Fundação Getúlio Vargas – FGV
Escola de Economia de São Paulo

Análise Prospectiva da Utilização de uma Usina como Plataforma para uma Biorefinaria

André Bello de Oliveira

São Paulo/SP
2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, André Bello de.
Análise Prospectiva da Utilização de uma Usina como Plataforma para uma Biorefinaria / Andre Bello de Oliveira. - 2010.
112 f.

Orientador: Paulo Furquim de Azevedo
Dissertação (mestrado) - Escola de Economia de São Paulo.

1. Cana-de-açúcar. 2. Álcool como combustível. 3. Açúcar – Usinas.
4. Biocombustíveis. I. Azevedo, Paulo Furquim. II. Dissertação (mestrado) - Escola de Economia de São Paulo. III. Título.

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento desde que citada a fonte – O autor”

CDU 620.95

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra ao meu filho Ernesto que teve, em seus primeiros anos de vida, a privação de compartilhar muitas noites e finais de semana da insubstituível relação entre pai e filho. À pequena Anita, que aguarda ansiosamente a sua oportunidade de vir ao mundo e conhecer o nosso legado. Em especial, à minha esposa Denise pela paixão, visão, dedicação e paciência durante este período.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras e Petrobras Bicombustível pelo apoio financeiro.

Aos gestores Eduardo Coelho e Ricardo Castello Branco pela valorização da necessidade de qualificação profissional. Aos agrônomos e engenheiros da Petrobras Bicombustível, Antonio Meirelles, Edson Pereira, Raquel Capistrano, Alexandre Galvão e Efabiano Augusto pelas ricas discussões.

A banca pelas contribuições construtivas.

Aos colegas, em especial Adriano Boni e Eduardo Dallastra, e professores do curso pelo aprendizado e amizade.

Ao Paulo Furquim Azevedo pela orientação e confiança.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar as possibilidades de utilização de uma usina de produção de etanol açúcar e energia elétrica como plataforma para implantação de uma biorefinaria. De forma prospectiva, foram avaliados os principais blocos de construção para o desenvolvimento de uma gama de produtos com base em matérias-primas açucaradas. Alguns destes produtos, como o ácido cítrico, a lisina e o sorbitol, já são fabricados a partir de biomassa no país. Devido ao baixo custo do açúcar de cana e da disponibilidade de fibra para geração de utilidades, as usinas se mostraram plataformas adequadas para anexar unidades para geração de produtos com maior valor agregado. A operação sazonal, entretanto, constitui um dos grandes empecilhos para a viabilização destes complexos, levando à necessidade de estocagem de combustível para operação anual das caldeiras, bem como para produção a estocagem de açúcar, melaço ou etanol como matérias-primas para os processos anexos. Fatores de competitividade, como economia de escala, escopo, diversificação, diferenciação e flexibilidade foram avaliados visando fornecer subsídio para escolha do tamanho de unidades e tipos de produtos e processos. A produção de 15.000 toneladas de cana por dia foi escolhida como módulo de produção eficiente para região de expansão. Esta escala se mostrou adequada para a produção dos produtos derivados de sacarose que atualmente são produzidos no Brasil. Entretanto, a integração da produção de eteno por rotas alcoolquímica à usina demanda unidades com capacidade de processamento acima de 30.000 toneladas de cana por dia. Para avaliação das premissas teóricas, foi realizado um estudo de caso de um complexo envolvendo a produção de etanol, açúcar, ácido cítrico, lisina, PHB e leveduras. A este complexo foi anexada uma unidade de extração de óleo de soja e uma planta de produção de biodiesel. A integração do complexo soja se mostrou viável sob o ponto de vista de suprimento de utilidades (vapor e energia elétrica) e produção de rações de farelo de soja com lisina e levedura. A produção de soja na reforma da área de cana apresenta benefícios de redução de custo de plantio, sendo uma alternativa de integração entre culturas energéticas e de alimentos. Esta produção, entretanto, é insuficiente para justificar a instalação de extratoras de soja anexas a usinas. A biorefinaria sugerida apresentou um valor presente líquido superior ao da instalação de uma usina autônoma utilizada como referência. Para futuros trabalhos foram sugeridos estudos de programação linear para as rotas de produção dos produtos intermediários e finais a partir dos blocos de construção identificados, a integração da biorefinaria com unidades de produção de proteína animal, com a cultura do sorgo e eucalipto. Esta integração tem como objetivo aumentar o fator de utilização dos equipamentos e possibilitar a inserção de tecnologias avançadas, por rotas de hidrólise e gaseificação além da produção de microalgas para melhor aproveitamento do CO_2.

ABSTRACT

This study aims to verify the possibilities of using a sugar mill as a platform for the installation of a biorefinery. The main building blocks for developing a range of products based on sugar were prospectively evaluated. Some products, such as citric acid lysine and sorbitol, are already produced from biomass in the country. Due to the low cost of sugar cane and the availability of fiber for the generation of utilities, the plants proved to be suitable platforms to attach process units, thus generating products with higher added value. The seasonal operation, however, constitutes a big challenge to the viability of these units. The need for fuel storage, for the annual operation of boilers, and for the storage of sugar, molasses or ethanol as raw materials for the process's attachments, increase the complexity of the operation. Competitive factors such as economies of scale, scope, diversification, differentiation and flexibility were evaluated to provide subsidies for choosing the size of units and types of products and processes. The production of 15,000 tons of sugar cane per day was chosen as a module for efficient production in the region of expansion. This range was adequate for the production of products derived from sucrose that are currently produced in Brazil. However, the production of ethylene by the plant attached routes Ethanol demand milling with capacity to process over 30,000 tons of cane per day. We conducted a case study of a complex involving the production of alcohol, sugar, citric acid, lysine, dry yeast and PHB. At this complex, a soybean oil extraction plant and a biodiesel production plant were attached. The integration of the soy complex showed viability from the point of view of supply of utilities (steam and electricity) and production of feed with soybean meal, lysine and yeast. Soybean production in the remodeling of the sugar cane area has cost reduction benefits of planting and is an alternative integration between energy crops and foods. This production, however, is insufficient to justify the installation of the extractor attached to the biorefinery plants. The biorefinery suggested presented a greater net present value than the single ethanol installation of an autonomous plant used as a reference. For future work were suggested studies of linear programming for the routes of production of intermediate and end products from the building blocks identified, the integration of biorefinery with production of animal protein, with the sorghum and eucalyptus to increase the factor the use of equipment and enable the insertion of advanced technologies such as hydrolysis and gasification processes and production of microalgae for better utilization of CO2.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 4
1.1 Objetivo 6
1.2 Metodologia 7
2 ETAPAS DA IMPLANTAÇÃO DE UMA BIOREFINARIA 7
2.1 Análise prospectiva dos produtos e matérias primas 10
2.2 Rota Termoquímica 17
2.3 Rotas Sucroquímica e Alcoolquímica 20
3 ANÁLISE DOS FATORES DE COMPETITIVIDADE DE UMA BIOREFINARIA 24
3.1 Economia de escala 24
3.2 Economia de escopo 33
3.3 Diversificação 35
3.4 Diferenciação 40
3.5 Flexibilidade 40
3.6 Requisitos de uma usina plataforma para biorefino 41
4 ESTUDO DE CASO 44
4.1 Escolha dos Produtos 44
4.2 Localização da Planta 46
4.3 Estratégia de Suprimento 47
4.3.1 Suprimento de Cana-de-Açucar 47
4.3.2 Suprimento de Soja 51
4.3.3 Suprimento de Combustível 51
4.4 Capacidade de Produção das Unidades e Filosofia de Operação 54
4.5 Características da Planta Industrial 56
4.5.1 Recepção, Preparo e Extração 59
4.5.2 Tratamento do Caldo e Evaporação 68
4.5.3 Fábrica de Açúcar 73
4.5.4 Fermentação 74
4.5.5 Destilação 77
4.5.6 Casa de Força 79
4.5.7 Premissas Comerciais 84
4.5.8 Estimativa Preliminar de Custos e Cronograma de Implantação 88
4.5.9 Modelo Societário 89
4.5.10 Viabilidade Econômica 90
4.5.11 Estratégia de Saída 92
4.5.12 Integração com Tecnologias Avançadas e Produção de Proteína Animal 92
5 CONCLUSÕES 98
5.1 Restrições e Limitações 100
5.2 Sugestões para pesquisas posteriores 100
6 REFERÊNCIAS 103
Apêndice A 108
Apêndice B 110

NOMENCLATURA

LISTA DE ABREVIATURAS

Ac	Ácido
APPs	Áreas de Preservação Permanente
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicombustíveis
ATR	Açúcar Total Recuperado
CBR	Biorefinarias Convencionais
CCT	Corte Carregamento e Transporte
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CSLL	Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DOE	*United States Department of Energy*
EE	Energia Elétrica
EG	Etilenoglicol
EME	Evaporadores de Múltiplos Efeitos
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
FEL	*Front End Loading*
FOB	*Free on Board*
GBR	Biorefinarias Verdes
GEE	Gases de Efeito Estufa
GS	Gás de Síntese
IPA	*Independent Project Analysis*
IRPJ	Imposto de Renda Pessoa Jurídica
LCFBR	Biorefinaria de Lignocelulose
MBR	Biorefinarias aquáticas
MEG	Monoetileno glicol
MTBE	*Methyl Tert-butyl ether*
NREL	*National Renwable Energy Laboratory*
PECEGE	Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas
PG	Propilenoglicol
PHB	Polihidroxibutirato
PIS	Programa de Integração Social
PLA	Poli Ácido Lático
PMBOK	*Project Management Body of Knowlwdg*
PMI	*Project Management Institute*
PNNL	*Pacific Northwest National Laboratory*
PR	Paraná
PVC	Cloreto de Polivinila
RASF	Resíduo Asfáltico
RPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
STAB	Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil

TCBR	Biorefinarias Termoquímicas
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TPCBR	Biorefinaria de Duas Plataformas
VPL	Valor Presente Líquido
WCBR	Biorefinaria de Cereais

Siglas

MMUS$	Milhões de dólares
TCD	Toneladas de cana por dia t.cana.$d^{(-1)}$
Regiões de expansão	Mato Grosso do Sul, MG, GO e Oeste Paulista
RPM	Rotações por minuto
^{o}GL	Concentração de etanol em base volumétrica
MWe	Energia elétrica em MW
“	Quando acompanhado das dimensões da moenda tem o significado de polegadas.

INTRODUÇÃO

O uso dos combustíveis fósseis impulsionou a humanidade a desenvolver um parque industrial capaz de ofertar energia e produtos que moldam o nosso estilo de vida. Com o crescimento da população e o uso cada vez mais intenso de recursos finitos, a nossa sociedade vive um momento de reflexão sobre as mudanças necessárias para um mundo mais sustentável.

Entre tais mudanças, destaca-se a necessidade de estabilizar ou mesmo reduzir as emissões dos gases de efeito estufa. Isto conflita com o atual modelo energético dos países desenvolvidos e com a demanda crescente de energia dos países em desenvolvimento.

Nesse contexto, as biorefinarias, complexos industriais que utilizam produtos renováveis como fonte de matéria-prima para a produção de combustíveis e de outros produtos essenciais para a manutenção da qualidade de vida moderna, surgem como alternativas promissoras.

Na literatura, podemos encontrar diferentes categorias de biorefinaria. Segundo Ree e Annevelink (2007), a literatura classifica sete diferentes categorias de biorefinarias:

- Biorefinarias convencionais ou *Convencional biorefineries* (CBR): utilizam as tecnologias tradicionais para processamento da biomassa obtendo os diferentes subprodutos. As atuais usinas de açúcar e etanol, indústrias de papel e celulose, complexo da soja, usinas de milho podem ser exemplos de CBR;
- Biorefinarias Verdes ou *Green Biorefineries* (GBR): utilizam biomassa fresca e, através de processos de pressurização da biomassa úmida, aproveitam o caldo e a torta. É mais estudada para gramíneas;
- Biorefinarias de Cereais ou *Whole Crop Biorefineries* (WCBR): utilizam cereais como milho, trigo, e centeio para a produção de um portfólio de produtos;

- Biorefinaria de Lignocelulose ou *Ligno Cellulosic Feedstock Biorefinaries* (LCFBR): as Biorefinarias de Lignocelulose se baseiam no fracionamento de biomassa rica em lignocelulósicos para a produção de correntes intermediárias de celulose, hemicelulose e lignina, que podem ser posteriormente processadas para obtenção de um portfólio de produtos finais;
- Biorefinarias de Duas Plataformas ou *Two Platform Concept Biorefineries* (TPCBR): promovem o fracionamento da biomassa em frações de açúcares (celulose e hemicelulose) e lignina. A fração de carboidratos é bioquimicamente convertida através da chamada “Plataforma de Açúcar”, produzindo um portfólio de potenciais bioprodutos, enquanto a fração de lignina e os resíduos do processo bioquímico serão termoquimicamente convertidos a gás de síntese através da chamada “Plataforma de Gás de Síntese”, produzindo uma gama de produtos biobaseados, incluindo calor e energia para satisfazer as demandas internas do processo;
- Biorefinarias Termoquímicas ou *Thermo Chemical Biorefinaries* (TCBR): utilizam processos térmicos como a pirólise e a gaseificação para gerar um grande portfólio de produtos. A partir da geração do gás de síntese é possível gerar produtos como uréia, metanol, amônia, diesel, etc. Essa rota pode ter sinergias com os combustíveis fósseis;
- Biorefinarias Aquáticas ou *Marine Biorefinaries* (MBR): realizam o processamento de biomassa aquática, como as micro e macroalgas.

É possível constatar que, embora existam diferentes categorias de biorefinarias na literatura, quase todas elas podem ser agrupados de acordo com a matéria-prima que processam (verdes, cereais, lignocelulósica e aquática) ou com as tecnologias utilizadas (termo-química ou bioquímica).

Na medida em que as tecnologias amadurecerem, poderemos analisar as biorefinarias de forma similar às atuais refinarias. Uma refinaria de petróleo utiliza um conjunto de tecnologias de separação e conversão que permitem ao refinador trabalhar com diferentes tipos de petróleos para produzir diversos derivados. As refinarias que

possuem a maior margem de refino são aquelas que têm flexibilidade para trabalhar com petróleos de menor valor gerando os produtos mais nobres.

Apesar de as tecnologias de hidrólise e gaseificação de biomassa ainda não estarem em escala comercial, é possível desenvolver biorefinarias convencionais que contemplem facilidades para a inserção futura destas novas tecnologias. Neste contexto, as usinas de açúcar e etanol, fábricas de celulose e papel e esmagadoras de óleos vegetais se destacam como instalações que naturalmente seriam os embriões das biorefinarias convencionais.

1.1 Objetivo

Este trabalho busca prospectar algumas possibilidades de como implantar uma usina para que a mesma seja parte de uma biorefinaria convencional, contendo facilidades que permitam a futura introdução das tecnologias avançadas.

