aproveitado nas usinas hoje. Já as folhas secas e verdes mais as pontas, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), formam a palha, a qual é gerada em aproximadamente 140 quilos (em matéria seca) por tonelada de cana-de-açúcar e, é queimada quando há a colheita manual e recolocada no solo, quando a colheita é mecânica[194].

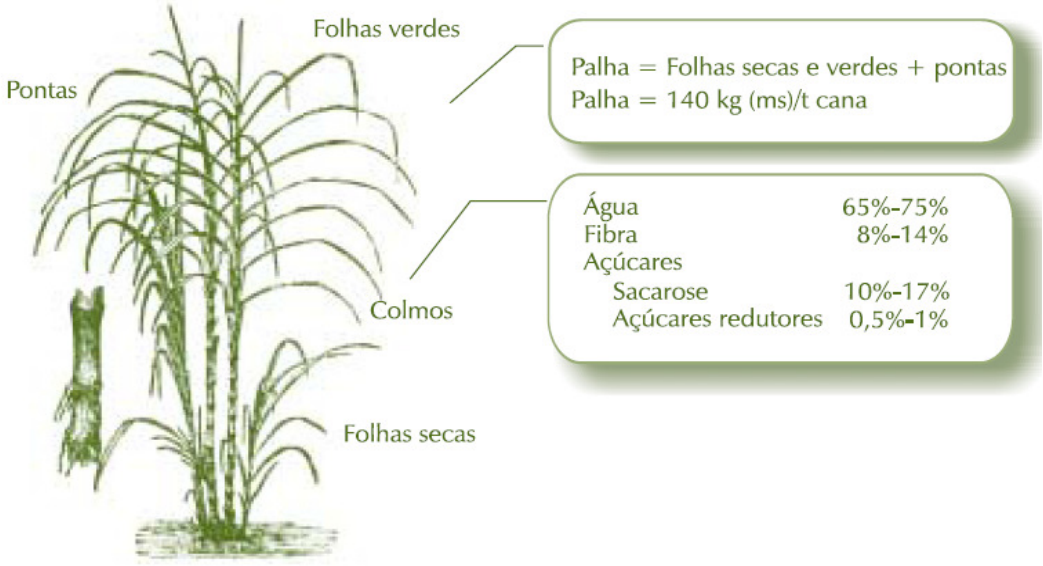


FIGURA 33 – Estrutura típica da biomassa da cana
Fonte: HORTA NOGUEIRA et al (2008)

[194] Em MARQUES et al (2009) é citado que algumas usinas hoje aproveitam essa palha como biomassa, junto ao bagaço, para serem queimadas nas caldeiras.

Quanto a parte subterrânea, esta é composta de raízes e rizomas, como mostrado em MARQUES et al (2009) e, é mantida no solo para a rebrota da planta[195] por um período de 4 a 6 ciclos, que corresponde em uma média de 5 anos de acordo com CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005). Estes ciclos variam com o tipo de manejo praticado e deve-se destacar que, ao longo dos mesmos há um processo de redução dos níveis de produtividade, fato sinalizado em HORTA NOGUEIRA et al (2008) e CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005).

Com isso, pode-se introduzir a figura 34, que representa uma síntese do processo de produção da cana-de-açúcar. Cada uma das etapas, divididas em preparo do solo, plantio, colheita e transporte, possui sua importância dentro de todo o processo, o qual precede a parte industrial.

Inicia-se, portanto a descrição do processo produtivo da cana-de-açúcar com o preparo do solo onde, de acordo com CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), o fato de sua escavação ser executada com uma maior profundidade do que normalmente é feito em outras culturas. Ademais, fora esta colocação, inexiste um padrão definido para esta etapa, pois, diversos fatores exercem influencia no tipo de preparo a ser realizado. Um exemplo é no uso de máquinas limitado pela maior declividade do terreno, fato este que afeta também a etapa da colheita, como será mostrado adiante.

[195] O que a caracteriza, portanto, segundo CGEE (2005), como uma cultura semi-perene.

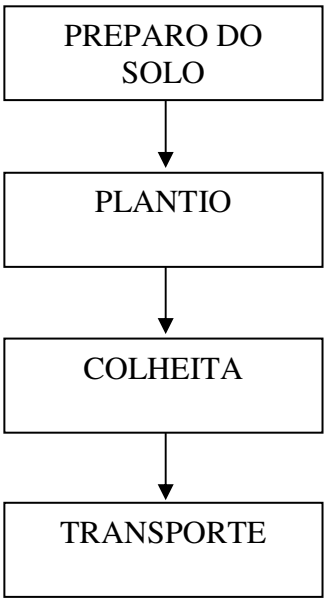


FIGURA 34 - Fluxograma de produção de cana-de-açúcar simplificado

Na etapa do plantio, a distinção existente entre as regiões centro-sul e nordeste no que diz respeito ao seu período de atividade. Segundo MARQUES et al (2009), na primeira região este é realizado geralmente entre os meses de janeiro a maio enquanto na segunda o normal é ocorrerem entre os meses de setembro e outubro. Deve-se destacar que a germinação deve ocorrer, de acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008), em período quente e úmido, fator que, justifica a irrigação obrigatória caso o plantio seja realizado no inverno, entre os meses de junho e agosto.

Outra diferença está relacionada com o fato da cana no nordeste, como explicitado em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), ser plantada logo após a última colheita, o último ciclo, e ter seu primeiro corte realizado um ano após. Já no centro-sul, após o último ciclo há um descanso da terra com a introdução de leguminosas, fato também citado em HORTA NOGUEIRA et al (2009)[196]. Destaca-se que na primeira a produtividade é menor e, a cana é denominada de cana de 12 meses enquanto na segunda, há maior produtividade, porém, há maior tempo entre o término e o início dos ciclos. A cana

[196] Após o plantio e germinação ocorrem as etapas de perfilhamento (formação de brotos) e crescimento vegetativo, as quais, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), possuem melhor produtividade (maior formação de açúcares) em clima frio e seco.

nesta região é chamada de cana de 18 meses. Ademais, segundo MARQUES et al (2009), com relação ao espaçamento físico no plantio, para que este seja econômico, não deve ultrapassar 10 toneladas de cana por hectare.

Em relação às etapas de colheita e transporte da cana-de-açúcar também é merecido o destaque quanto às distinções existentes entre as duas regiões produtoras. Segundo MARQUES et al (2009), na primeira, essa etapa é realizada no período referente aos meses de setembro a março, enquanto na segunda ocorre nos período entre os meses de maio a novembro. Como pode ser observado, há uma diferença temporal nas safras das duas regiões, porém, em ambos os casos o período dura em torno de sete meses.

Especificamente para a colheita, na região do centro-sul, como é mostrado em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), prevalece o sistema mecanizado, o qual gera a chamada cana picada, ao contrário do que é verificado na região norte-nordeste, onde prevalece a colheita manual, de cana inteira. Para o segundo, há a queima da palha anterior ao corte, o que provoca, além da emissão de gases de efeito estufa no ciclo produtivo, há a perda de biomassa que poderia ser reaproveitada, seja no solo, nas caldeiras ou em biorefinarias analisadas posteriormente[197].

A diferença regional neste aspecto pode ser atribuída a dois fatores. Um é a severidade das leis no estado em São Paulo, as quais estabelecem cronogramas mais rigorosos do que os estabelecidos pelas leis nacionais[198]. O outro é referente à declividade do terreno, a qual, para o caso da colheita mecanizada, sabe-se que esta deve ser inferior a 12°, condição pouco verificada na região produtora do norte-nordeste, segundo MARQUES et al (2009).