Os principais objetivos que nortearam este trabalho foram:

a) Verificar os produtos mais promissores para o estabelecimento de uma cadeia de maior valor agregado com base na biomassa;
b) Verificar se uma usina é uma plataforma adequada para uma biorefinaria;
c) Verificar os requisitos que uma usina deve ter para que sirva de plataforma para a construção de uma biorefinaria;
d) Estudar as alternativas de modulação dos investimentos visando estabelecer uma seqüência adequada à implantação de uma biorefinaria;
e) Sistematizar o fluxo de informações necessárias para a identificação de oportunidade de implantação de uma biorefinaria;
f) Realizar o estudo de caso de uma biorefinaria;

1.2 Metodologia

Para realização deste trabalho, além do estudo da literatura disponível, foram consultados fabricantes de equipamentos, empresas de projetos e usinas de açúcar e etanol. Além disso, foram desenvolvidas ferramentas em uma planilha para quantificação de aspectos técnicos e econômicos.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro, foi apresentada uma breve contextualização do cenário atual incluindo o conceito das biorefinarias. Ainda neste capitulo temos a estrutura do trabalho. No segundo capitulo, foram exploradas as etapas para implantação de uma biorefinaria. Nessa fase, foi dada uma ênfase especial as alternativas de produtos que podem servir de blocos de construção para uma cadeia de produtos com base em biomassa. No capitulo três, foram discutidos os fatores de competitividade que fornecem subsídio para análise de identificação de oportunidade de implantação de uma biorefinaria. No capitulo quatro, foi desenvolvido um estudo de caso para implantação de um complexo que visa à produção de etanol, açúcar, energia elétrica, levedura, ácido cítrico, lisina e PHB (polihidroxibutirato). Além dos produtos informados, a planta ainda fornece utilidades para uma unidade de extração de óleo de soja com uma planta de biodiesel integrada. Por fim, no Capitulo 5 foram apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 ETAPAS DA IMPLANTAÇÃO DE UMA BIOREFINARIA

Este capítulo buscou averiguar, de forma sucinta, as informações mais relevantes que precisam ser verificadas na fase de Identificação da Oportunidade da implantação de uma biorefinaria.

O planejamento e a implantação de empreendimentos industriais constituem atividades bastante complexas, sendo que, no caso das biorefinarias, a complexidade aumenta com o número de matérias-primas utilizadas, de processos e de produtos previstos.

Em virtude de inúmeras experiências bem e mal sucedidas no passado, os profissionais envolvidos com empreendimentos buscaram estabelecer padrões de condução das diferentes fases de projeto, de forma a aumentar a chance de sucesso na implantação dos mesmos. Essas práticas foram compiladas pelo Project Management Institute (PMI) na forma de um guia, chamado de Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos, ou Guia PMBOK (*Project Management Body of Knowledg*).

As fases de um projeto sugeridas pelo *Independent Project Analysis* (IPA[1]) são os *Front End Loading* (1, 2 e 3), que caracterizam o planejamento do projeto, seguidos de execução e operação. O *Front End Loading* (chamado de FEL) é o período entre a identificação de uma oportunidade de negócio e o momento da autorização do desembolso para execução do projeto. Basicamente, as fases do *Front End Loading* são as fases do planejamento do empreendimento, nas quais é definido o que será feito, por quem, quando e com que recursos. Na fase de implantação do projeto, ocorre a realização do planejado e, devido aos processos de aquisição de equipamentos, é onde ocorre a maior parte dos desembolsos. Dessa forma, com a realização do planejamento se busca a redução dos riscos de mudanças na fase de execução, cujos custos são muito elevados.

Embora o maior desembolso ocorra na fase de implantação, o maior impacto na rentabilidade do negocio está na fase de planejamento, seguindo uma tendência similar a da curva apresentada na Figura 1 (PETROBRAS, 2005).

Considerando o pequeno investimento relativo e o grande impacto econômico envolvido na etapa de planejamento, é recomendado que esta etapa seja realizada da melhor maneira possível. Com base nisso, este trabalho focou nas informações técnicas que fornecem subsídios para elaboração da etapa de identificação de oportunidade de construção de uma biorefinaria.

[1] *Independent Project Analysis*. Disponível em <http://www.ipaglobal.com/>. Acesso em: 15 de setembro de 2010.

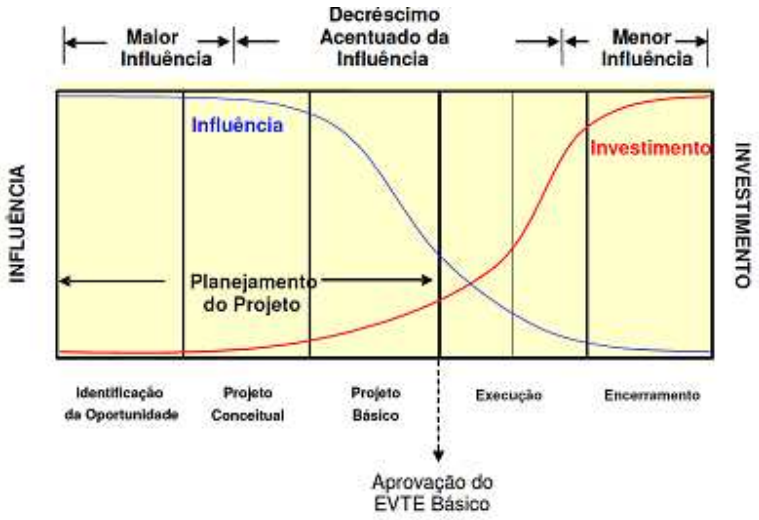

Figura 1: influência e investimento nas diferentes fases de planejamento de um projeto. Fonte: Petrobras (2005).

Cada uma das fases do projeto é marcada pela entrega de um ou mais produtos (*deliverables*), como estudos de viabilidade, que caracterizam o fim de uma fase e o início da outra. Cada indústria apresenta diferentes fases específicas para seus projetos, sendo que muitas têm suas fases detalhadamente descritas em padrões.

Com base na experiência de projetos de refino e petroquímica, sugerem-se as seguintes entregas para a fase de identificação de oportunidade:

- Definição dos produtos e especificações;
- Localização da Planta;
- Estratégia de suprimentos de matéria-prima;
- Capacidade de produção das unidades (filosofia de operação);
- Características da planta;
- Data de entrada em operação;
- Identificação de interface com outros empreendimentos;
- Premissas comerciais para produtos e matérias-primas;
- Estimativa preliminar de custos e cronogramas de implantação;
- Modelo Societário;
- Análise econômica e financeira;
- Estratégia de saída do negócio.

Evidentemente, a implantação de uma biorefinaria é um trabalho complexo e multidisciplinar que requer a atuação de vários profissionais. Nesse contexto, este trabalho visa analisar, de forma prospectiva, alguns aspectos relacionados com a implantação de uma biorefinaria. Das entregas acima, a escolha dos produtos, o suprimento das matérias-primas e as características da planta são críticas e por isso serão abordadas em maior profundidade.

2.1 Análise prospectiva dos produtos e matérias primas

A escolha dos produtos que serão produzidos no complexo depende de muitos fatores que devem ser contemplados em um estudo consistente de mercado. Esta decisão afeta as demais, pois influencia a decisão sobre as matérias-primas que serão utilizadas, as características tecnológicas dos processos, localização do empreendimento, entre outras.

Um dos fatores com alta relevância na escolha dos produtos é o alinhamento com os interesses estratégicos dos investidores. De forma ilustrativa, na agroindústria da cana-de-açúcar podemos diferenciar alguns grupos de investidores:

- Usineiros tradicionais: interessados em levar agregação de valor ao negócio. Em alguns casos, possuem restrição de capital e, em função disso, podem ser pouco propensos à utilização de tecnologias mais avançadas;
- Grupos oriundos do setor de alimentos: interessados principalmente nos diferentes tipos de açúcar, melaço, leveduras, produtos para ração animal;
- Empresas de Energia: interessadas na produção de etanol (anidro, hidratado), biodiesel e energia elétrica;
- Empresas Químicas e Petroquímicas – interessadas em produtos derivados da alcoolquímica e sucroquímica, como polietilenos, acetato de etila, PHB entre outros.

Essas categorias, contudo, não são rígidas, pois uma biorefinaria pode contemplar produtos de interesse de diversos grupos, podendo utilizar diferentes matérias-primas, como soja, milho, sorgo, madeiras, entre outras disponíveis na região do complexo para conseguirem, de forma rentável, a gama de produtos que desejam.

Mesmo quando o foco do complexo for a produção de energia, quando existe economia de escopo, a geração de outros produtos de maior valor agregado contribui para o aumento da margem de lucro da unidade, melhorando a competitividade do empreendimento.

Segundo Zoebelin (2007 *apud* BORGES, 2010), atualmente cerca de 3,5% da biomassa do mundo é destinada para fins não alimentícios. Existem alguns fatores que dificultam a utilização da biomassa para fins químicos e energéticos. Enquanto no setor alimentício ela é soberana, no setor químico e energético sofre a concorrência de outras fontes como o petróleo, o gás natural e o carvão. Além disso, outros fatores dificultam o uso não alimentício da biomassa: em geral, possui baixo conteúdo energético, sua disponibilidade ocorre, muitas vezes, em locais carentes de mão-de-obra especializada, pode ser perecível e, frequentemente, é ofertada de forma sazonal. Esses fatores limitam a competitividade das matérias-primas renováveis em relação aos seus substitutos fósseis.

Diante do exposto, é importante identificar os produtos que poderiam apresentar vantagens comparativas em relação à cadeia fóssil para serem manufaturados em um complexo agroindustrial. Como hipótese simplificadora, foi considerado que o interesse principal nesta análise são os produtos químicos e energéticos.

Visando a analisar de forma sistêmica as possibilidades de utilização de biomassa para a produção de produtos químicos o *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (DOE)*, em 2002, solicitou ao corpo técnico do *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), em conjunto com o *National Renwable Energy Laboratory* (NREL), a seleção das dez melhores possibilidades de utilização da biomassa para geração de produtos de alto valor agregado e de produtos energéticos em uma biorefinaria.

A primeira tentativa de seleção incluiu o custo de insumos, estimativa de custo de processamento, preços e volumes de mercado, além da relevância para operações atuais ou futuras em biorefinarias. Esse primeiro conjunto de critérios, entretanto, não ofereceu uma diferenciação suficiente entre os candidatos, levando a uma seleção de mais de trezentos produtos (PNNL; NREL, 2004).

Visando a estreitar o número de possibilidades para não mais do que trinta produtos, o grupo utilizou uma metodologia similar a da indústria petroquímica, onde existem cerca de oito ou nove blocos de construção responsáveis pela síntese de quase todos os produtos. No caso da biomassa, foram identificados cerca de 30 produtos que poderiam ser considerados os percussores de uma enorme gama de produtos, os quais constam na Tabela 1.

A Figura 2 e a Figura 3 indicam uma lista de produtos obtidos a partir dos blocos de construção. Para o caso da biomassa temos os derivados do gás de síntese (monóxido de carbono e o hidrogênio) obtidos por rotas termoquímica de matérias-primas lignocelulósicas. Os demais são obtidos a partir de açúcares. Esses açúcares podem ser obtidos por processos de hidrólise, como a celulose, hemicelulose ou amido, ou por processos de extração direta em matérias-primas sacarídeas, como a cana e a beterraba.

Tabela 1 - Trinta candidatos com maior potencial para serem blocos de construção de produtos com base em biomassa.

Número de carbonos	**Candidatos potenciais - Top 30**
1	Monóxido de Carbono e Hidrogênio
2	Nenhum
3	Glicerol, 3-Ácido Hidroxipropriônico, Ácido Lático, Ácido Malônico, Ácido Propiônico e Serina
4	Acetoína, Ácido Aspártico, Ácido Fumárico, 3-Hidroxibutriolactona, Ácido Málico, Ácido Succínico e Treonina
5	Arabitol, Furfural, Ácido Glutamânico, Ácido Itacônico, Ácido Levulínico, Prolina, Xilitol e Ácido Xilônico
6	Ácido Aconítico, Ácido Cítrico, 2,5-Ácido Furandicarboxílico, Ácido Glucárico, Ácido Glucônico, Lisina e Sorbitol

Fonte: PNNL e NREL (2004).

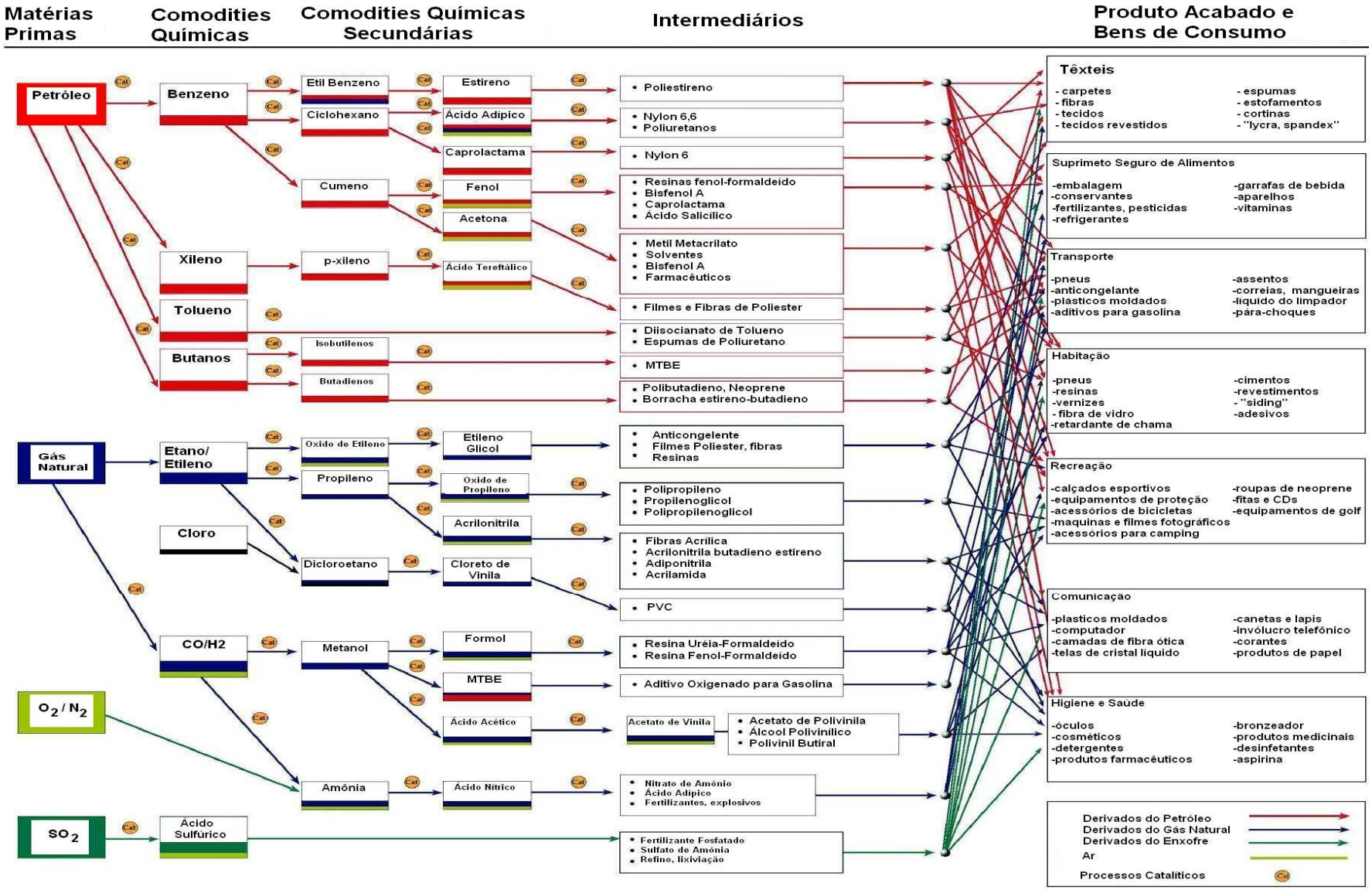

Figura 2: Blocos de Construção da Indústria Petroquímica (PNNL, NREL, 2004)

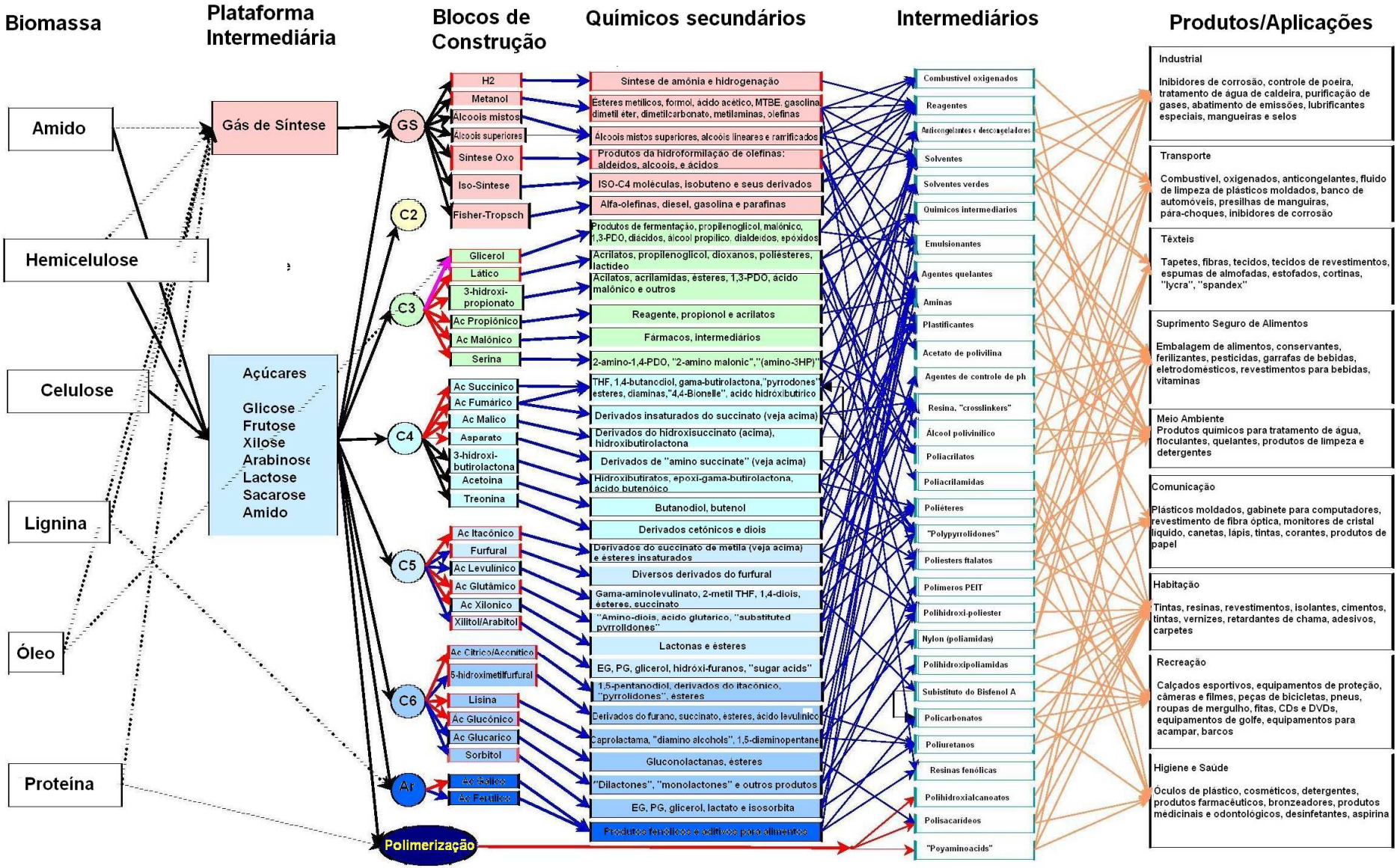

Figura 3: Blocos de construção obtidos da biomassa (PNNL, NREL, 2004)

Considerando que a maioria dos blocos de construção utiliza açúcares, o complexo que utilizar a fonte de açúcares de menor custo e tiver abundância de utilidades, como vapor e energia elétrica, terá maior chance de ser competitivo em relação a outras biorefinarias ou até mesmo em relação à cadeia fóssil.

De acordo com Kamm *et al*. (2006), a sacarose é o açúcar de menor custo no mundo. Além disso, é produzida em mais de 80 países com abundancia próxima de 200 $M.t.ano^{-1}$ (MACEDO, 2005 *apud* SEABRA, 2008). O Brasil, por sua vez, em função da disponibilidade de solo, água e radiação solar é um dos locais do planeta com melhores condições de ofertar açúcares e outras fontes de biomassa de forma competitiva. Isso é evidenciado pela representatividade da biomassa na matriz energética brasileira, liderada pelos produtos da cana e lenha, que representam cerca de 30% (EPE, 2010).

Para a produção de bicombustíveis, é desejável que a biomassa escolhida apresente uma análise de ciclo de vida bastante favorável em relação ao fóssil substituto, exista em abundância suficiente para proporcionar economia de escala e apresente um baixo consumo de outros recursos, como água e fertilizantes.

A cana-de-açúcar, como a maioria das gramíneas, é uma planta C4, assim chamada por formar produtos com quatro átomos de carbono. Estas plantas apresentam uma maior taxa fotossintética e eficiência na utilização do CO_2 (PENARIOL & SEGATO, 2007). Além disso, é uma cultura semiperene, o que reduz os investimentos em plantio, resultando em custos competitivos e em um balanço de carbono favorável.

Com base nos estudos da União Européia de análise de ciclo de vida de bicombustíveis (PARLAMENTO EUROPEU, CONSELHO, 2009), resumidos na Tabela 2, podemos visualizar que, das alternativas que atualmente são comerciais, o etanol de cana de açúcar é um dos biocombustíveis com maior potencial de redução de gases de efeito estufa (GEE), sendo superado apenas pelos produtos que utilizam como matéria-prima os resíduos da pecuária, como o estrume e o sebo.

Tabela 2 - Redução típica de gases de efeito estufa em relação ao combustível fóssil de referência dos diferentes bicombustíveis.

Bicombustível	Redução Típica
Biodiesel de soja	40%
Biodiesel de colza	45%
Óleo de colza hidrotratado	51%
Etanol de trigo (gás natural em co-geração)	53%
Etanol de milho (gás natural em co-geração)	56%
Biodiesel de girassol	58%
Etanol de beterraba sacarina	61%
Biodiesel de óleo de palma (processo com captura de metano na produção de óleo)	62%
Óleo vegetal, tratado com hidrogênio, de girassol	65%
Óleo vegetal, tratado com hidrogênio, de óleo de palma (processo com captura de metano na produção de óleo)	68%
Etanol de trigo (palha como combustível de processo em central de co-geração)	69%
Etanol de cana-de-açúcar	71%
Biogás produzido a partir de estrume seco, como gás natural comprimido	86%
Biodiesel de sebo	88%

Fonte: Parlamento Europeu, Conselho (2009)

Além do alto potencial de redução de GEE do etanol produzido através da fermentação da sacarose, a cana-de-açúcar ainda oferta uma grande quantidade de bagaço e palhiço, que podem servir como combustível ou matéria-prima para outros produtos.

Com base no exposto, uma usina seria uma plataforma promissora para implantação de processos de biorefino. A cana, além de ofertar açúcar a baixo custo, também possui abundância de fibra lignocelulósica. A fibra pode ser utilizada diretamente como combustível, convertida em gás de síntese ou em açúcares para ser utilizada como bloco de construção para químicos intermediários.

Esta característica tem despertado o interesse de diversas empresas, como a americana Amyris[2], que adotou a sacarose de cana como base para o desenvolvimento de uma gama de produtos com base em biologia sintética.

Diferente de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, um projeto de investimento deve ser implantado com tecnologias comerciais e, de preferência, com produtos com baixo risco de mercado.

[2] Disponível em < http://oglobo.globo.com/economia/mat/2010/07/20/diesel-de-cana-estara-no-brasil-em-2011-diz-amyris-917196978.asp>. Acesso em 20 de julho de 2010.

Visando a aumentar a sensibilidade com relação a riscos de mercado, foram analisados os seis produtos que poderiam ser produzido com biomassa que tiveram maior impacto na balança comercial do Brasil no ano de 2010 (Tabela 3).

Tabela 3 - Produtos que poderiam ser produzidos pela biomassa com maior impacto na balança comercial brasileira (dados de janeiro a setembro de 2010).

Produto	Impacto Balança (MMUS$)[1]	Quantidade Importada / (t)	Valor Médio (US$/t)[2]	Rota Tecnológica[3]
Diesel	-3.442	5.674.546	665	Termoquímica
Querosene de Aviação	-746	1.113.255	685	Termoquímica
Uréia	-395	1.499.230	265	Termoquímica
Metanol	-124	407.175	304	Termoquímica
Etilenoglicol	-83	122.905	765	Alcoolquímica
Borrachas de Butadieno	-78	44.041	2.556	Alcoolquímica

1 – Fonte: Sistema AliceWeb. Dados de janeiro a setembro de 2010. Disponível em <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>. Acesso em 15 de outubro de 2010.
2 - Valor médio calculado pela razão do valor do saldo pelo volume comercializado.
3 - Rota tecnológica para produção deste insumo utilizando biomassa como matéria-prima.

Conforme observado na Tabela 3, o Brasil é importador de vários produtos que poderiam ser obtidos por rotas termoquímicas e alcoolquímica. A seguir, serão analisadas as particularidades das rotas termoquímica, alcoolquímica e sucroquímica.

2.2 Rota Termoquímica

Diversos produtos podem ser obtidos por via termoquímica através da gaseificação e conversão da biomassa em uma mistura, chamada de gás de síntese, constituída de monóxido de carbono e hidrogênio.

Além da biomassa, o gás de síntese pode ser obtido comercialmente pela reforma a vapor ou gaseificação de gás natural, carvão, coque de petróleo ou outros hidrocarbonetos pesados de baixo valor. Para ter sucesso nas rotas termoquímicas é desejável que a biomassa tenha baixa umidade, para facilitar os processos de gaseificação, escala e custos competitivos com os combustíveis fósseis.

O processo de produção de hidrocarbonetos, uréia e metanol a partir do gás de síntese são tecnologias comercias. A África do Sul vem produzindo

hidrocarbonetos de gás de síntese desde 1950 (SEABRA, 2008). O Brasil possui diversas plantas de fertilizantes que utilizam o gás natural como matéria-prima. A produção de fertilizantes por meio de tecnologia de gaseificação tem como exemplo a Fosfértil, em Araucária (PR), que utiliza RASF (Resíduo Asfáltico) da Repar (Refinaria Presidente Getulio Vargas) para a produção de uréia e amônia.

Seabra (2008) estudou a integração de uma usina autônoma de 2.000.000 t.cana/safra com uma planta de gaseificação para produção de combustíveis (diesel e gasolina) via reação de *Fischer Tropsch*, dimetil ester e etanol. Nesse estudo, considerou a recuperação de 40% da palha a um custo de 30R$/t de biomassa seca, chegando à conclusão que a produção de combustíveis por rotas termoquímicas pode ser uma alternativa economicamente interessante quando integrada a uma usina de etanol.

Apesar da possibilidade de parte da demanda por diesel, metanol e fertilizantes ser suprida pela gaseificação de bagaço e palha de cana-de-açúcar, a tecnologia de gaseificadores de biomassa ainda não está comercial. Segundo Seabra (2008), os seguintes pontos carecem de um amadurecimento tecnológico:

- Sistema de alimentação de biomassa com baixo consumo de energia para gaseificadores de alta pressão;
- Operação confiável e prolongada em escala comercial de gaseificadores pressurizados com injeção de oxigênio;
- Sistemas de limpeza de gás que possibilitem o craqueamento completo do alcatrão;
- Intensa integração de processo para permitir a maximização da recuperação de calor.

Além disso, a análise da balança comercial facilitou a percepção de um aspecto importante dos produtos obtidos pelas rotas termoquímicas: a grande maioria são *commodities* com alta concorrência da cadeia fóssil.

Com base nas dificuldades tecnológicas e na competição com os fósseis, apesar da grande flexibilidade de opções de produtos obtidos via gás de síntese, o monóxido de carbono e o hidrogênio não foram escolhidos, no estudo do NREL e PNLL, entre os doze mais promissores (PNNL, NREL, 2004).

É importante ressaltar que, embora as rotas termoquímicas para produção de combustíveis a partir de biomassa ainda não estejam maduras, podemos esperar

um rápido avanço no desenvolvimento das mesmas. Considerando que alguns gargalos tecnológicos são comuns à cadeia fóssil, poderemos ter a participação de grandes empresas acelerando o amadurecimento dessas tecnologias. A Shell, por exemplo, já possui tecnologia de gaseificação de carvão, e, em 2010, anunciou sua participação no grupo Cosan.

Com vistas à integração da cadeia fóssil com a de biomassa, o United States Department of Energy (DOE) patrocina um programa chamado “Vision 21” com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de uma planta modular capaz de produzir energia elétrica, calor, combustíveis e matérias primas a partir de diversos insumos como carvão, petróleos pesados, gás natural, biomassa e resíduos, sem emitir poluentes locais e utilizando seqüestro de carbono para diminuir a emissão de gases de efeito estufa (CGEE, 2010). A

Figura 4 mostra um desenho típico deste tipo de instalação.