Quanto ao transporte da cana após a colheita, também existem as opções mecanizado e manual, ocorrendo, portanto, três tipos de sistemas integrados, "colheita-transporte", diferentes, como foi explanado em MARQUES et al (2009). São estes: manual, semi-mecanizado e mecanizado. O primeiro configura-se como colheita e transporte manuais,

[197] Nos dois primeiros casos, ao contrário do terceiro, como já afirmados, possuem aplicação comercial e, portanto são bastante praticados no país.

[198] Todavia, de acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008), é esperado que até 2020, toda a cana brasileira seja colhida mecanicamente, e, portanto, não haja uma perda de biomassa caracterizada com a queima da palha, fato ocorrente quando a colheita é feita de forma manual.

sendo este realizado por tração animal[199], e, existente na região produtora do norte-nordeste. No segundo, há a colheita manual e o carregamento mecanizado. Naturalmente, no terceiro ambos são mecanizados.

Como foi estabelecido em HORTA NOGUEIRA et al (2008), geralmente o transporte é feito por caminhões. Estes, segundo MARQUES et al (2009), são "abertos", quando especializados no carregamento de cana inteira e "fechados", para o caso da cana picada. Da mesma forma, dadas as condições distintas supracitadas referentes às regiões produtoras, quanto ao transporte do produto, distinguem-se também as quantidades de carregamento nesta atividade.

Em MARQUES et al (2009) é mostrado que, para as regiões do centro-sul o montante varia de 25 a 60 toneladas, enquanto no norte-nordeste esta quantidade costuma estar entre 10 a 15 toneladas. Tal fato tem relação também com o contínuo aumento de escala verificado nas usinas dessa região[200]. Como mostrado em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), a distância média nesse transporte no centro-sul é de aproximadamente 20 km. Em MARQUES et al (2009) é salientado que o raio médio de transporte da cana até à indústria tem impacto direto nos custos, corroborando com o que foi expressado no início deste tópico sobre a importância da etapa agrícola para estabelecer níveis competitivos nessa indústria.

Tais níveis podem ser melhorados, de acordo com CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), com o desenvolvimento de algumas áreas relevantes. São estas: trato cultural da soqueira, melhoramento genético, mecanização, otimização de processos via melhores práticas de gerenciamento, controle de pragas, reciclagem de efluentes e busca de melhores práticas agrícolas, assim como o uso correto e o controle efetivo de suas aplicações.

De todas, merece um destaque a questão do melhoramento genético. Em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005) é frisada sua importância quando esta ao promover um aumento de variedade no campo, consegue uma redução do risco de proliferação de doenças, amenizando o impacto negativo que estas exercem nas plantações, conseqüentemente, a

[199] O transporte manual foi impedido devido à legislação trabalhista vigente.
[200] Em MARQUES et al (2009) é provado ganhos de economia de escala no campo, o que justifica o aumento na escala das plantações exposta em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005).

toda a cadeia produtiva. Contudo, outra característica relevante desta atividade deve ser destacada. É a capacidade que esta proporciona à indústria sucroalcooleira de adequar sua carga ao parque industrial vigente, logo, à cesta de bens finais que o produtor objetiva ofertar.

Pode-se fazer, portanto, uma analogia com a indústria do refino de petróleo, pois, existe nesta indústria uma necessidade de adequação ao tipo de petróleo que o refinador tem acesso, ou que lhe proporciona maiores margens de refino, como mostrado no item "1.3.1 – flexibilidade no refino de petróleo". Para isso é exigido que a planta eleve seu grau de complexidade, o que demanda um custo de investimento maior.

Com isso, a vantagem que o melhoramento genético da cana proporciona ao seu setor é a mesma que aconteceria se o refinador de petróleo pudesse adequar sua carga ao parque de refino que lhe fosse mais conveniente[201]. Certamente investimentos nesta atividade hipotética seriam responsáveis por inibir que esta indústria alcançasse os níveis de complexidade observados atualmente, os quais, como mostrado anteriormente, estão em constante elevação.

Portanto, espera-se não apenas ter feito uma breve explanação da etapa agrícola na cadeia produtiva desta indústria, mas também ter demonstrado a importância de seu papel para todo este segmento industrial. Expondo os elementos chaves constituintes desta parte da cadeia estima-se também ter revelado vantagens e desvantagens competitivas existentes assim como pontos em que existe potencial de ganho de produtividade.

Com isso, pra finalizar este tópico e introduzir ao próximo, pode-se citar mais um ponto relevante que diz respeito ao espaçamento temporal de ambas as atividades, a agrícola e a industrial neste setor e que demonstra o elevado grau de integração destas etapas. Segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), as primeiras devem ter início entre dois a três anos antes da segunda para, após a etapa da moagem, mostrada a seguir, a produção possa seguir com uma certa estabilidade por um período de três a quatro anos. Este fato expõe a importância da integração entre a indústria e o campo neste setor.

---

[201] Esta adequação pode ser feita através do blending de crus, porém, isso não torna o refinador livre de oscilações no preço de petróleo que possam afetar sua margem.

III.2 – Produção de açúcar, álcool e energia: parte industrial

Passada a etapa agrícola, entra-se na industrial, as quais possuem a missão de processar a cana-de-açúcar e transformá-la nos produtos que serão ofertados ao mercado consumidor. Para a indústria em foco, a sucroalcooleira, basicamente estes podem ser traduzidos em açúcares, alcoóis e energia elétrica. O que confirma como visto em ELY (2007), o grau elevado de diversificação destas plantas industriais.

Esta etapa inicia-se, como explicitado anteriormente, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), com a recepção da cana-de-açúcar através normalmente de caminhões. Estes, após a pesagem para auferir a quantidade do insumo[202], sofrem uma seleção aleatória com vistas à captação de amostras da cana-de-açúcar a ser adquirida. Tais amostras são extraídas através de sondas, as quais podem ser oblíquas ou horizontais e, segundo MARQUES et al (2009), buscam também aleatoriamente, três pontos do compartimento de carga do caminhão, para extrair as amostras. O objetivo é em seguida, aplicar-lhes testes de laboratório para detectar principalmente seus respectivos teores de ATR (açúcares totais recuperáveis) e auferir, portanto, a qualidade do produto a ser adquirido.

De acordo com CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), os dois diferentes tipos de corte, mecanizado ou manual, determinam como será executada a etapa seguinte, de lavagem. Estas podem ser a seco, com aplicações de jatos de ar na cana, ou molhada, de custo inferior, onde a limpeza é realizada com jatos de água. Na primeira opção o seu uso mais comum é para cana picada, oriunda de colheita mecanizada. Já com relação à segunda opção, sua indicação é de uso exclusivo para cana inteira, oriunda do corte manual. Isso acontece porque ao utilizar-se deste tipo de lavagem em cana picada de acordo com CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), há uma perda considerável de sacarose devido à sua maior superfície de contato, fato mostrado em MARQUES et al (2009).

Assim, é necessário salientar que é também uma prática comum nas usinas não limpar a cana picada. Isso ocorre apesar das impurezas como, terra, cinza, folhas e outros resíduos, segundo MARQUES et al (2009), não serem extraídas. É citado em CGEE/

[202] Como mostrado em MARQUES et al (2009), o processo de pesagem é feito antes e depois do descarregamento do produto.