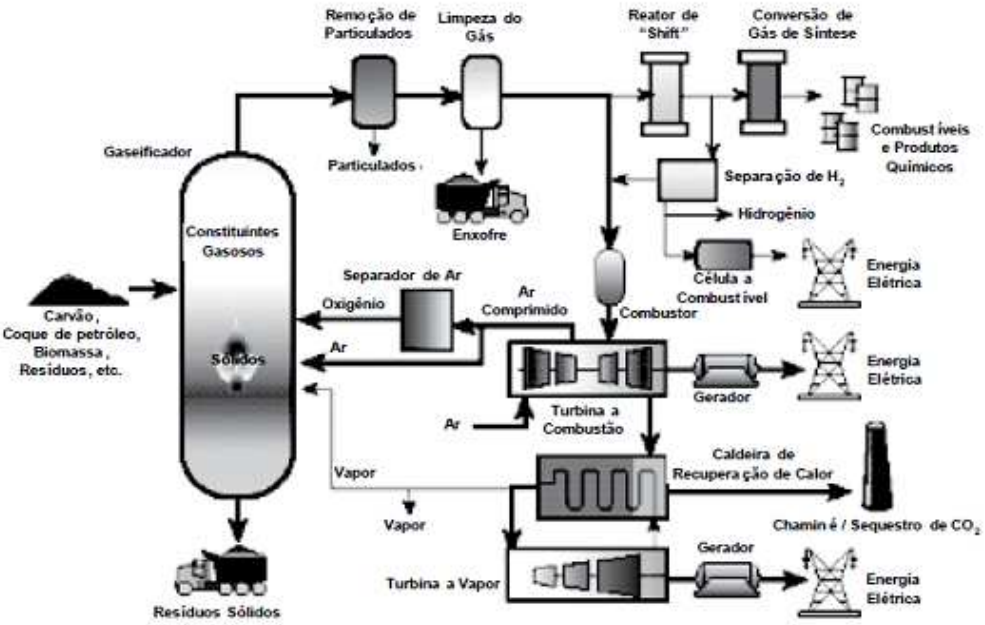

Figura 4 - Possível esquema de uma planta de gaseificação integrando a cadeia fóssil com a de biomassa para a produção de energia, combustível e produtos químicos (CGEE, 2010).

Sem que as dificuldades tecnológicas de implantar um gaseificador de alta pressão operando com biomassa estejam superadas e, considerando a forte competição com os fósseis de baixo custo, é pouco provável que um investidor realize um investimento de bilhões de reais para a construção de um complexo de produção de fertilizantes, metanol ou hidrocarbonetos com base em biomassa. Dessa forma, podemos esperar que parte da demanda de diesel, querosene, uréia,

metanol e amônia virá da implantação de novos complexos que utilizem combustível fóssil.

Esse processo já está em andamento. Conforme recentes anúncios na imprensa, a Petrobras planeja a construção de um complexo de fertilizantes no Município de Três Lagoas, no Mato Grosso do Sul. Essa planta teria capacidade de cerca de um milhão de toneladas de uréia por ano e reduziria quase à metade as importações de uréia[3]. Na área de refino, considerando os projetos em implantação pela Petrobras, a instalação das refinarias do Rio de Janeiro e Pernambuco levariam à autossuficiência em diesel. Com a entrada em operação da refinaria no Maranhão, o país poderia passar a ser exportador de derivados médios.

Com base no exposto, a usina, na sua fase de instalação, não teria rotas termoquímicas associada, salvo quando este processo atingir um grau de maturidade maior. O requisito para instalação de rotas termoquímicas, no futuro, será a disponibilidade de matérias lignocelulósicas na usina, como bagaço, palha ou lenha oriunda de florestas energéticas.

2.3 Rotas Sucroquímica e Alcoolquímica

Excluindo o gás de síntese, os demais blocos de construção utilizam o açúcar como base para a produção de produtos químicos. Ainda na etapa de análise preliminar é preciso conhecer o nível de maturidade de cada tecnologia antes de partir para um estudo mais consistente de mercado.

A Tabela 4 contempla as rotas comerciais dos produtos indicados pelo PNLL, NREL (2004) como promissores para o desenvolvimento de uma economia com base em biomassa. O etanol foi adicionado nessa tabela por ser um produto de baixo custo no Brasil com vocação para o desenvolvimento da alcoolquímica.

A alcoolquímica foi implantada no Brasil no passado e praticamente desapareceu com a consolidação das petroquímicas. Atualmente em função da

[3] Disponível em <http://portalexame.abril.com.br/ae/economia/ms-doa-imovel-fabrica-fertilizantes-petrobras-1214563.shtml> . Acesso em 15 de outubro de 2010.

maior conscientização ambiental diversas iniciativas estão surgindo no Brasil e no mundo.

Entrou em operação este ano o projeto de produção de polietilenos a partir de etanol da Braskem em Triunfo no Rio Grande do Sul[4]. A Solvay também tem demonstrado interesse na utilização de eteno oriundo de etanol para a produção de PVC e a Rhodia atualmente produz e exporta acetato de etila (CGEE, 2010).

No estudo conduzido pelo Centro de Estudos Estratégicos (CGEE, 2010) foram destacadas diversas tecnologias consideradas promissoras, entre elas, a produção de propeno, ácido acético, butanol e 1,2 butadieno.

Das tecnologias comerciais no país podemos citar que as produções de eteno, ácido acético e acetato de etila a partir de etanol já são tecnologias maduras.

O eteno de etanol é uma tecnologia consolidada, que já foi empregada no passado, antes da consolidação da indústria petroquímica no país, e que tem sido retomada em empreendimentos recentes. Todavia, vale destacar que o eteno não é uma molécula simples de transportar e, por isso, é transformado logo após a sua geração. Neste caso, a usina que produzir eteno teria que adicionar ao processo unidades de produção de polietileno, PVC, etilenoglicol ou outro derivado do eteno com maior facilidade de transporte.

Outra alternativa, que foi adotada pela Braskem, por exemplo, é transportar o etanol até uma petroquímica, na qual o eteno é gerado e transformado em produtos de maior valor agregado.

O ácido acético era produzido, no passado, via oxidação do acetaldeído que era derivado de etanol. Na década de 80, toda a demanda de ácido acético era produzida desta forma. Esta rota é pouco competitiva e, com o fechamento das unidades, o país passou a ser importador de ácido acético (CGEE, 2010). Esforços de pesquisa estão sendo empreendidos para produção de ácido acético em um único reator, todavia esta tecnologia ainda é considerada embrionária.

O acetato de etila também pode ser produzido de diferentes maneiras utilizando o etanol como matéria-prima. Atualmente é produzido no Brasil pela reação do ácido acético com o etanol. Esta rota exige o uso de ácido acético que, conforme já foi comentado, atualmente é importado. As alternativas mais competitivas são aquelas que utilizam somente um reator, podendo ser via rota

[4] Disponível em <http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=41247>. Acesso em 25 de setembro de 2010.

oxidativa ou desidrogenativa. Entre estas rotas, a via desidrogenativa é a única considerada madura (CGEE, 2010).

Tabela 4 - Rotas comerciais para produção de químicos em uma usina.

Produtos[1]	**Numero de Carbonos**	**Rotas Comerciais[2]**	**Considerada Promissora no Brasil pelo CGEE[3]**	**Produção no Brasil em Usinas[4]**
Etanol[5]	2	X	x	X
3-Ácido Hidroxipropiônico	3			
Glicerol	3	X		
Ácido Lático	3	X	x	
Ácido Malônico	3			
Ácido Propiônico	3			
Serina	3	X		
3-Hidróxibutriolactona	4			
Acetoína	4			
Ácido Aspártico	4			
Ácido Fumárico	4			
Ácido Málico	4			
Ácido Succínico	4			
Treonina	4	X		
Arabinitol	5	X		
Furfural	5	X		
Ácido Glutamânico	5	X		
Ácido Itacônico	5	X	x	
Ácido Levulínico	5			
Xilitol	5	X		
2,5-Ácido Furancicaboxílico	6			
Ácido Aconítico	6			
Ácido Cítrico	6	X	x	X
Ácido Glucárico	6			
Ácido Glucônico	6	X		
Lisina	6	X		X
Sorbitol	6	X		X
PHB	n	X	x	X

Fontes: 1 e 2 - NREL e PNLL (2004);
3 - Com base no numero de artigos e patentes foram consideradas como rota promissora para o país pelo CGEE (2010).
4 - Seabra (2008).

Embora não conste na Tabela 3, o Brasil gastou cerca de 36MMUS$ de Janeiro a Setembro de 2010[5] com importação de ácido acético. A produção de acetato de etila diretamente, sem a necessidade de utilização do ácido acético como insumo, poderia gerar benefícios para a balança comercial do país.

Continuando a análise das possibilidades da cadeia alcoolquímica, chama a atenção o impacto na Balança Comercial do MEG (monoetileno glicol) e das borrachas de butadieno.

Além do etanol, foi adicionado na Tabela 4 o polihidroxibutirato, ou PHB. Apesar do baixo numero de patentes e artigos, uma consulta aos especialistas da área indicou esse produto como promissor para o país pelo fato de ser biodegradável e pela possibilidade de competição com polímeros petroquímicos (CGEE, 2010).

Analisando a Tabela 4, verificamos que já existem diversas alternativas comerciais para o desenvolvimento de biorefinarias especializadas na produção de químicos. Algumas dessas alternativas, como o ácido cítrico, lisina e sorbitol, já estão em produção no Brasil.

A escolha de quais seriam os produtos mais interessantes foge ao escopo deste trabalho, pois passa pela avaliação das alternativas comerciais de produção dos químicos secundários, pela análise de competitividade, pela busca de parceiros tecnológicos e comerciais, entre outros fatores.

Mesmo sem definir um produto alvo, é possível identificar, de forma prospectiva, alguns requisitos que uma usina deve ter para que a mesma seja uma plataforma adequada para implantação de uma biorefinaria.

A análise dos fatores de competitividade de uma biorefinaria é importante para fornecer o subsídio adequado às demais informações necessárias a elaboração dos estudos de Identificação de Oportunidade de Instalação de uma biorefinaria. Tal análise é compreendida no Capítulo três a seguir.

[5] Sistema AliceWeb. Dados de janeiro a setembro de 2010. Disponível em <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>. Acesso em 15 de outubro de 2010.

3 ANÁLISE DOS FATORES DE COMPETITIVIDADE DE UMA BIOREFINARIA

Conforme discutido no capítulo anterior, existem inúmeras possibilidades de arranjos de biorefino. Evidentemente, algumas tecnologias irão se destacar e prevalecer. No caso da uma usina ser a plataforma para adição dos demais processos, o impacto da escolha das tecnologias na competitividade da empresa deve ser avaliado.

Ely (2009) buscou estudar as possibilidades de diversificação das usinas, visando um aproveitamento de excedentes de bagaço nos seguintes aspectos:

- Economia de escala (modularidade);
- Economia de escopo;
- Diversificação;
- Diferenciação;
- Flexibilidade.

A seguir, serão discutidos os conceitos de cada um desses aspectos, considerando a construção de uma usina como plataforma para uma biorefinaria.

3.1 Economia de escala

De maneira simplificada, é possível afirmar que temos economia de escala quando é menos custoso aumentar a produção em uma planta do que aumentar a oferta do produto final em outra unidade.

Conforme indicado na Tabela 5, podemos verificar que a cana-de-açúcar responde por cerca de 62% dos custos dos produtos de uma usina e, por isso, é o insumo mais importante para se analisar o impacto da escala.

Tabela 5 - Custos de produção agroindustrial do processamento de cana-de-açúcar na região de expansão (XAVIER, 2009).

Item	R$/t	%
Custo da Cana	44,64	61,8
Custo Industrial	20,42	28,3
Custo Administrativo	7,18	9,9
Total	72,25	100

Quando uma usina aumenta a capacidade de moagem aproveita melhor a mão de obra industrial e os custos administrativos, que são os custos fixos da unidade. Este efeito, entretanto, pode ser anulado caso ocorra um aumento no valor da matéria-prima.

O custo da cana-de-açúcar, por sua vez, é impactado por diversos fatores, sendo os principais listados abaixo:

- Custo de colheita, incluindo o corte, carregamento e transporte (CCT);
- Custo de tratos culturais de soqueira;
- Custo de remuneração da terra;
- Custo de formação do canavial.

Para avaliarmos o efeito da economia de escala, será analisado, qualitativamente, o impacto do aumento do processamento de cana-de-açúcar em uma unidade com relação aos custos mais importantes.

O primeiro aspecto a ser avaliado é a fonte da matéria-prima que será utilizada para aumentar o processamento da unidade. Existem duas possibilidades: aumentar a aquisição de cana-de-açúcar de fornecedores ou produzir mais cana própria.

No caso de fornecedores, cujos contratos de fornecimento são regidos pelo Consecana, o preço pago pela cana-de-açúcar já contratada é o mesmo que será pago pela ampliação do fornecimento. O preço da cana que será pago ao produtor no contrato Consecana, depende, basicamente, dos preços do etanol e do açúcar que definem o valor do ATR (açúcar total recuperado). De acordo com a quantidade de ATR da cana entregue será definido o valor a ser pago pelo fornecimento.

Com base neste modelo de contrato, podemos afirmar que o preço da cana será definido por fatores externos ao custo agrícola. Neste caso, qualquer elevação nos custos de produção da cana será refletida nas margens do produtor.

Dos fatores de custo de produção, aquele que está diretamente relacionado com a distância é a colheita de cana. Analisando uma composição típica de custos de produção de cana-de-açúcar, verificamos que o impacto da colheita no custo é expressivo (Figura 5).

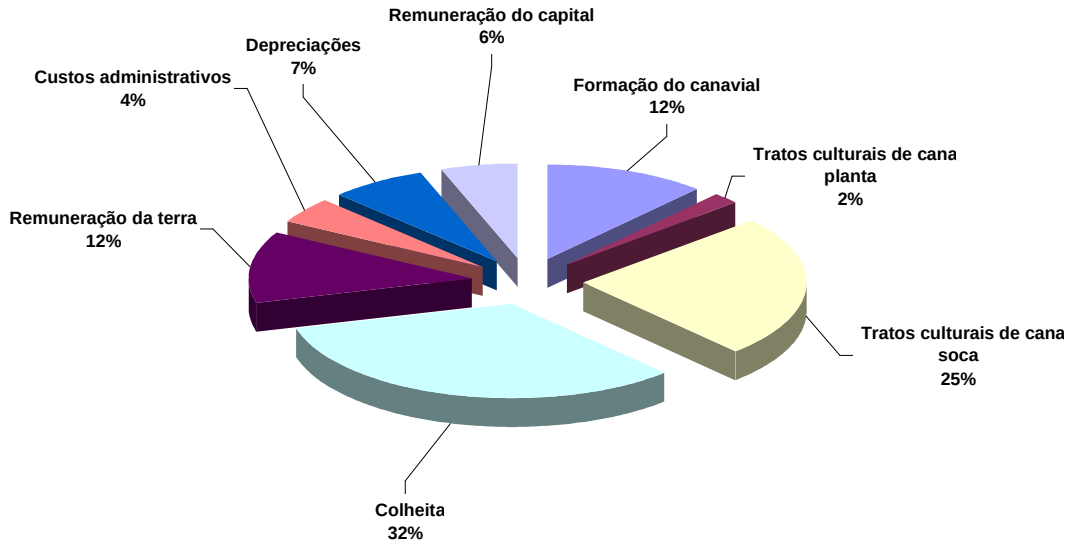

Figura 5 - Composição do custo de produção de cana-de-açúcar na região de expansão (Xavier, 2009).

Nesse caso, a distância do fornecedor à usina é preponderante para garantir a rentabilidade desse fornecedor. Quanto maior for a distância entre a fazenda e a usina, menor será a margem de lucro obtida na produção.

Para aumentar a oferta de cana própria a usina terá que arrendar ou adquirir novas terras. Considerando o arrendamento como hipótese simplificadora, se as novas terras estiverem a uma distância maior do que a distância média das propriedades fornecedoras, o custo de colheita aumenta. Também deve ser ponderado se as novas áreas estarão dentro do raio de abrangência do atual projeto de distribuição de vinhaça, se a produtividade esperada é compatível com a atual, se existe facilidade de mecanização, se a cultura existente possibilita a formação do canavial a baixo custo, a proximidade da água, entre outros aspectos.

Todos estes valores podem ser quantificados e utilizados para subsidiar a análise dos diferentes valores de remuneração da terra. Uma política de arrendamento que quantificasse de forma perfeita as características de cada propriedade levaria, idealmente, a um custo de cana própria posta na recepção da usina idêntico para todas as propriedades.

Nesta linha de raciocínio, considerando apenas o fator distância, as terras mais próximas da usina poderiam ter um valor de arrendamento máximo, que seria decrescente com o aumento do raio. Essas terras mais nobres, eventualmente, poderiam até ser adquiridas pela usina. No limite, as terras mais distantes teriam custos de arrendamento tão baixos que a usina não conseguiria mais arrendar. Estas terras seriam, provavelmente, destinadas à produção de cana-de-açúcar para outra usina mais próxima ou para a produção outras culturas com maior potencial de remuneração para os proprietários.

Na medida em que os sistemas de transporte de cana permitem carregar maior quantidade de cana em cada viagem, o raio de influência da usina aumenta, permitindo um maior processamento de cana.

Com base no exposto, pode ser estabelecida uma política de suprimento de cana que determine a remuneração da terra levando em conta as particularidades de cada propriedade e, dessa forma, é de se esperar que uma usina busque ganhos crescentes de escala sempre que tiver sucesso na implantação de suas políticas.

Conforme pode ser verificado na Tabela 6, as usinas vêm aumentando a escala de produção ao longo dos anos.

Tabela 6 - Aumento de capacidade das usinas ao longo do tempo (WALL BAKE, 2009).

Ano	**Capacidade media das plantas novas de etanol / (m3/d)**
<1970	<90
1970-1980	90-120
1980-1990	120-240
1990-2000	240-500
>2000	>500

Esse aumento de capacidade é o resultado de diversos fatores envolvendo ganho de escala na parte agrícola e na industrial.

Desse modo, a determinação da escala ótima de uma usina é complexa. Ela depende muito das particularidades da região, da disponibilidade de terra, do regime

de chuvas, dos tipos de solo, da facilidade de mecanização, da rentabilidade de outras culturas, entre outros fatores.

A análise do tamanho atual das usinas é um indicativo das escalas que têm tido mais sucesso no cenário atual.

Segundo o relatório do PECEGE (XAVIER, 2009), a escala média das usinas localizadas na região de expansão, que contempla as usinas no Mato Grosso do Sul, Triângulo Mineiro, Goiás e Oeste Paulista, está em torno de 13.000 toneladas de cana por dia. Para a região Centro-Sul tradicional, que envolve São Paulo (com exceção do Oeste Paulista), Paraná e Rio de Janeiro, a média está em 11.000 toneladas de cana por dia. Embora exista um pequeno aumento de moagem diária o processamento anual médio é equivalente (cerca de 2.150.000 t.cana/safra) em virtude da safra mais longa nas regiões tradicionais. A Tabela 7 contempla um resumo dos principais indicadores de desempenho agrícola para a safra 2008/2009.

Tabela 7 - Dados técnicos agrícolas: médias da coleta primária de dados das regiões Tradicional, de Expansão e Nordeste - Fornecedores e Usinas

Descrição	Tradicional		Expansão		Nordeste	
	Fornecedor	Usina	Fornecedor	Usina	Fornecedor	Usina
Capacidade diária de processamento (TCD)	11.000		13.000		10.000	
Processamento na safra	2.150.000		2.150.000		1.370.000	
Dias de safra	242		232		188	
Horas de moagem	4.510		4.429		3.628	
Início da safra	21/4/2008		24/04/08		16/09/08	
Fim da safra	18/12/2008		11/12/08		22/03/09	
Eficiência de aproveitamento de tempo	77%		80%		78,7	
Área própria total (ha)	230	19.422	425	12.790	240	16.108
Produtividade (t/ha)	89,31	85,39	84,2	81,13	57	61,71
Cana de ano (%)	13	25	ND[1]	1	0	57
Cortes por ciclo	6	6	5	6	5	6
Raio médio (Km)	25	27	20	22,8	20	20,5
Colheita mecanizada (%)	19	49	55	60	-	9
Utilização de mudas (t/ha)	12	16	14	13,5	13	12,3
Arrendamento (t/ha/ano)	19,3	18,5	12	10,7	6	9,8
ATR (kg/t)	144,3	134,5	141,6	138,5	139	138,9
ATR (R$/kg)	0,2748	0,2782	0,2637	0,2599	0,3256	0,3111

Fonte: Xavier (2009).

1- ND = Não disponível.

Considerando que o raio médio está entre 20km e 30km, foi analisado, de forma simplificada, o tamanho potencial das usinas em virtude do percentual de ocupação de cana nos municípios. Considerando um círculo de raio equivalente ao raio médio, foi determinada a área total disponível para o plantio. Desta área, foi subtraída a área de reserva legal, as áreas de preservação permanente (APPs) e estradas, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise da capacidade da usina em função da densidade de plantio de cana.

Raio	Área Total	Área Agriculturável[1]	Área Disponível de Cana[2]	Cana-de-açúcar	Área Plantada	Produção[3]
km	ha	ha	ha	%	ha	t/safra
20	125.664	90.478	81.430	30	24.429	2.076.472
20	125.664	90.478	81.430	40	32.572	2.768.629
20	125.664	90.478	81.430	50	40.715	3.460.787
25	196.350	141.372	127.235	30	38.170	3.244.487
25	196.350	141.372	127.235	40	50.894	4.325.983
25	196.350	141.372	127.235	50	63.617	5.407.479
30	282.744	203.576	183.218	30	54.965	4.672.062
30	282.744	203.576	183.218	40	73.287	6.229.416
30	282.744	203.576	183.218	50	91.609	7.786.770

1 – Desconto de 20% da área total para reserva legal e 8% para APP.
2 – Desconto de 10% da área agriculturável para logística e outros fins.
3 – Considerando produtividade média de 85t/ha.
Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 6 ilustra, de forma gráfica, o resultado da Tabela 8.

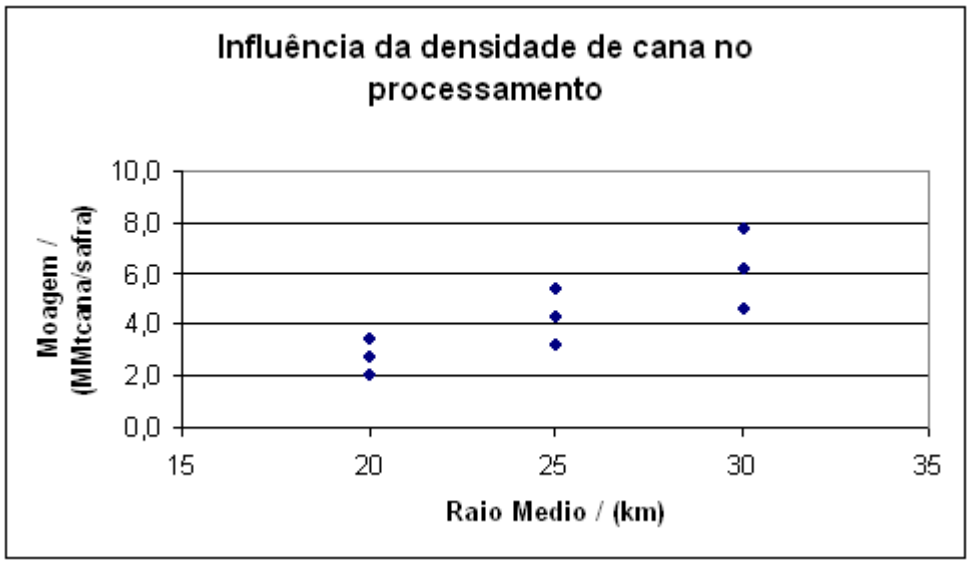

Figura 6 - Faixa de variação de capacidade das usinas plataforma de biorefino

Considerando um percentual de ocupação das terras livres para o plantio de cana-de-açúcar de 30% a 50% e o raio médio de 20km a 30km, chegamos a uma faixa de capacidades de 2,0 a 8,0 M.t.cana processada por ano, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

Embora exista uma pequena diferença na capacidade de moagem entre as usinas das regiões tradicionais e de expansão, é importante observar que, em virtude da curva de evolução do canavial, uma unidade nova dificilmente entrará em operação na escala plena, mas passará por etapas intermediárias até alcançar a capacidade de projeto com a estabilização do canavial.

Para a definição da estratégia de implantação do complexo agroindustrial também é necessária uma análise de modularidade dessa agroindústria. As possibilidades de modulação dos aspectos agrícolas e industriais nos levam a uma discussão sobre a escala mínima eficiente de uma usina.

Para fins de dimensionamento de equipamentos é preciso que se estabeleça uma capacidade diária de processamento que, por sua vez, é definida de acordo com os dias de safra. No contexto de uma biorefinaria, em que a complexidade dos processos e o custo de capital são maiores, uma safra mais longa eleva o fator de utilização dos equipamentos. Este benefício, entretanto, deve ser equilibrado com a perda de açúcar resultante da colheita de cana fora do pico máximo de maturação e, eventualmente, perdas de produtividade oriundas da compactação do solo resultante da entrada de máquinas na lavora em períodos mais úmidos.

Silva (2007) realizou um estudo comparando a rentabilidade de uma unidade que processa 1.000.000 t.cana por safra em sete cenários distintos, variando de três a nove meses de processamento. Silva (2007) considerou em seu trabalho que toda a cana seria oriunda de fornecedores e obteve o maior VPL (valor presente líquido) quando a safra foi realizada entre seis e oito meses, conforme indicado na Figura 7.

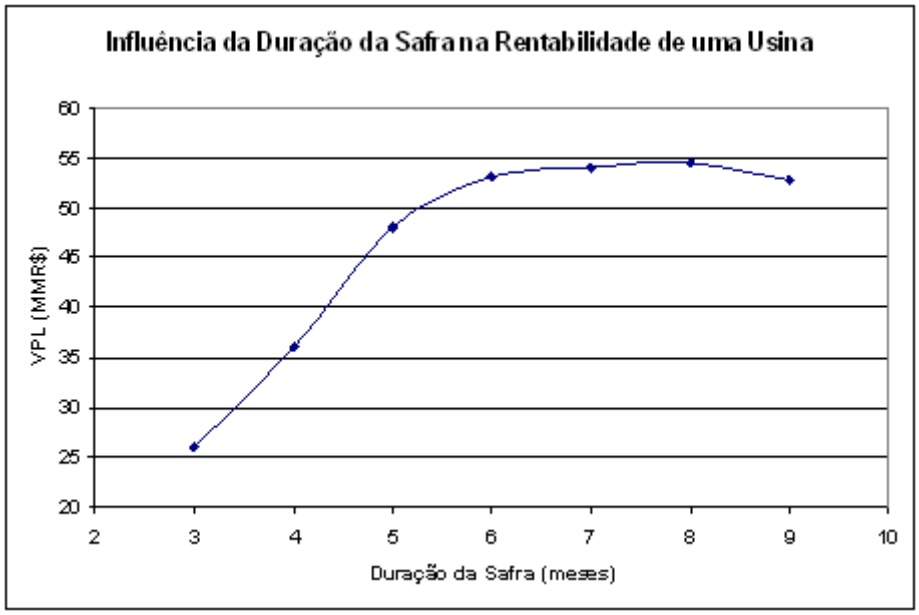

Figura 7 - Impacto da duração da safra na rentabilidade de uma usina que processa 1.000.000 t.cana por safra produz etanol e açúcar e compra toda a cana de terceiros (Silva, 2007).

Com base na análise dos valores médios obtidos nas duas últimas safras, indicados na Tabela 9, pode ser verificado que as usinas têm trabalhado de modo aderente com as conclusões de Silva (2007), com cerca de oito meses de safra.

Visando não pressionar excessivamente os custos com arrendamentos, foi considerado um módulo de 15.000 t.cana por dia (TCD). Caso a usina tenha sucesso em suas políticas de expansão, esse módulo poderá ser expandido para 30.000TCD ou, no limite, para 45.000TCD.

Para uma biorefinaria, além da escala da usina, é importante analisarmos as escalas de produção competitiva dos processos que serão integrados a esta.

No caso da produção de polietilenos, tomando como referência o projeto da Braskem de 200.000t/ano de polietilenos, bem como o projeto anunciado pela Dow Química, com capacidade 350.000t/ano, a demanda seria de 5 a 9 M t cana por safra se esses projetos fossem integrados a uma usina. Considerando a curva de expansão do canavial, seria necessário importar etanol de outras unidades nos primeiros anos de operação do complexo.

Tabela 9 - Premissas agrícolas consideradas com base nas informações praticados nas ultimas safras pelas usinas na região de expansão (MARQUES, 2009; XAVIER, 2009).

	Safra 2007/2008[1]	**Safra 2008/2009[2]**	**Média das Safras 2007/2008 e 2008/2009**	**Valor Considerado**
Capacidade de processamento /(TCD)	-	13.000	-	15.000
Dias Totais de safra / (d)	226	232	229	230
Eficiência de Aproveitamento do Tempo / (%)	84,3	80,0	81,9	87
Horas de Moagem /(h)	4574	4429	4502	4800
Processamento anual de cana /(t.cana/safra)	-	2.399.042	-	3.000.000
Produtividade / (t/ha)	-	83	-	83
ATR / (kg/tcana)	145	140[3]	-	145

1 – Marques (2009).
2 – Xavier (2009).
3 – Considerado 50% de cana de fornecedor.

As escalas eficientes para as tecnologias de aproveitamento da sacarose, instaladas no Brasil, estão indicadas na Tabela 10. Conforme pode ser observado, diferente da alcoolquímica, estas unidades são de menor capacidade e podem ser perfeitamente integradas a uma planta padrão de 15.000TCD.

Em um complexo abrangendo uma unidade de 3 M.t. cana por safra e todas as tecnologias da Tabela 10, cerca de 38% do total de sacarose seria destinado ao uso diversificado de açúcares. Um dos desafios do projeto é a concepção da unidade e da casa de força para que as plantas que utilizam açúcares possam rodar o ano inteiro.

O fato de as unidades poderem aproveitar a estrutura de utilidades da usina gera uma economia de escopo que melhora a rentabilidade de uma planta integrada em relação a uma planta isolada. O próximo tópico do fator de competitividade aborda justamente a questão da economia de escopo.

Tabela 10 - Escala recomendada para as tecnologias de conversão de açúcares já praticadas no Brasil.