NIPE-UNICAMP (2005) que estas, de natureza mineral e vegetal, afetam negativamente o processamento do insumo nas etapas posteriores. Porém, é sabido que, prefere-se não retirá-las a ter o seu teor de sacarose reduzido. Com isso a forma mais comum, mais tradicional de lavagem nas usinas é a limpeza com jatos de água, de aplicação exclusiva em cana inteira.

Após a limpeza, já na mesa alimentadora, a cana é direcionada por esteiras até outra unidade de preparo, onde, como mostrado em MARQUES et al (2009), sofrerá a ação de conjuntos de facas rotativas que têm o objetivo de picar a cana inteira e ou nivelar a camada de cana na esteira para uniformizar a alimentação do desfibrador[203], que segundo CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005) é um equipamento composto de um rotor com martelos oscilantes e uma placa desfibradora que aumenta a superfície de contato, rompe as células para a liberação na etapa seguinte, do caldo nelas contido, rico em açúcares. Com isso, entre 85 a 92% de suas células são rompidas possibilitando, junto com o espalhador[204], maior eficiência na extração de açúcares, aumento de densidade, alimentação e capacidade nas moendas.

Estas são formadas por um conjunto de ternos que costumam variar de 4 a 7 unidades segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008). Tais ternos, ou castelos, como mostrado em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), possuem dimensões distintas e são montados em série. Deve-se afirmar também que estes se constituem em geral de quatro rolos: de entrada, superior, de pressão e rolo de saída. Tais rolos friccionam a cana e realizam uma pressão mecânica nesta, separando o caldo do bagaço. Na figura 35 a seguir é mostrado este processo com um exemplo de moagem feita de seis ternos constituídos de três rolos.

[203] Segundo MARQUES et al (2009), existe uma etapa seguinte que consiste na aplicação de um eletroímã na cana, posta em uma esteira de borracha. Este é capaz de retirar qualquer material ferroso ou magnético que esteja presente nela e que, portanto, possa prejudicar os processos subseqüentes.
[204] Que tem objetivo de uniformizar a altura do colchão de cana que alimenta as moendas.

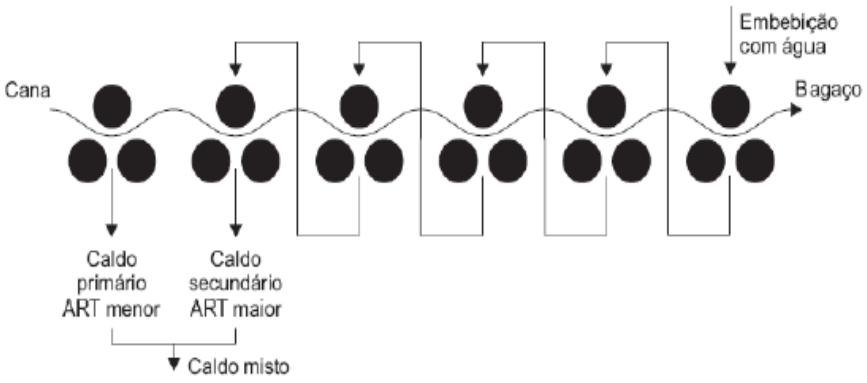


FIGURA 35 – Esquema de extração de caldo em moendas de 6 ternos
Fonte: MARQUES et al (2009)

Ademais, segundo CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005) após a passagem no primeiro terno, a dificuldade de extração do caldo torna-se cada vez mais elevada, o que, provoca a necessidade de adicionar o processo chamado de embebição, traduzido na inserção de água entre o último e o segundo terno. Por isso pode-se afirmar que esse processo provoca um aumento na capacidade de extração, esperando, segundo CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), uma eficiência de 94 a 97,5% na extração de açúcares. Este processo também pode ser observado na figura 35.

Já outra forma de produção do caldo, menos utilizada, é o difusor de cana, a qual pode alcançar como citado em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), índices de 98% de extração deste caldo rico em açúcares. Esta técnica é feita a partir da ruptura das células no preparo quando a cana é picada e desfibrada, onde, após, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), ocorrem sucessivas lavagens com água quente ocasionando a extração por lixiviação dos açúcares requeridos e em conseqüência, a separação do caldo e do bagaço.

O bagaço, portanto, pode ser compreendido como um subproduto, um resíduo no processo de produção de açúcar e álcool pela forma convencional. Como mostrado, sua etapa de formação começa no campo, na produção de cana-de-açúcar, e, termina na etapa de extração do caldo. Segundo CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005), este existe em quantidades de 240 a 280 Kg para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, e, sua unidade é constituída de 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos. Das

fibras, a composição de sua estrutura celular, que, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), possui 40 a 60% de fração celulósica, 20 a 40% de hemicelulósica e 10 a 25% de lignina[205].

Após, este é conduzido por uma esteira até as caldeiras a vapor, sendo seu excedente levado a um pátio de estocagem. Nas caldeiras, que geralmente são de média pressão (22 bar), como pode ser observado na tabela 36, este insumo é queimado e fornece toda a energia necessária para o processamento da cana, seja esta térmica, mecânica e ou elétrica, como pode ser observado em HORTA NOGUEIRA et al (2008).

TABELA 36 – Modelo básico atual que representa o esquema tecnológico das usinas no Brasil no tocante ao uso do bagaço de cana-de-açúcar

Pressão/Temperatura de operação	22 bar/300°C
Auto-suficiência em energia térmica e eletromecânica	Consumo de energia elétrica de 13 kWh/tc, um consumo de energia mecânica de 17 kWh/tc, e consumo de energia térmica de 330 kWhth/tc, equivalente a um vapor de processo de 500 kgv/tc, vapor saturado a 2,5 bar.
Sobra de bagaço	Em média da ordem de 5 a 10%
Uso da palha como energético	Não existe aplicação

Fonte: Elaboração própria baseada em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005)

Como pode ser observado na figura 36, com relação ao caldo produzido também na etapa de extração, este é direcionado a unidades de tratamento para retirar impurezas ainda presentes. Em seguida, há a etapa de filtração onde é produzido um resíduo que é aproveitado na parte agrícola como adubo: a torta de filtro. Após estas, o caldo tratado é

[205] Estes dados, referentes à composição da estrutura celular do bagaço (matéria seca) são aplicáveis à biomassa lignocelulósica de uma forma geral. Portanto, se aplicam também à palha. São extremamente relevantes para rotas tecnológicas de biorefinaria inseridas na plataforma bioquímica, dissecadas no próximo capítulo e, por isso, devem ser citados.

enviado ou para a fábrica de açúcar e ou para a fábrica álcool, dependendo dos contratos firmados pela usina e os preços desses produtos nos mercados consumidores demandantes. Como mostrado em HORTA NOGUEIRA et al (2008), a flexibilidade produtiva dessas plantas com relação à produção de açúcares e alcoóis é bastante elevada.

Na fábrica de açúcar, o caldo tratado passa por uma unidade de evaporação, cozimento, centrifugação, onde é produzido também o melaço e, em seguida, como última etapa significativa, a filtração. Após esta, este açúcar já pode ser comercializado ou sofrer outras modificações com vistas a gerar outros açúcares, pertencentes a mercados distintos ou similares, isto é, sinalizando movimentos de diversificação e ou diferenciação do produto final. Em MARQUES et al (2009) são citados como exemplos os açúcares invertido, refinado e líquido.

Na fábrica de álcool, o caldo tratado normalmente é misturado ao melaço, produzido na fábrica de açúcar, em sua etapa de centrifugação, dando origem ao mosto. Esta solução passa pelas dornas de fermentação onde na presença de leveduras, por um período de 8 a 12 horas, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), ocorre a fermentação. As leveduras retornam em grande parte para um novo processo, porém, é formado um excesso destes microorganismos que, segundo MARQUES et al (2009), são aproveitados na produção de um outro produto: a ração animal.

Em seqüência, como pode ser observado na figura 36, o principal produto resultante da fermentação, o vinho, é destilado e retificado, gerando o álcool hidratado. Este é o combustível utilizado nos carros 100% a álcool e que compete com a gasolina nos carros flex, sendo considerado, portanto, um bem substituto imperfeito[206] da mesma. Ademais, como subprodutos do processo, surgem também o vinhoto, alcoóis de segunda e óleo fúsel. Segundo HORTA NOGUEITA et al (2009), o primeiro existe em uma proporção de 10 a 13 litros por litro de álcool hidratado produzido e, seu uso atualmente é empregado na fertirrigação.

[206] Por apresentarem desempenhos distintos no veículo, em razão de suas diferentes propriedades físico-químicas, o álcool hidratado e a gasolina não podem ser considerados substitutos perfeitos.

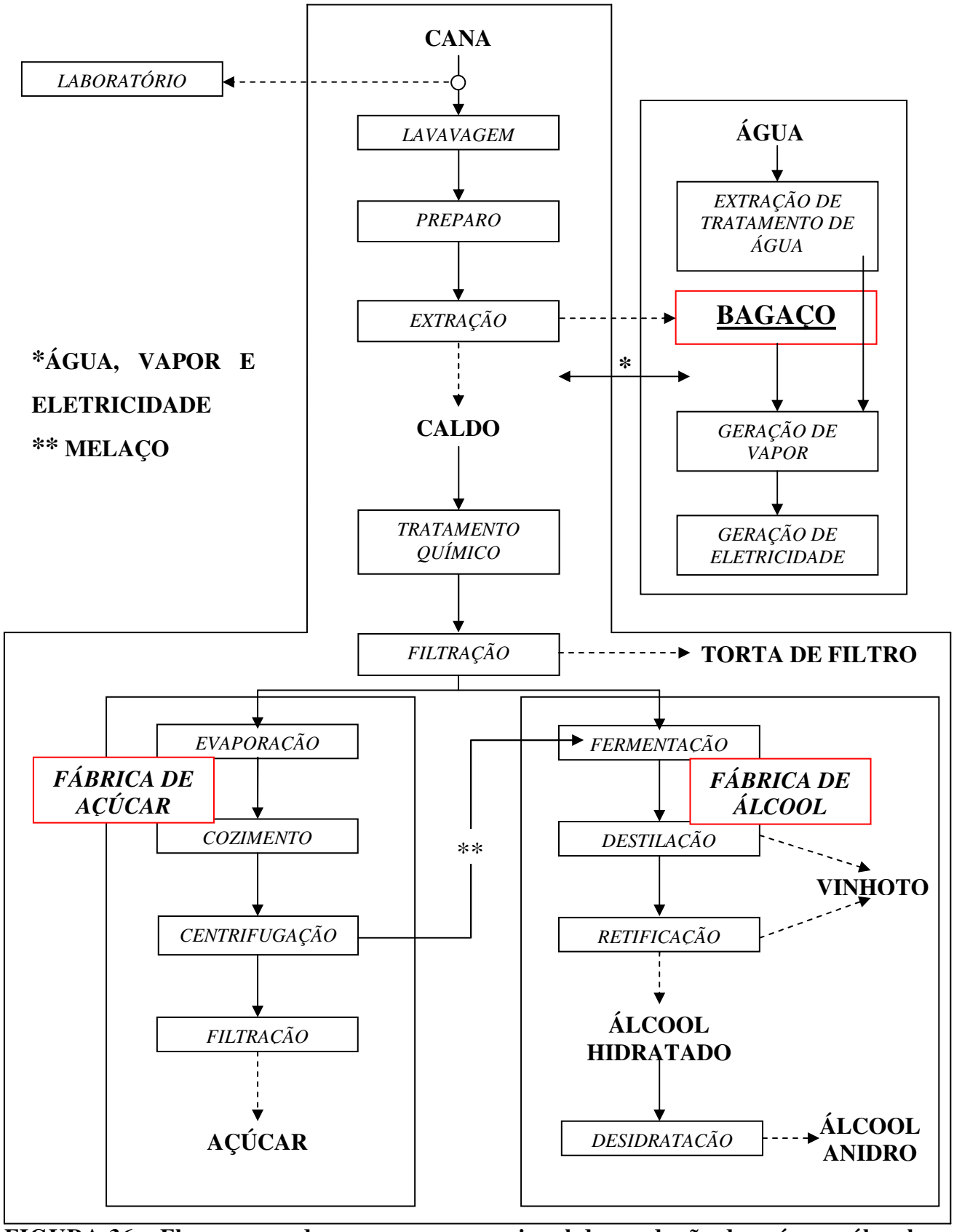


FIGURA 36 – Fluxograma do processo convencional de produção de açúcar e álcool
Fonte: Elaboração própria baseada em HORTA NOGUEIRA et al (2008), MARQUES et al (2009) e CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005)

Após esta etapa, a usina, através de uma unidade de desidratação produz o álcool anidro, combustível usado na mistura com a gasolina, responsável por elevar seu índice de octanagem e considerado, neste caso, um bem complementar do derivado de petróleo citado. Com isso, para concluir, destaca-se que todas as informações apresentadas podem ser observadas sintetizadas na figura 36, a qual apresenta um fluxograma simplificado do processo produtivo de uma usina convencional.

No próximo tópico será apresentada a quantidade aproximada de bagaço de cana-de-açúcar produzido no Brasil. Os cálculos têm como base as informações expostas até este ponto, com ênfase no processo produtivo agrícola até a etapa de extração nas usinas, onde são extraídos o caldo e o bagaço. Ademais, com objetivo de mensurar a quantidade de bagaço excedente, a tabela 36 também entra como referência, visto que representa a base para a construção de um cenário conservador quando se estima retratar o tipo de tecnologia utilizada na produção de energia mecânica e elétrica nas usinas.

III.3 – Quantidade de bagaço disponível

Para calcular a quantidade produzida de bagaço em cada safra, utilizou-se a informação obtida em CGEE/ NIPE-UNICAMP (2005) de que para cada tonelada de cana colhida, em torno de 240 a 280 kg de bagaço são gerados. Assim, com base nos dados de quantidade produzida de cana-de-açúcar por Estados, Regiões e no Brasil, desde a safra de 1990/1991 até 2008/2009 (estimativa), fornecidos por ÚNICA (2009), conseguiu-se estimar a quantidade mínima e máxima aproximada do bagaço produzido.

Para captar a evolução da produção deste subproduto no país ao longo do tempo, bem como a variação da participação das duas regiões produtoras, pode-se analisar a figura 37. Nesta, são expostas estimativas da quantidade média produzida de bagaço ao longo das safras mencionadas anteriormente. Através desta figura, é possível observar que a

região Norte-Nordeste veio perdendo participação para a Centro-Sul ao longo das quase duas décadas de safras[207].