Produto	**Ácido Cítrico[1]**	**Levedura[1]**	**Lisina[1]**	**PHB[2]**
Capacidade / (t/ano)	50.000	50.000	13.700	10.000
Operação efetiva / (h/ano)	7320	7320	7320	7320
Conversão / (kg sacarose/kg)	1,37	0,6	2,56	3,00
Consumo de vapor / (t/t)	4,0	0,9	9,6	39,5
Energia Elétrica / (kWh/t)	1304	600	2832	3240
Quantidade de cana necessária / M.tcana/safra[3]	0,472	0,207	0,242	0,207
Percentual de Sacarose / (%)[4]	16	7	8	7

1 – Seabra (2008)
2 – Brown (2006)
3 – Calculado considerando um ATR médio de 145kg/tcana
4 – Calculado pela divisão da quantidade de cana necessária por 3 M.tcana.

3.2 Economia de escopo

Dizemos que temos economia de escopo quando o custo de produzir uma gama de produtos em uma mesma planta é inferior ao de produzir em plantas separadas.

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 (TIROLE, 1988).

De acordo com Lootty e Szapiro (2002 *apud* ELY, 2009) existem três fatores principais que levam a economia de escopo das empresas:

- Existência de fatores comuns;
- Existência de reserva de capacidade;
- Complementaridade Tecnológica e Comercial.

Para exemplificar vamos analisar a possibilidade de uma usina que venha a produzir etanol, açúcar e energia elétrica conforme a Figura 8.

A existência de fatores comuns permite o compartilhamento de equipamentos e profissionais levando a redução de custo fixo. Toda a área demarcada é comum aos dois processos.

Além do compartilhamento de recursos, a produção de açúcar tem como co-produto o melaço que pode ser comercializado ou usado para fabricação de etanol. Nos dias de chuva, em que não é possível colher a cana-de-açúcar, a produção de etanol pode ser mantida usando o melaço em estoque, proporcionando um maior fator de utilização da destilaria. Desse modo, uma usina que produz açúcar e etanol aproveita melhor os ativos de fermentação e destilação do que uma usina autônoma.

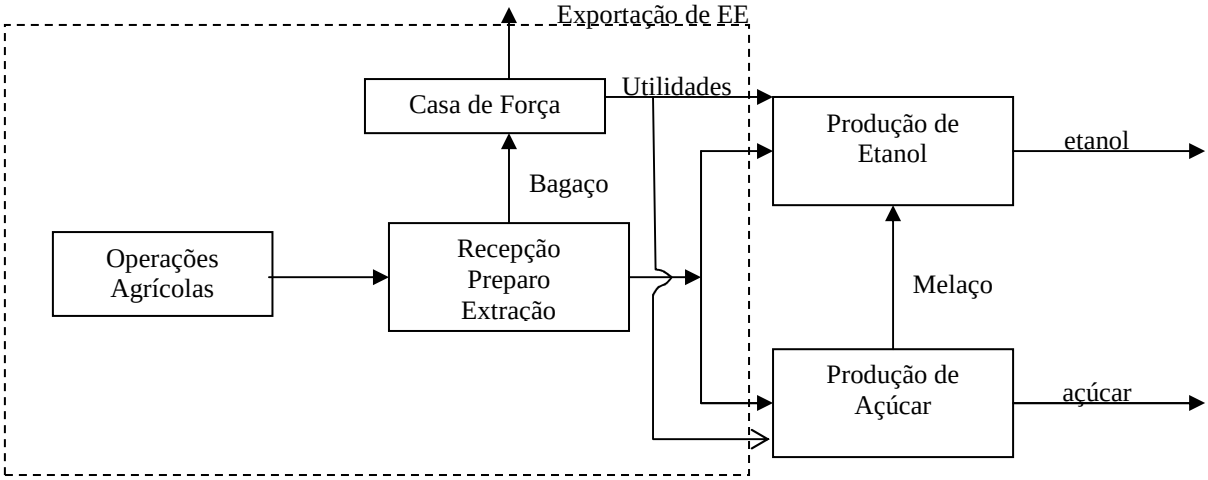

Figura 8 – Diagrama simplificado de produção de etanol, açúcar e energia elétrica (elaborado pelo autor).

De forma similar, a casa de força precisa suprir a fábrica de açúcar e a destilaria com vapor. O vapor demandado pelo processo para aquecimento é saturado, com cerca de 245kPa (2,5kgf/cm^2) de pressão.

Considerando a necessidade de instalação de uma caldeira para atendimento do vapor de processo, se a mesma for projetada para gerar vapor com alta pressão e temperatura a usina tem condições de gerar excedentes de energia elétrica.

De acordo com a análise das escalas sugeridas por Seabra (2008) para os produtos oriundos da sacarose, parece razoável que estas unidades estejam integradas na usina.

Já em relação aos produtos obtidos pela alcoolquímica a discussão é mais complexa, uma vez que essas unidades absorvem completamente a produção de uma ou mais usinas. Além disso, dado o grande volume a ser transportado, os

benefícios de integração podem não compensar a maior distância em relação ao mercado consumidor.

Outro ponto interessante é que, conforme comentado anteriormente, as usinas no Brasil operam basicamente na safra. Dessa forma, existe capacidade ociosa na unidade durante o período da entressafra. O aproveitamento dessa capacidade ociosa pode ser um dos principais diferenciais de competitividade da biorefinaria em relação a uma usina autônoma.

Essas oportunidades podem ser abordadas em uma segunda fase, após a entrada em operação do complexo. Para isso é necessário estudar o uso combinado de outras matérias-primas potencialmente disponíveis na entressafra da cana, como o sorgo sacarino, os amiláceos e as matérias-primas lignocelulósicas.

3.3 Diversificação

O processo de diversificação ocorre quando uma empresa atua em um mercado em que ela não atuava originalmente. Aproveitando o exemplo anterior, uma usina autônoma que instala uma fábrica de açúcar diversifica o seu portfólio de produtos. Dependendo de como ocorrer esta transição ela poderá adicionar flexibilidade ao seu processo. Considerando esse mesmo exemplo, se a empresa não aumentar o processamento de cana proporcionalmente à quantidade de açúcar que deseja produzir, levará a uma operação da destilaria com capacidade inferior à nominal. Isso confere flexibilidade ao processo, uma vez que, dependendo dos preços relativos entre etanol e açúcar, a usina poderá orientar mais a sua produção para um dos produtos.

A produção de energia elétrica também pode ser caracterizada como um processo de diversificação da usina, que leva à atuação em um mercado com características completamente distintas dos mercados de açúcar e etanol.

No conceito de biorefinarias, toda a gama de produtos derivados da sacarose (sacaroquímica) e da alcoolquímica pode ser encarada como oportunidade de diversificação e agregação de valor ao complexo agroindustrial. O açúcar

estocado para operação dos processos anexos pode ser vendido diretamente caso ocorra uma alta nos preços que não compense a sua transformação.

Considerando o aproveitamento integral da biomassa de um determinado agroecossistema, a integração com cadeias de oleaginosas, biomassa florestal e pecuária pode também ser analisada como oportunidade de diversificação.

Uma diversificação interessante no desenvolvimento de uma biorefinaria convencional com aproveitamento integral da biomassa é a integração etanol-biodiesel (Figura 9). Esta integração pode trazer algumas vantagens como (ANGARITA *et al*., 2008):

- disponibilidade de utilidades a baixo custo;
- possibilidade de rotação de cultura da cana com soja;
- possibilidade de compartilhamento da infra-estrutura para manuseio de hexano;
- possibilidade de produção de rações com proteína de soja, levedura e lisina;
- possibilidade de extração do óleo de soja com etanol.

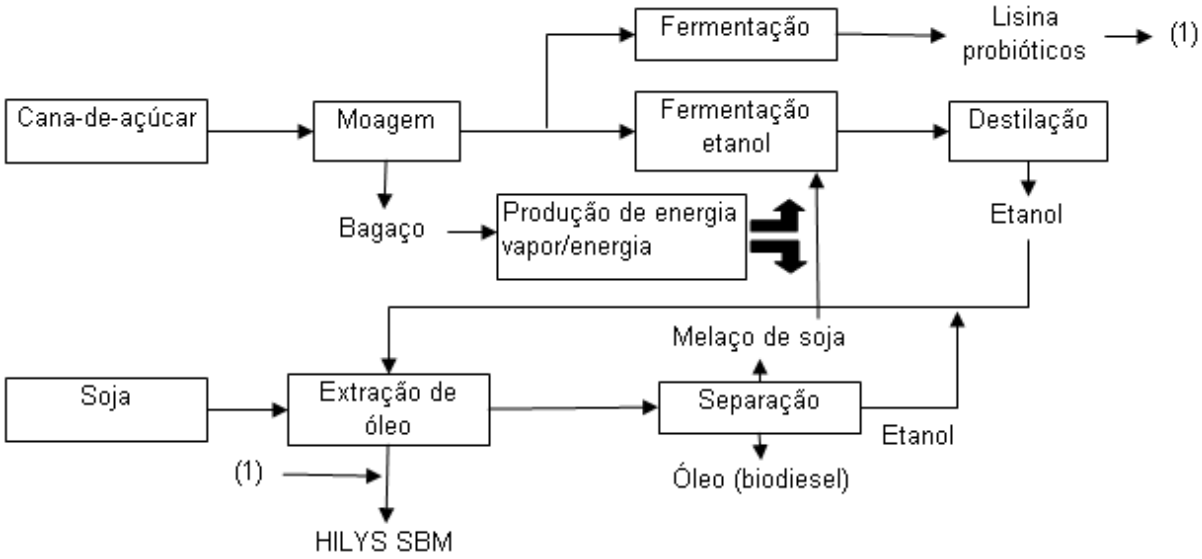

Figura 9 - Integração etanol com complexo soja (adaptado de Frederico Kladt, Bunge, 2005 *apud* ANGARITA *et al*., 2008).

Apesar dos benefícios identificados na integração de uma usina com uma esmagadora de soja com produção de biodiesel, os aspectos logísticos devem ser estudados detalhadamente, uma vez que a produção de soja oriunda da área de

reforma da planta padrão é muito pequena para justificar o investimento na industrialização do grão.

Conforme indicado na Tabela 11, a área de reforma de uma usina de 3 M.t.cana por safra é suficiente para suprir cerca de 3% a 5% das necessidades de uma esmagadora de 500.000 t.grãos por ano. Considerando esses números, torna-se necessário buscar um entendimento de quais seriam os critérios que levam a uma diversificação bem sucedida.

A entrada da empresa em um novo mercado pode acontecer pelo investimento em uma nova unidade, como a compra de caldeiras e geradores para vapor de alta pressão, levando a venda de excedentes de energia, ou por intermédio de fusões e aquisições.

Tabela 11 - Análise da produção de soja na área de reforma de uma usina de 3 M.t.cana por safra

	Esmagadora
Capacidade / (t/ano)	500.000
Produção de óleo para biodiesel[1] / (t/ano)	100.000
Produtividade[2] / (t.soja/ha)	2,6
Necessidade de área / (ha)	190.330
Área de cana em reforma / (ha)	7.059
Área adicional de soja / (ha)	183.282
Produção de soja na reforma / (t/ano)	18.544
Percentual da soja produzida na reforma / (%)	3,7

1- Considerado uma recuperação de 20% de óleo em relação ao grão;
2- Média obtida na safra 2008/2009 (Anuário Brasileiro da Soja)

Segundo Ely (2009), existem basicamente dois critérios para se analisar os prováveis caminhos da diversificação de uma empresa. O primeiro, relaciona-se com as bases tecnológicas da empresa e com a proximidade física das novas atividades em relação às existentes, que permite o aproveitamento dos recursos humanos e de maquinário. A produção de açúcar e energia elétrica em uma usina cabe perfeitamente nesse conceito de caminho de diversificação, pois fisicamente estão no mesmo sítio produtivo, utilizando os mesmos operadores e compartilhando equipamentos.

O segundo caminho de diversificação está relacionado com o grau de similaridade entre competências essenciais necessárias para o desempenho das atividades atuais e das novas atividades. Uma empresa de petróleo que diversifica

seu portfólio de produtos para se tornar uma empresa de energia investindo em bicombustíveis seria um exemplo desse segundo caso. Embora as unidades produtoras de bicombustíveis possam estar fisicamente distantes das refinarias, essas empresas possuem competência em analisar e executar projetos de implantação de empreendimentos, conhecimento em operação e manutenção de unidades, comercialização e logística de combustíveis, entre outras atividades. A empresa terá que passar por um processo de aprendizado no que tange aos processos agrícolas ou adquirir este conhecimento em processo de fusões ou aquisições de empresas.

No caso de uma usina buscar a integração com uma esmagadora, terá que buscar competência para originação e aquisição de matérias-primas, bem como de operação e comercialização dos produtos. Nesse caso, a parceria com empresas que já possuem este conhecimento poderia ser um caminho.

De acordo com Ely (Tirole, 1988 apud Ely, 2009), uma empresa deve buscar uma integração vertical quando o mercado em que ela negocia seus insumos ou produto final se distancia muito de um mercado de concorrência perfeita.

Analisando o exemplo anterior, de uma usina que produza etanol, açúcar e energia elétrica, o principal insumo deste complexo é a cana-de-açúcar. A cana é um produto perecível e, por isso, existe uma forte relação de dependência entre o produtor e a usina. Esse fato pode levar a tensões comerciais que justificariam um processo de verticalização. Nesse caso, podemos definir três níveis de verticalização de uma usina em relação à matéria-prima:

- baixa verticalização: predomínio de compra de cana de terceiros;
- media verticalização: equilíbrio entre cana própria (terras próprias e arrendadas) e de terceiros;
- alta verticalização: predomínio de cana-própria (terras próprias e arrendadas).

Em consequência da maturidade em que se encontra o setor sucroenergético no Brasil, os contratos de fornecimento de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, foram amplamente debatidos entre os atores da cadeia produtiva. Esta discussão resultou no Consecana-SP, que estabelece uma excelente referência para contratos de suprimento de cana-de-açúcar. De acordo com o Consecana, o pagamento da cana será com base no ATR (açúcar totais

recuperáveis) da matéria-prima entregue. Basicamente, verifica-se o faturamento da unidade industrial com os seus produtos (açúcar e etanol) por tonelada de cana e determina-se uma parcela do faturamento total destinado ao pagamento do fornecedor[6].

Cada estratégia depende das particularidades da região em que a usina se situa. Muitas vezes em uma nova fronteira agrícola a usina ocupa áreas tradicionais de pecuária e grãos. Esses pecuaristas não têm o conhecimento, maquinário e capital necessários para se tornarem fornecedores de cana no curto prazo e, por isso, a usina pode optar por mais cana-própria na implantação do projeto e com o passar do tempo ir crescendo junto com a oferta de fornecedores.

Apesar da maturidade dos contratos de fornecimento de cana, em 2006 (Chaves, 2006 *apud* Seabra, 2008) cerca de 60% da cana processada nas usinas era própria. Isso indica que muitas usinas buscam atuar verticalizadas em relação ao suprimento de matéria-prima (*upstream).*

Essa verticalização em direção ao início da cadeia tem como característica não alterar os produtos finais comercializados pela usina, sendo os principais o açúcar e o etanol.