Segundo os dados, na safra 1990/1991, o Brasil produziu aproximadamente entre 53 a 62 milhões de toneladas de bagaço. Destas, o Centro-Sul respondeu por aproximadamente 41 a 48 milhões de toneladas enquanto a região do Norte-Nordeste produziu em torno de 12 a 14 milhões de toneladas. Tais montantes são menores do que os estimados para a safra 2008/2009, onde é esperado que a quantidade de bagaço produzida no Brasil supere em duas vezes e meia a quantidade adquirida na safra 1990/1991. Este montante é puxado pela região Centro-Sul onde se observa que a quantidade esperada para a última safra esteja três vezes maior do que a adquirida na safra em comparação. A região Norte-Nordeste responde nas estimativas, por um aumento em torno de 20% na produção deste subproduto.

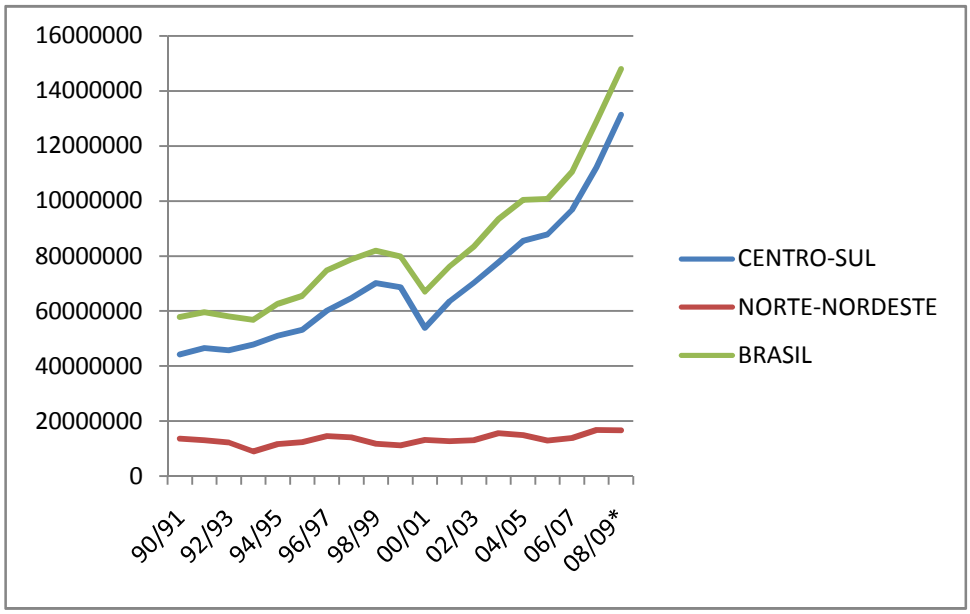


FIGURA 37 – Evolução da quantidade de bagaço produzida ao longo do tempo no Brasil

Ao tomar o fato da safra de 2008/2009 não ter sido finalizada, torna-se interessante analisar a quantidade de bagaço estimada para uma safra já consolidada. No caso, é

[207] Estas participações são as mesmas observadas na produção de cana-de-açúcar, visto que para o cálculo da produção de bagaço apenas são multiplicados os coeficientes 0,24 (mínimo) e 0,28 (máximo) à quantidade de cana-de-açúcar produzida.

razoável citar a última safra ocorrida (2007/2008), onde o Brasil produziu aproximadamente entre 119 a 139 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Destes, a região Centro-Sul respondeu por 103 a 121 milhões de toneladas contra 15 a 18 milhões de toneladas de Norte-Nordeste. Tais montantes representam um aumento de duas vezes e meia da quantidade produzida deste resíduo no Centro-Sul frente a aproximadamente 20% no Norte Nordeste. No Brasil houve um aumento de um pouco mais que o dobro.

Contudo, quando realizados estes cálculos, o que se extrai de mais interessante para ao estudo é a dispersão desta quantidade produzida de bagaço no território nacional. Esta pode ser observada na tabela 37, a qual expõe a produção estimada deste resíduo entre os Estados ao longo das quatro últimas safras consolidadas e da atual (2008/2009).

Ao analisar a tabela 37, pode-se concluir que o estado de São Paulo, maior produtor de bagaço de cana-de-açúcar, mantém sua participação ao longo destas safras em torno de 60%. Confirma-se este Estado como o maior pólo de usinas do país, alcançando níveis de produção superiores a oito ou sete vezes o segundo colocado, ao longo das safras expostas na tabela. Ademais, outro ponto relevante a destacar é o crescimento da participação de estados como Minas gerais e Goiás, tidos em MARQUES et al (2009) como áreas de expansão da cana[208].

Nestes, pode-se observar um aumento na participação, quando se compara o período de 2004/2005 e 2007/2008. Em Minas Gerais, se pode analisar que o Estado passa de uma participação de 5,61%, que lhe concedia o quarto lugar, para 7,21%, correspondente ao terceiro lugar. Com relação a Goiás, observa-se uma participação de 3,63%, correspondente ao sétimo lugar, no período mais antigo e 4,25%, concedendo-lhe o quinto lugar, referente ao período mais recente. Ademais, para a safra atual (2008/2009), verifica-se que estas duas áreas mantêm seus respectivos ritmos de crescimento. Goiás vai para a quarta colocação, com 5,18% de participação e Minas gerais alcança a terceira, com 7,47%.

[208] Os autores inserem também nesta classificação o Oeste Paulista, área esta que não é possível discernir através destes dados, pois, o que se define como tradicional e expansão estão agregados no mesmo estado: São Paulo.