Outra possibilidade é a verticalização “para frente” (*downstream*). Neste caso, a empresa procura alterar os seus produtos tradicionais para acessar mercados de maior valor agregado.

Em uma biorefinaria, produzindo produtos químicos ou petroquímos, podemos ter uma usina que se verticaliza “para frente” ou uma empresa química e petroquímica buscando se verticalizar “para trás”.

Quando a usina busca produzir produtos petroquímicos ela está visando diversificar o seu leque de produtos e alcançar novos mercados, com produtos de maior valor agregado. Por outro lado, quando uma petroquímica busca se verticalizar no *upstream* produzindo os mesmos produtos, porém com matérias-primas diferentes, ela está buscando escapar de um possível poder de mercado de seus fornecedores ou algum tipo de diferenciação.

Especificamente no caso da alcoolquímica, o que temos visto é a verticalização “para trás” das empresas petroquímicas (BRASKEM, DOW, SOVAY),

[6] O manual completo do Consecana está disponível em: <http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={6ED1BE65-C819-4721-B5E7-312EF1EA2555}>. Acesso em 20 de setembro de 2010.

buscando uma alternativa ao eteno fóssil. Além da diversificação no suprimento de matérias-primas, a alcoolquímica pode ser uma oportunidade de diferenciação de seus produtos. A seguir, será realizada uma análise prospectiva das possíveis estratégias de diferenciação das biorefinarias.

3.4 Diferenciação

No processo de diversificação, as empresas procuram produzir produtos distintos que são orientados para mercados diferentes. Foi discutida, como exemplo de diversificação com economia de escopo, a produção de etanol, açúcar e energia elétrica e biodiesel em uma usina.

Na diferenciação, o mercado é o mesmo e as empresas buscam desenvolver produtos para acessar nichos distintos desse mercado e, com isso, obter preços acima do preço médio praticado nesse mercado.

Um exemplo de diferenciação no mercado de combustíveis é o Shell V-Power Etanol. Ele compete no mesmo mercado de etanol carburante que o etanol hidratado. Na indústria petroquímica, um exemplo é a produção do polietileno verde, que utiliza etanol para produção de eteno ao invés de nafta ou gás natural. O polietileno verde possui propriedades físicas idênticas ao convencional, porém carrega uma economia de carbono em relação ao seu concorrente fóssil que permite sustentar preços superiores aos demais.

Em termos de sustentabilidade, podemos destacar a produção de etanol de segunda geração. Mesmo obtendo a mesma molécula e destinando o produto para fins carburantes em uso automotivo, o etanol de segunda geração poderá ter uma diferenciação se tiver uma análise de ciclo de vida favorável em relação às rotas tradicionais.

3.5 Flexibilidade

A capacidade de alterar o mix de produção de etanol para açúcar permite às usinas uma grande flexibilidade em ajustar a oferta de acordo com a demanda.

Quando os insumos para as unidades de biorefino adicionadas à usina forem o etanol e o açúcar, a empresa poderá optar pela venda ou industrialização dos mesmos conforme os preços do momento.

Contudo, essa flexibilidade no curto prazo pode estar restringida por contratos de suprimento que podem atenuá-la. De qualquer forma, quanto mais complexa for a biorefinaria, maiores serão as suas chances de aumentar as margens de lucro, orientando a produção para maximização do produto mais rentável.

3.6 Requisitos de uma usina plataforma para biorefino

Com base nos fatores de competitividade descritos a seguir, foram levantados alguns requisitos para que uma usina seja uma plataforma promissora para instalação de unidades de biorefino.

Na medida em que novos processos são adicionados à usina ocorre uma elevação no custo de capital da unidade. Neste cenário, o fator de utilização dos equipamentos, e, consequentemente, do capital, torna-se mais relevante na rentabilidade do complexo.

É de se esperar que, quanto mais intensivo em capital for o processo, menos tolerante será às oscilações de disponibilidade de matéria-prima decorrentes dos períodos de safra e entressafra. Uma planta de produção de eteno integrada com uma unidade de polietileno, por exemplo, dificilmente terá condições de competir com o produto gerado pelas rotas petroquímicas se a planta for operada somente no período da safra. Considerando uma mesma produção anual, a unidade com menor fator de utilização acaba por ter uma produção horária mais elevada.

Esta é uma diferença importante das usinas no Brasil em relação às unidades produtoras de etanol nos Estados Unidos. A cana, por ser perecível, não pode ser estocada, enquanto o milho pode ser armazenado para posterior processamento. Em consequência, o fator de utilização dos equipamentos no Brasil é próximo de 55% para duzentos dias efetivos, enquanto esse fator é de 90% nas usinas de milho.

Para contornar esse problema algumas estratégias foram sugeridas na Tabela 12. A busca de safras mais longas e a estocagem de açúcar e etanol já são

praticadas atualmente. Visando compatibilizar a venda dos produtos com o período de pico de preços, as empresas mais capitalizadas investem em capacidade de estocagem e priorizam a venda na entressafra.

Com base no exposto, para implantação do complexo é sugerida a busca por safras longas e a estocagem de açúcar e etanol para as plantas que tenham processos sucroquímicos e alcoolquímicos, respectivamente.

Além da estocagem, é possível obtermos açúcar ou etanol com outras matérias-primas na entressafra da cana. Esta opção, embora mais complexa, tem como vantagem a redução dos estoques, maior aproveitamento do capital investido e a oferta de utilidades durante a entressafra.

Tabela 12 - Estratégia para aumento do fator de utilização das biorefinarias a base de cana-de-açúcar

	Estratégia	**Sucroquímica**	**Alcoolquímica**	**Observação**
1	Safra mais longas	x	x	Na medida em que os dias de safra aumentam o teor médio de açúcar cai. Limitação de colheita em dias de chuva.
2	Estocagem de açúcar	x		Alternativamente poderia ser estocado melaço ou xarope invertido.
3	Estocagem de etanol		x	Perdas por evaporação. Aumenta o risco de sinistro.
4	Integração com culturas sacarídeas ou amiláceas	x	x	Necessidade de investimentos na indústria. Desafios tecnológicos na agricultura. Aumento do custo de matéria-prima.
5	Hidrólise Lignocelulolse	x	x	Necessidade de desenvolvimento tecnológico e disponibilidade de matéria-prima lignocelulósica.
6	Rotas termoquímicas		x	Necessidade de desenvolvimento tecnológico e disponibilidade de matéria-prima lignocelulósica.

Fonte: Elaborado pelo autor

O fornecimento confiável e a baixo custo de utilidades é um atrativo para instalação de unidades que não utilizam açúcares como matéria-prima. Quanto maior for a demanda por vapor e energia elétrica da unidade, maior será o benefício de integrar a mesma em uma usina. A usina Barraalcool, em Barra do Bugres (MT),

é um exemplo desta integração. Aproveitando a disponibilidade de utilidades a planta de biodiesel custou cerca de 25% a menos[7].

Além do fornecimento de utilidades de forma confiável, a usina deverá produzir vapor na pressão e temperatura necessárias ao processo de biorefino. A maioria dos processos alcoolquímicos e sucroquímicos demandam uma pressão de vapor abaixo de 6,7M.Pa (67bar), todavia, quanto maiores forem a pressão e a temperatura do vapor produzido na unidade, maior será a abrangência de processos que poderão ser anexados à unidade.

Além de vapor e energia elétrica, alguns processos podem necessitar de hidrogênio ou de combustível líquido ou gasoso para utilização em fornos. Nesse caso, a disponibilidade de gás natural em uma determinada região pode ser um critério para seleção do local mais adequado para instalação.

Uma fonte fóssil, além de facilitar o uso de fornos, serve para aumentar a confiabilidade no suprimento de utilidades. De qualquer forma, é desejável que a unidade tenha facilidades para poder utilizar palhiço de cana como complemento ao bagaço, visando a geração de energia e vapor o ano inteiro.

Um módulo padrão de processamento de 15.000TCD estaria adequado para produção dos principais produtos derivados da sacarose fabricados no Brasil. Para contemplar as rotas alcoolquímicas que utilizam o eteno como produto intermediário o complexo deveria ser ampliado para capacidades iguais ou superiores à 30.000TCD.

De forma resumida sugerem-se os seguintes passos para facilitar a implantação de uma biorefinaria utilizando cana como matéria-prima:

- Localizar a unidade em regiões que permitam trabalhar com sistemas de colheita mecanizada;
- Iniciar com a produção dos produtos tradicionais, que possuem maior facilidade de comercialização;
- Buscar ganhos de escala de acordo com o sucesso nas políticas de arrendamento e capacidade de modulação da unidade;
- Dimensionar a casa de força para fornecimento de utilidades para o ano todo;
- Prever facilidades para recuperação de palhiço;

[7] Informação disponível em http://www.biodieselbr.com/noticias/biodiesel/projeto-alia-biodiesel-a-alcool-e-acucar.htm. Acesso em 20 de setembro de 2010.

- Buscar facilidades para estocar as matérias-primas (açúcar, etanol, xarope invertido ou melaço) que serão usadas nas novas unidades anexas;
- Instalar unidades anexas que permitam aumento de rentabilidade com base em economias de escopo, flexibilidade, diversificação ou diferenciação de acordo com os estudos de mercado e facilidades logísticas;
- Buscar o aproveitamento integral da biomassa de acordo com a vocação da região.

A seguir será realizado o estudo de caso para implementação de uma biorefinaria produtora de etanol, açúcar, ácido cítrico, levedura, lisina, PHB, farelo de soja, biodiesel. Em relação a esse complexo, será avaliada, de forma prospectiva, uma expansão com a produção de etanol de segunda geração e poliacidolácteo via hidrólise enzimática.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, foi abordado, de forma prospectiva, o estudo de caso da identificação de oportunidade de uma biorefinaria localizada na região de expansão da cana.

4.1 Escolha dos Produtos

Como premissa, a biorefinaria entrará em operação produzindo energia elétrica, etanol anidro e hidratado carburante com especificação para atender aos requisitos da ANP e exportações. A essa unidade base serão adicionados os produtos apresentados na Tabela 13.

Em uma segunda etapa do planejamento do projeto, todos os produtos deverão passar por análise consistente de mercado. De forma simplificada, neste estudo, foram escolhidos produtos com potencial uso como blocos de construção para produtos de maior valor agregado, cujas tecnologias já são comerciais, ou foram considerados promissores para o país pelo CGEE (2010).

Tabela 13 - produtos considerados no estudo de caso.

Produtos	Critério de Escolha
Açúcar cristal	Flexibilidade entre venda e matéria-prima para sucroquímica na entressafra. Baixo risco de mercado.
Ácido Cítrico	Bloco de Construção. Considerado estratégico pelo CGEE. Tecnologia já utilizada no país.
Levedura	Existe excesso na produção de etanol. Tecnologia já utilizada no país. Sinergia com alimentos.
Lisina	Bloco de Construção. Tecnologia já utilizada no país.
Farelo de Soja	Sinergia entre esmagadoras e usina.Integração com alimentos.
Biodiesel	Aproveitamento do óleo da esmagadora. Diversificação
PHB	Diversificação. Considerado promissor pelo CGEE

Além do etanol e açúcar, a produção de levedura é praticada por diversas usinas, como as dos grupos Zilo, Santa Adélia, São Martinho, Santo Antônio, São Francisco, Viralcool, Usina Andrade, São Carlos, Galo Bravo, Cresciumal, Santa Cruz Op, Jardest, São José da Estiva, Cerradinho, Equipav, Nova América, Pitangueira e Bonfim (IEL/SEBRAE, 2005)

O principal destino das leveduras no mercado interno é a alimentação de aves e suínos, no mercado externo é alimentação de peixes e camarões (Seabra,2008).

Embora a venda de levedura seja rentável, caso se deseje maximizar a produção de etanol poderia ser encaminhado para o processo de desidratação de leveduras apenas o excesso gerado no processo de fermentação, praticamente não impactando a produção de etanol. É possível produzir cerca de 20kg de levedura seca por m^3 de etanol somente com o excesso de levedura (RABELO, 2010). Essa alternativa seria conveniente para os complexos orientados para alcoolquímica.

Um produto que foi considerado importante para o país pelo CGEE (2010) e que também é um bloco de construção é o ácido lático. Recentemente a Dow estabeleceu uma j*oint venture* com a Cargil para a produção do PLA (poli ácido lático), uma fibra feita da polimerização do ácido lático obtido da biomassa (CGEE, 2010).

Visando a conhecer melhor esse produto e as tecnologias avançadas, foi avaliado, de forma prospectiva, o crescimento do complexo com a produção de etanol de segunda geração via hidrólise enzimática, incluindo a produção de poliacidolácteo.

Por fim, para análise dos balanços de massa e energia, foi considerada a produção do PHB (polihidroxibutirato), que já está sendo produzido em escala piloto (60t/ano) na Usina da Pedra. Foi reconhecida como tecnologia promissora na área petroquímica para o uso da sacarose. Sugeriu-se uma escala de 10.000t/ano para este estudo de caso. Havendo uma consolidação do mercado e da tecnologia, plantas de maior escala podem ser viabilizadas.

É importante ressaltar que a escolha dos produtos priorizou a flexibilidade em relação a verticalização do complexo. Esta decisão foi uma premissa do estudo de caso para delimitar o escopo da análise. Como será visto posteriormente, ao estocarmos açúcar, essas unidades podem optar pela venda de açúcar na entressafra ou pela produção o ano inteiro das plantas de sucroquímica. Com base nessa estratégia de operação, caso ocorram variações significativas nos preços dos produtos, a unidade pode maximizar aquele que oferecer maior margem[8].

4.2 Localização da Planta

Como premissa para este estudo de caso, foi estabelecido que a unidade estaria nas regiões de expansão (Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás e oeste paulista), dentro do zoneamento da cana-de-açúcar. Essa é uma das escolhas mais difíceis de um projeto agroindustrial, uma vez que afeta diretamente a competitividade do negócio. Com base na experiência e na consulta a especialistas em análise de projetos sucroenergético, sugere-se que os seguintes aspectos sejam considerados na escolha da localização:

- Facilidade logística para escoar a produção;
- Características geográficas;
- Uso atual do solo;
- Infraestrutura disponível;

[8] A verticalização da produção dos blocos de construção até os insumos finais fica como sugestão para trabalhos futuros.

- Regulamentação para produção e colheita de cana;
- Facilidade de mecanização;
- Período útil de industrialização da cana (dias de safra);
- Disponibilidade de mão-de-obra e de fornecedores na região;
- Necessidade de irrigação;
- Potencial de produção agrícola por ciclo e por corte;
- Estimativa de custos de arrendamento;
- Raio médio esperado do canavial.

4.3 Estratégia de Suprimento

4.3.1 Suprimento de Cana-de-Açucar

Foi considerada, como hipótese simplificadora, a inexistência de fornecedores de matérias-primas para o complexo na região. Nesse caso, todo o canavial teria que ser implantado e colhido pela usina.