Tabela 37 - PRODUÇÃO ESTIMADA DE BAGAÇO AO LONGO DAS ÚLTIMAS QUATRO SAFRAS E A ATUAL, AINDA NÃO CONSOLIDADA

ESTADOS/SAFRA	2004/2005		2005/2006		2006/2007		2007/2008		2008/2009*	
	mínimo	máximo	Mínimo	máximo	mínimo	Máximo	Mínimo	máximo	mínimo	Máximo
ACRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RONDONIA	0	0	0	0	0	0	0	0	25.510	29.762
AMAZONAS	64.264	74.975	60.641	70.748	53.928	62.916	76.354	89.079	72.804	84.938
PARÁ	139.440	162.680	122.421	142.824	167.376	195.272	138.126	161.147	150.448	175.522
TOCANTINS	0	0	22.875	26.688	43.032	50.204	0	0	13.309	15.528
MARANHÃO	306.029	357.033	431.398	503.297	398.472	464.884	512.305	597.689	547.238	638.445
PIAUÍ	83.839	97.812	118.169	137.863	169.440	197.680	165.391	192.956	216.043	252.051
CEARÁ	19.067	22.244	9.770	11.399	6.576	7.672	1.980	2.310	29.365	34.259
R. G. NORTE	700.242	816.950	565.504	659.755	575.376	671.272	491.460	573.370	764.824	892.295
PARAIBA	1.313.815	1.532.784	1.029.954	1.201.612	1.225.848	1.430.156	1.356.731	1.582.853	1.412.635	1.648.074
PERNAMBUCO	4.004.368	4.671.763	3.325.997	3.880.329	3.670.488	4.282.236	4.762.660	5.556.436	4.547.884	5.305.865
ALAGOAS	6.247.145	7.288.336	5.407.750	6.309.041	5.672.424	6.617.828	7.066.610	8.244.378	6.552.160	7.644.186
SERGIPE	351.644	410.252	266.172	310.535	272.664	318.108	329.204	384.071	416.763	486.224
BAHIA	544.409	635.143	573.940	669.596	524.544	611.968	605.502	706.418	610.036	711.708
MINAS GERAIS	5.195.939	6.061.928	5.890.429	6.872.168	6.968.207	8.129.575	8.573.579	10.002.509	10.195.432	11.894.671
ESPIRITO SANTO	936.074	1.092.086	913.015	1.065.185	694.661	810.438	945.302	1.102.852	1.049.580	1.224.509
RIO DE JANEIRO	1.353.135	1.578.658	1.151.844	1.343.818	826.837	964.643	919.596	1.072.863	964.522	1.125.275
SÃO PAULO	55.267.307	64.478.524	58.504.163	68.254.857	63.328.834	73.883.640	71.115.350	82.967.908	83.110.313	96.962.031
PARANÁ	6.959.411	8.119.313	5.954.138	6.946.494	7.678.699	8.958.483	9.688.575	11.303.338	10.759.116	12.552.303
SANTA CATARINA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R. G. SUL	18.719	21.839	13.914	16.233	22.061	25.737	30.955	36.114	25.724	30.012
MATO GROSSO	3.467.317	4.045.203	2.960.513	3.453.932	3.163.082	3.690.263	3.582.724	4.179.844	3.667.952	4.279.278
MATO GROSSO DO SUL	2.328.012	2.716.013	2.169.100	2.530.617	2.792.423	3.257.827	3.568.576	4.163.338	4.341.693	5.065.309
GOIÁS	3.361.454	3.921.696	3.494.342	4.076.733	3.873.610	4.519.212	5.059.683	5.902.963	7.076.762	8.256.222
CENTRO-SUL	**78.887.367**	**92.035.261**	**81.051.460**	**94.560.037**	**89.348.415**	**104.239.817**	**103.484.340**	**120.731.729**	**121.191.094**	**141.389.609**
NORTE-NORDESTE	**13.774.261**	**16.069.971**	**11.934.590**	**13.923.688**	**12.780.168**	**14.910.196**	**15.506.322**	**18.090.709**	**15.359.020**	**17.918.857**
BRASIL	**92.661.628**	**108.105.233**	**92.986.050**	**108.483.725**	**102.128.583**	**119.150.013**	**118.990.662**	**138.822.439**	**136.550.114**	**159.308.467**

*Posição em 16/05/2009

Logo, Minas Gerais se aproxima do Paraná, Estado tradicional no cultivo da cana e que ocupa o segundo lugar nas safras expostas na tabela 37. Ademais, ambos os estados, Goiás e Minas Gerais, ultrapassam Pernambuco e Alagoas, duas áreas líderes da indústria na região Norte-Nordeste. Outro ponto importante é que, dentre os Estados apresentados, entre 10 e 11 apresentaram quantidade produzida de bagaço superior ou na faixa de um milhão de toneladas por safra. Também se deve frisar que em torno de seis apresentaram um montante entre 100.000 a um milhão de toneladas de bagaço e aproximadamente quatro, ao longo das safras, mostraram uma produção até 100.000 toneladas de bagaço por safra. Para finalizar, três a quatro Estados não apresentaram produção alguma.

Ao levar em consideração os fatos apresentados, de que apesar da distribuição na quantidade produzida de bagaço entre os Estados nas safras mostradas na tabela 37 demonstrar certa estabilidade em termos das participações relativas dos mesmos no Brasil, verifica-se que existe uma tendência persistente de aumento dessa participação em alguns Estados específicos. Cresce em uma proporção mais elevada, portanto, a produção em algumas áreas tradicionais e em expansão na região do Centro-Sul do país.

Com isso, percebe-se que determinadas áreas vêm conquistando um maior espaço. Assim, para que seja feito um "retrato" da distribuição da produção desta biomassa no país, bem como sua quantidade disponível, é interessante buscar a safra mais recente possível. Sendo a safra 2008/2009 ainda não consolidada, resolveu-se utilizar a última safra consolidada: 2007/2008. Portanto, a distribuição existente nesta safra, exposta na tabela 38, é a que neste trabalho representa atualmente no país, a distribuição e produção do bagaço de cana-de-açúcar nos Estados Nacionais.

Destaca-se que a quarta e a quinta coluna da tabela 38, representa o que em média é produzido de bagaço em cada mês da safra. Neste caso, levou-se em consideração o fato desta ter uma duração aproximada de sete meses, como mostrado no item "III.1 – produção de cana-de-açúcar: parte agrícola". Os quatro estados mais produtores estabeleceram uma produção superior a um milhão de toneladas por mês da safra de 2007/2008. Foram eles: Alagoas, Minas gerais, São Paulo e Paraná. Merece destaque também os Estados de Pernambuco, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, com um montante que varia entre 500.000 a um milhão de toneladas em média por cada mês da safra citada.

TABELA 38 – Produção estimada de bagaço, total e média mensal, para safra 2007/2008

ESTADOS/SAFRA	2007/2008				
	mín. safra	máx. safra	mín. mês	máx. mês	Participação
ACRE	0	0	0	0	0,00%
RONDONIA	0	0	0	0	0,00%
AMAZONAS	76.354	89.079	10.908	12.726	0,06%
PARÁ	138.126	161.147	19.732	23.021	0,12%
TOCANTINS	0	0	0	0	0,00%
MARANHÃO	512.305	597.689	73.186	85.384	0,43%
PIAUÍ	165.391	192.956	23.627	27.565	0,14%
CEARÁ	1.980	2.310	283	330	0,00%
R. G. NORTE	491.460	573.370	70.209	81.910	0,41%
PARAIBA	1.356.731	1.582.853	193.819	226.122	1,14%
PERNAMBUCO	4.762.660	5.556.436	680.380	793.777	4,00%
ALAGOAS	7.066.610	8.244.378	1.009.516	1.177.768	5,94%
SERGIPE	329.204	384.071	47.029	54.867	0,28%
BAHIA	605.502	706.418	86.500	100.917	0,51%
MINAS GERAIS	8.573.579	10.002.509	1.224.797	1.428.930	7,21%
ESPIRITO SANTO	945.302	1.102.852	135.043	157.550	0,79%
RIO DE JANEIRO	919.596	1.072.863	131.371	153.266	0,77%
SÃO PAULO	71.115.350	82.967.908	10.159.336	11.852.558	59,77%
PARANÁ	9.688.575	11.303.338	1.384.082	1.614.763	8,14%
SANTA CATARINA	0	0	0	0	0,00%
R. G. SUL	30.955	36.114	4.422	5.159	0,03%
MATO GROSSO	3.582.724	4.179.844	511.818	597.121	3,01%
MATO GROSSO DO SUL	3.568.576	4.163.338	509.797	594.763	3,00%
GOIÁS	5.059.683	5.902.963	722.812	843.280	4,25%
CENTRO-SUL	**103.484.340**	**120.731.729**	**14.783.477**	**17.247.390**	**86,97%**
NORTE-NORDESTE	**15.506.322**	**18.090.709**	**2.215.189**	**2.584.387**	**13,03%**
BRASIL	**118.990.662**	**138.822.439**	**16.998.666**	**19.831.777**	**100,00%**

Configura-se, portanto, o cenário que este estudo toma como base para representar a produção existente hoje de bagaço, biomassa residual na indústria sucroalcooleira. Este é conservador não só pela quantidade esperada na safra de 2008/2009 ser superior à utilizada, como não se levou em consideração o aproveitamento da palha como mais uma biomassa residual produzida neste setor.

Esta é produzida, como foi exposto no item "III.1 – produção de cana-de-açúcar: parte agrícola", em uma proporção de 140 Kg para cada tonelada de cana produzida, segundo HORTA NOGUEIRA et al (2008), e portanto, caso toda a colheita da cana fosse realizada mecanicamente, sem o corte manual que exige a queima da palha, isto

representaria em um aumento considerável de biomassa a ser aproveitado pelas biorefinarias.

Assim, ao contrário do cálculo da quantidade de bagaço, o cálculo da quantidade de palha produzida hoje no setor, que pode ser observado na tabela 39, superestima a quantidade real de palha existente. Trata-se da quantidade potencial e, calculá-la é interessante, pois, quando esta é somada à quantidade de bagaço de cana produzidos em cada Estado, mostrado na tabela 37, é obtida a quantidade total de biomassa residual que poderia ser aproveitada. Isso permite que se tenha noção do grande potencial, da real importância do setor como fonte de biomassa disponível para as bio-refinarias analisadas.

No caso, para a safra de 2007/2008, a quantidade de palha produzida, levando em consideração o critério utilizado na escolha desta safra para compor o cenário de produção atual, é a mais indicada para representar a distribuição do potencial da produção atual de palha em território nacional. Está, portanto, relacionada à tabela 38. Com isso, para que seja realizado um cálculo da média mensal na safra, da produção deste resíduo, deve-se dividir a produção total na safra por sete, com fidelidade à lógica exercida anteriormente.

Assim, a soma da quantidade produzida de bagaço e da quantidade potencial de produção da palha deve ser compreendida como uma quantidade potencial de toda a biomassa residual produzida pelo setor sucroalcooleiro. Portanto, as somas da tabela 38 e tabela 39, representam a quantidade "bruta" desta biomassa residual. Isso acontece porque, da mesma forma que pode ser irreal pensar na quantidade de palha total como fonte disponível dessa biomassa devido à prática ainda usual da colheita manual, também não é factível pensar que toda a produção de bagaço no setor esteja disponível ao uso nas bio-refinarias. Este fato ocorre em razão do destino que este resíduo é direcionado atualmente. Isto é, as já mencionadas caldeiras a vapor, com vistas a transformar energia térmica em mecânica e elétrica.

Com base no que foi exposto na tabela 36[209], e, tomando estas informações como plataforma para construção de um cenário referência, estipula-se uma tendência de geração de um excedente de bagaço na ordem de 5 a 10% da tonelada de cana-de-açúcar produzida, sendo, portanto, razoável auferir a quantidade de bagaço excedente e a sua distribuição entre os Estados no parque industrial brasileiro.

TABELA 39 - Produção estimada de palha ao longo das últimas quatro safras e a atual, ainda não consolidada

ESTADOS/SAFRA	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009*
ACRE	0	0	0	0	0
RONDONIA	0	0	0	0	106.292
AMAZONAS	37.487	35.374	224.700	318.141	303.350
PARÁ	81.340	71.412	697.400	575.525	626.865
TOCANTINS	0	13.344	179.300	0	55.456
MARANHÃO	178.517	251.649	1.660.300	2.134.604	2.280.160
PIAUÍ	48.906	68.932	706.000	689.130	900.181
CEARÁ	11.122	5.699	27.400	8.250	122.355
R. G. NORTE	408.475	329.878	2.397.400	2.047.750	3.186.768
PARAIBA	766.392	600.806	5.107.700	5.653.047	5.885.978
PERNAMBUCO	2.335.881	1.940.165	15.293.700	19.844.415	18.949.517
ALAGOAS	3.644.168	3.154.521	23.635.100	29.444.208	27.300.666
SERGIPE	205.126	155.267	1.136.100	1.371.683	1.736.514
BAHIA	317.572	334.798	2.185.600	2.522.923	2.541.816
MINAS GERAIS	3.030.964	3.436.084	29.034.195	35.723.246	42.480.968
ESPIRITO SANTO	546.043	532.592	2.894.421	3.938.757	4.373.248
RIO DE JANEIRO	789.329	671.909	3.445.154	3.831.652	4.018.840
SÃO PAULO	32.239.262	34.127.429	263.870.142	296.313.957	346.292.969
PARANÁ	4.059.657	3.473.247	31.994.581	40.369.063	44.829.652
SANTA CATARINA	0	0	0	0	0
R. G. SUL	10.920	8.117	91.919	128.980	107.184
MATO GROSSO	2.022.602	1.726.966	13.179.510	14.928.015	15.283.134
MATO GROSSO DO SUL	1.358.007	1.265.309	11.635.096	14.869.066	18.090.388
GOIÁS	1.960.848	2.038.366	16.140.043	21.082.012	29.486.508
CENTRO-SUL	**46.017.631**	**47.280.019**	**372.285.061**	**431.184.748**	**504.962.891**
NORTE-NORDESTE	**8.034.986**	**6.961.844**	**53.250.700**	**64.609.676**	**63995918**
BRASIL	**54.052.616**	**54.241.863**	**425.535.761**	**495.794.424**	**568.958.809**

*Posição em 16/05/2009

[209] Caldeiras com pressão e temperaturas de operação a 22 bar e 300°C respectivamente, e uma planta industrial com consumo de energia elétrica na ordem de 13 kWh/tc, de energia mecânica em 17 kWh/tc, e térmica de 330 kWhth/tc, equivalente a um vapor de processo de 500 kgv/tc, vapor saturado a 2,5 bar

Tal procedimento pode ser observado na tabela 40, onde, atribuiu-se os 5% à menor quantidade de bagaço auferida na tabela 38 e, os 10% à maior, construindo, com isso, um intervalo que agrega a quantidade mínima e máxima de excedente de bagaço de cana entre os Estados Nacionais. Assim, tais montantes têm como base os aspectos tecnológicos expostos na tabela 36 e as quantidades expostas na tabela 38.

Contudo, ao analisar SCHAEFFER et al (2008), pode-se concluir que o cenário representado na tabela 40 também possui um perfil conservador. O tipo de caldeira considerado no cenário estipulado é o de tecnologia mais simples, com menor eficiência no uso do bagaço quando comparada às outras, existentes no mercado. Como exemplo, o estudo citou a existência de caldeiras que utilizam pressões mais elevadas e ou utilizam turbinas a vapor de condensação e extração (Cest). Ambas permitem um uso mais eficiente do bagaço ao extraírem mais energia com a mesma quantidade de bagaço utilizada ou, gerarem a mesma energia com uma quantidade menor. Com isso, pode-se concluir que os números alcançados na tabela 40 estão subestimados. Neste caso, a quantidade de biomassa excedente no país pode ser ainda maior.

Para finalizar a explanação, sendo o bagaço (e a palha) resíduo do processo produtivo de açúcar e álcool, os custos de sua obtenção, variável relevante a ser observada, são a princípio baixos. A princípio porque, para o caso de uma planta de bio-refinaria integrada a uma usina, seus custos contábeis[210] devem ser nulos, já que, com a integração vertical existente, o principal insumo da bio-refinaria é adquirido pela própria firma, como resíduo industrial da produção de outros produtos. Porém, para uma planta de bio-refinaria não integrada a uma usina, seus insumos deveriam ser adquiridos no mercado, o que deve lhes atribuir um preço[211], elevando os custos contábeis dessa planta industrial.

Para finalizar a explanação, sendo o bagaço (e a palha) resíduo do processo produtivo de açúcar e álcool, os custos de sua obtenção, variável relevante a ser observada, são a princípio baixos. A princípio porque, para o caso de uma planta de bio-refinaria

[210] Para os custos econômicos devem ser levados em consideração os custos de oportunidade, variável que pode alterar significativamente o valor final destes.

[211] Isso porque o bagaço, considerado até então como um subproduto, passa a ser considerado um produto.

integrada a uma usina, seus custos contábeis[212] devem ser nulos, já que, com a integração vertical existente, o principal insumo da bio-refinaria é adquirido pela própria firma, como resíduo industrial da produção de outros produtos. Porém, para uma planta de bio-refinaria não integrada a uma usina, seus insumos deveriam ser adquiridos no mercado, o que deve lhes atribuir um preço[213], elevando os custos contábeis dessa planta industrial.

TABELA 40– Produção estimada do excedente de bagaço, total e média mensal, para safra 2007/2008

ESTADOS/SAFRA	2007/2008				
	Mínimo	Máximo	mín. mês	máx. mês	Participação
ACRE	0	0	0	0	0,00%
RONDONIA	0	0	0	0	0,00%
AMAZONAS	3.818	8.908	545	1.273	0,06%
PARÁ	6.906	16.115	987	2.302	0,12%
TOCANTINS	0	0	0	0	0,00%
MARANHÃO	25.615	59.769	3.659	8.538	0,43%
PIAUÍ	8.270	19.296	1.181	2.757	0,14%
CEARÁ	99	231	14	33	0,00%
R. G. NORTE	24.573	57.337	3.510	8.191	0,41%
PARAIBA	67.837	158.285	9.691	22.612	1,14%
PERNAMBUCO	238.133	555.644	34.019	79.378	4,00%
ALAGOAS	353.330	824.438	50.476	117.777	5,94%
SERGIPE	16.460	38.407	2.351	5.487	0,28%
BAHIA	30.275	70.642	4.325	10.092	0,51%
MINAS GERAIS	428.679	1.000.251	61.240	142.893	7,21%
ESPIRITO SANTO	47.265	110.285	6.752	15.755	0,79%
RIO DE JANEIRO	45.980	107.286	6.569	15.327	0,77%
SÃO PAULO	3.555.767	8.296.791	507.967	1.185.256	59,77%
PARANÁ	484.429	1.130.334	69.204	161.476	8,14%
SANTA CATARINA	0	0	0	0	0,00%
R. G. SUL	1.548	3.611	221	516	0,03%
MATO GROSSO	179.136	417.984	25.591	59.712	3,01%
MATO GROSSO DO SUL	178.429	416.334	25.490	59.476	3,00%
GOIÁS	252.984	590.296	36.141	84.328	4,25%
CENTRO-SUL	**5.174.217**	**12.073.173**	**739.174**	**1.724.739**	**86,97%**
NORTE-NORDESTE	**775.316**	**1.809.071**	**110.759**	**258.439**	**13,03%**
BRASIL	**5.949.533**	**13.882.244**	**849.933**	**1.983.178**	**100,00%**

[212] Para os custos econômicos devem ser levados em consideração os custos de oportunidade, variável que pode alterar significativamente o valor final destes.

[213] Isso porque o bagaço, considerado até então como um subproduto, passa a ser considerado um produto.

Porém, em MARQUES et al (2009) é exposto que hoje já existe um mercado de comercialização do bagaço, com vistas à geração de energia elétrica. Este mercado possui suas particularidades que merecem ser destacadas. Uma delas é a necessidade de proximidade entre as unidades produtoras, usinas que comercializam bagaço, e as unidades consumidoras, plantas que visam produzir energia elétrica na queima desta biomassa em caldeiras a vapor. Outra é referente ao número pequeno de usinas e conseqüentemente de bagaços comercializados. A terceira é referente aos preços, que permanecem baixos.

Segundo MARQUES et al (2009), distâncias superiores a um raio de 100 Km são um forte inibidor da comercialização deste produto, tornando relevante, portanto, detectar e dimensionar os focos produtivos em território nacional. Este fato, junto à importância do acesso à matéria-prima, como mostrado no item "2.1 – relação do grau de economia de escala com localização e competição", justifica a preocupação nos cálculos anteriores em captar a produção entre os Estados ao invés somente, de mensurar a produção total do Brasil e ou suas duas regiões produtoras: Centro-Sul e Norte-Nordeste. A divisão entre os Estados é o primeiro passo para uma futura análise mais detalhada do preço-custo do bagaço comercializado em mercados locais.

Com relação às quantidades de usinas catalogadas em MARQUES et al (2009) que comercializam este produto, merece destaque o seu baixo número. O estudo catalogou que apenas oito o comercializam, e estas, declararam vender em torno menos de 10% da produção desta biomassa residual[214]. Quanto aos seus preços nos diferentes mercados, estes variam entre cinco a trinta e cinco reais por tonelada, conferindo-lhes uma média de dezessete reais por tonelada de bagaço.

Por isso, pode-se afirmar que a quantidade de biomassa que a indústria sucroalcooleira dispõe hoje às unidades ainda não implantadas de bio-refinarias, é a justificativa utilizada neste estudo para a exploração destes recursos como insumo destas plantas industriais. O Brasil através da indústria sucroalcooleira dispõe, portanto, de uma

[214] Esta parcela corresponde ao que se espera do cenário produzido na tabela 40, de excedente de bagaço, construído com base nas informações expostas na tabela 36.

quantidade substancial de biomassa residual relativamente homogênea, a custos baixos, resultante do processo industrial de produção de açúcar e álcool.

Seria a indústria sucroalcooleira capaz de promover um ambiente que garantiria a manutenção deste quadro, isto é, de elevada produção de biomassa residual ao longo do tempo, criando um ambiente de segurança para investimentos em plantas de bio-refinaria que tenham essa biomassa como matéria-prima básica?

Segundo SCHAEFFER et al (2008), baseando-se em cenário construídos pela EPE, em 2030 a produção anual de cana-de-açúcar estará em torno de 1,14 bilhão de toneladas. Tal montante corresponde, segundo os parâmetros analisados para a construção do cenário presente, em uma produção de bagaço em torno de 263,6 a 319,2 milhões de toneladas e 159,6 milhões de toneladas de palha. Ao levar-se em consideração que, de acordo com HORTA NOGUEIRA et al (2008), em 2020 toda a colheita será mecanizada, a quantidade total de biomassa residual produzida pelo setor em 2030 estará em torno de 433,2 a 478,8 milhões de toneladas.

Quanto ao destino do bagaço, não tem como afirmar que este será direcionado para caldeiras a vapor de média ou alta pressão, que utilizem turbinas a vapor de condensação e extração (Cest) ou que se destinem a unidades de gaseificação desta biomassa, como foi mencionado em SCHAEFFER et al (2008), configurando-se uma das rotas possíveis de bio-refinaria analisadas a seguir. Assim, o excedente de biomassa residual dependerá de como estes avanços tecnológicos serão assimilados pela indústria sucroalcooleira ao longo do tempo.

Ademais, é o aumento de produção somado às novas tecnologias de geração de eletricidade e das plantas de bio-refinaria que consolidarão os mercados de comercialização de bagaço e, também de palha da cana. Contudo, como de fato são constituídas as rotas tecnológicas de bio-refinarias neste trabalho? O que elas provêem? Que vantagens elas possuem com relação ao modelo atual? Que benefícios estas plantas trariam à matriz energética brasileira? Estas e outras questões são analisadas no capítulo 3, onde, descrevem-se, com base no conceito de bio-refinaria, as diferentes rotas utilizando como matéria-prima básica o bagaço de cana-de-açúcar, com objetivo de melhor adaptá-las à realidade brasileira.