A velocidade de implantação do canavial depende da quantidade de mudas adquiridas inicialmente, da quantidade de máquinas, terra, disponibilidade de mão-de-obra, entre outros fatores.

Alguns estudos, como o de Colin (2008), sugerem que uma vez definida a quantidade de cana a ser colhida, o plantio deve ser otimizado, usando um algoritmo de programação quadrática, de forma a alcançar a estabilidade em quatro anos. Essa alternativa, entretanto, leva a um desequilíbrio dos recursos, mão-de-obra e maquinário, necessários para implantação do canavial em relação ao que será necessário para a reforma do canavial. Ou seja, essa alternativa exige a terceirização de máquinas e equipamentos durante a fase de implantação do canavial que, após a estabilização do mesmo, terão que ser desmobilizados.

Um das possíveis consequências dessa estratégia é a necessidade de aumento de migração de mão-de-obra no local onde será implantada a unidade, exigindo cuidados adicionais com as condições de hospedagem dos trabalhadores e ocasionando impactos sociais e na infraestrutura do município do empreendimento.

Como a maioria das unidades tem uma implantação gradual, foi considerado, na planta de referência, que a cada ano será plantada uma área equivalente à área a ser reformada na estabilidade do canavial, levando a uma racionalização da estrutura de plantio.

Conforme indicado por Seabra (2008), existem basicamente duas alternativas de cana para o plantio. A primeira delas é a cana de ano, que é plantada imediatamente após a última colheita. Nesse caso, o solo não descansa e no ano seguinte a cana é colhida. A segunda alternativa é a cana de ano e meio, que é plantada alguns meses após a colheita, possibilitando o uso de culturas em rotação para a recuperação do solo. No plantio de ano e meio, o tempo entre o último corte do ciclo anterior e o primeiro do novo ciclo é de dois anos, aumentando a produtividade esperada.

Aliando a maior produtividade com a possibilidade do plantio de oleaginosas em rotação com a cana, foi considerado, neste trabalho, o plantio de cana de ano e meio para o desenvolvimento do canavial da planta de referência.

Além do sistema de plantio, é preciso definir a produtividade da cana em cada corte para estimativa de colheita anual. Como neste trabalho não foi definido uma região alvo, foram adotados os valores médios indicados por Seabra (2008) para as safras de 1998/1999 a 2002/2003 (Tabela 14).

Tabela 14 - Produtividade da cana de açúcar – média das safras 98/99 a 2002/2003

Ciclo da cana	**t/ha**
Cana de 1º corte 18 meses	113,00
Cana de 2º corte	90,00
Cana de 3º corte	78,00
Cana de 4º corte	71,00
Cana de 5º corte	67,00
Média	83,80

Fonte: (MACEDO *et al*., 2004 apud SEABRA, 2008)

Com base na produtividade em cada corte e na quantidade de cana a ser plantada em cada ano, calcula-se a quantidade total de cana produzida.

Descontando a quantidade de cana que será utilizada como muda, determinamos o processamento anual de cana na unidade industrial.

Segundo Beuclair e Scarpari (2006), a densidade de plantio adotada na implantação de um canavial é de aproximadamente 12 gemas por metro linear,

resultando em um consumo de sete a dez toneladas de cana por hectare. Os autores ainda informam que é comum haver um gasto maior de mudas para compensar possíveis falhas.

Cebim (2008) realizou estudos comparando o plantio mecânico com o manual. Neste trabalho, Cebim conclui que o plantio mecânico apresenta custos menores, porém, mesmo com uma maior densidade de mudas, apresenta um maior número de falhas, com menos gemas viáveis.

Segundo Xavier (2009), na safra de 2009, as usinas na região de expansão utilizaram cerca de $13t.ha^{(-1)}$ de mudas e os fornecedores, na mesma região, utilizaram cerca de $14t.ha^{(-1)}$.

Considerando que, na região de expansão, a mão-de-obra é menos abundante, foi utilizada como premissa do projeto a mecanização de todas as áreas de plantio. Dessa forma, foi considerado um consumo ligeiramente acima do informado pelo PECEGE (Xavier, 2009), que contempla algumas usinas ainda com o plantio manual de cerca de $15t.cana.ha^{(-1)}$ para o plantio, assegurando a quantidade de mudas necessárias para o uso de máquinas.

Com base nessas premissas, foi estabelecida a curva de evolução do canavial até alcançar a capacidade de moagem de 3.000.000 t.cana por safra em seis anos, conforme ilustrado na Tabela 15.

Uma vez estabelecida a quantidade de cana que será processada em cada safra, os dias de safra determinarão a moagem diária, necessária para o dimensionamento dos equipamentos industriais.

Conforme já comentado, o estudo de Silva (2007) indicou uma safra ideal entre seis e oito meses. O trabalho de Silva, entretanto, não abordou a curva de evolução do canavial e as diferentes opções de modulação da indústria e dos equipamentos de colheita de cana.

Caso exista folga na indústria na implantação do projeto, a safra poderá ser reduzida, concentrando a colheita somente nos meses em que a cana apresenta o maior teor de açúcar.

Tabela 15 - Curva de evolução do canavial considerando um plantio mecanizado de cana de 18 meses, estabelecendo a mesma área de plantio anual para implantação e renovação de canavial.

		ANO					
PLANTIO	**UNIDADE**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Plantio anual	ha	7.426	7.426	7.426	7.426	7.426	7.426
Área com cana	ha	7.426	14.851	22.277	29.703	37.129	44.554
Área de colheita	ha	-	7.426	14.851	22.277	29.703	37.129
CORTE	**UNIDADE**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1º (18 meses)	ha	-	7.426	7.426	7.426	7.426	7.426
2º corte	ha	-	-	7.426	7.426	7.426	7.426
3º corte	ha	-	-	-	7.426	7.426	7.426
4º corte	ha	-	-	-	-	7.426	7.426
5º corte	ha	-	-	-	-	-	7.426
PRODUÇÃO[1]	**UNIDADE**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1º (18 meses)	t	-	839.109	839.109	839.109	839.109	839.109
2º corte	t	-	-	668.317	668.317	668.317	668.317
3º corte	t	-	-	-	579.208	579.208	579.208
4º corte	t	-	-	-	-	527.228	527.228
5º corte	t	-	-	-	-	-	497.525
PRODUÇÃO TOTAL	k.t.ha$^{(-1)}$	**-**	**839**	**1.507**	**2.086**	**2.613**	**3.111**
Mudas para plantio	k.t	111	111	111	111	111	111
CANA PROCESSADA	**k.t**	**-**	**727**	**1.396**	**1.975**	**2.502**	**3.000**

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota 1: A produção de cana de cada corte foi calculada com base na área de cana nos diferentes fases do ciclo pela produtividade de cada corte indicada na Tabela 14.

De acordo com a oferta de cana para moagem apresentada na Tabela 15, se a usina entrar em operação na capacidade plena do projeto a mesma vai operar com capacidade ociosa por cerca de quatro anos. Por outro lado, se a mesma tiver uma capacidade inferior a 1.400.000 t.cana por safra, as obras de ampliação deverão ser iniciadas antes da entrada em operação da primeira unidade. Com base nessa análise preliminar, foi proposta uma estratégia de modulação de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Estratégia de modulação proposta para os equipamentos industriais.

	FASE 1	**FASE 2**
Capacidade / (%)	60	100
Capacidade / (t. cana/safra)	1.800.000	3.000.000
Capacidade / (t.cana.d^{-1})	9.000	15.000
Capacidade / (t.cana.h^{-1})	375	625
Ano entrada em operação[1]	2	4 ou 5

Nota 1- Conforme indicado na Tabela 15 no primeiro ano não existe cana suficiente para operação da unidade.

É evidente que o ano de entrada em operação da segunda fase vai depender da evolução do plantio em relação ao previsto. Caso o plantio seja antecipado, a segunda fase já deverá entrar em operação no ano quatro. Do contrário, postergam-se em um ano os investimentos e a partida da unidade.

4.3.2 Suprimento de Soja

Foi considerada, como hipótese simplificadora, que a esmagadora será uma empresa de terceiros, a qual realiza o plantio e colheita da soja na área de reforma. Assim sendo, não será abordada nesse trabalho a estratégia de suprimento de soja fora da área de reforma de cana.

Na área de reforma, o plantio será realizado de acordo com o cronograma da Tabela 17, sugerido por Penariol & Segato (2007).

Tabela 17 – Cronograma de plantio e colheita de soja na área de reforma de cana.

Etapas	**Mês**											
	4	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**1**	**2**	**3**
Colheita da cana	X	x	x	x	x	x	x	x				
Preparo do solo		x	x	x	x	x	x	x				
Plantio da soja							x	x				
Colheita da soja											x	x
Plantio de cana	X									x	x	x

Fonte: Penariol & Segato (2007)

4.3.3 Suprimento de Combustível

Devido à necessidade de geração de vapor e energia elétrica durante a entressafra, a biorefinaria precisará aproveitar o palhiço como complemento energético.

A cana-de-açúcar é composta basicamente pelos colmos, onde ocorre o armazenamento do açúcar, pelos ponteiros e folhas (que formam o palhiço da cana) e pelas raízes conforme Figura 10.

A matéria-prima que chega à indústria, além do colmo de cana, possui impurezas vegetais, como plantas daninhas e palhiço, e impurezas minerais, como pedras e terra, que devem ser removidos antes do processamento da mesma.

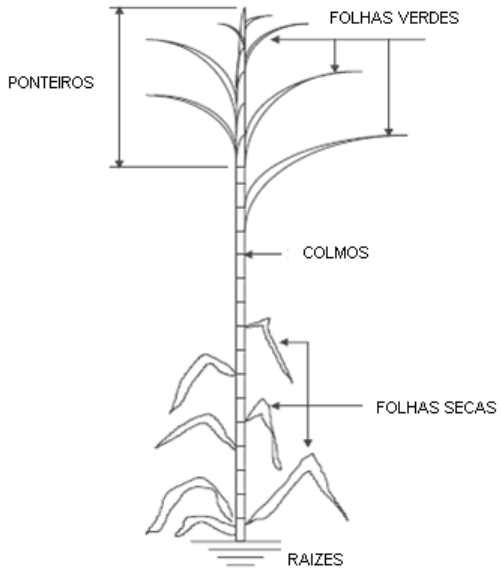

Figura 10 - Partes da Cana de Açúcar

Considerando como premissa de projeto que toda a cana será colhida mecanicamente, teremos a possibilidade de aproveitamento de uma enorme quantidade de biomassa contida no palhiço.

O CTC realizou um extenso estudo visando a quantificar a disponibilidade de palhiço, bem como os impactos econômicos, energéticos e agronômicos de seu recolhimento (PAES & HASSUANI, 2005). Nesse trabalho, foram estudadas algumas rotas tecnológicas para colocar a palha na usina. De forma simplificada, as rotas podem ser divididas em duas, conforme a Figura 11.

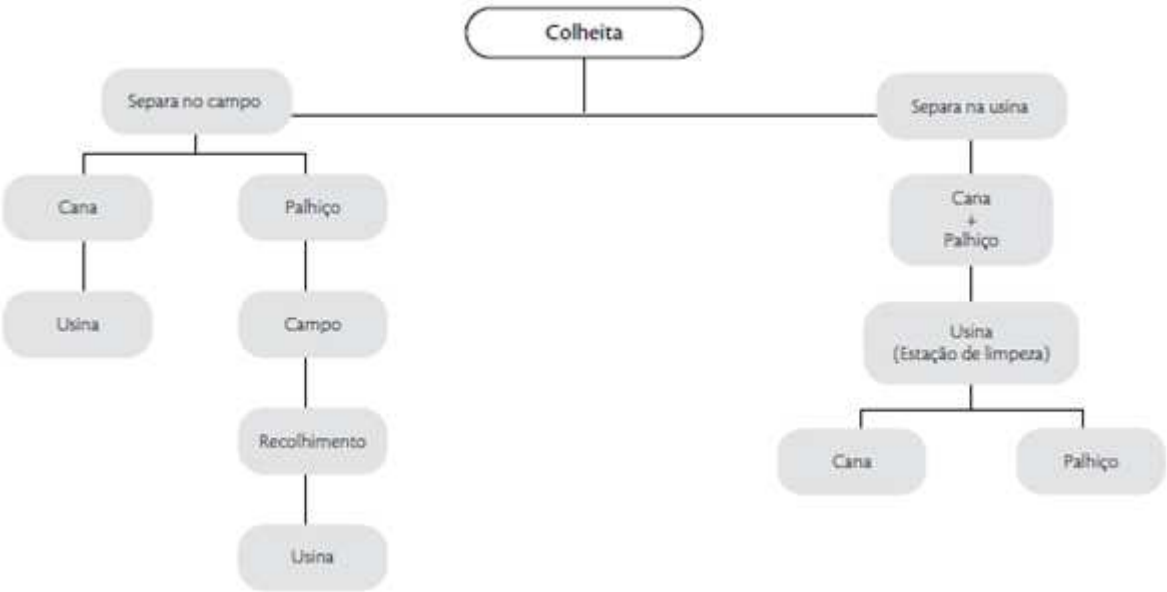

Figura 11 – Alternativas de recolhimento de palhiço. Fonte: CGEE (2010).

No primeiro caso, a colheita ocorre com extratores ligados, deixando a palha no campo para posterior recolhimento com enfardadoras. Já no segundo caso, a colheita é realizada com extratores desligados ou parcialmente ligados, deixando parte da palha junto com a cana, sendo separadas na entrada da usina. A Figura 12 representa de forma esquemática o processo de colheita.

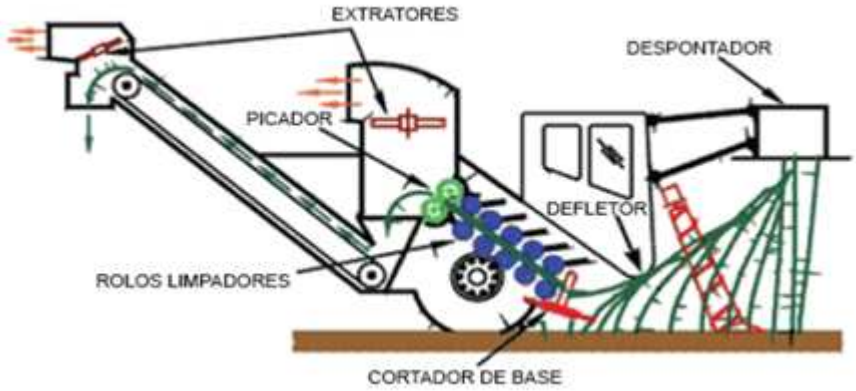

Figura 12 – Etapas do processo de colheita de cana picada. Fonte: CGEE (2009).

Conforme indicado na Tabela 18, a rota que apresentou o melhor desempenho econômico, ou seja, menor custo de palha posta na usina foi a colheita mecânica com parte da palha deixada no campo e o restante sendo levado para usina junto com a cana. Na entrada da usina, a cana e a palha devem ser separadas em um sistema de limpeza a seco. O percentual máximo de recolhimento de palhiço varia de acordo com a região. Em relatório reservado, o CTC considera a recuperação de 30% a 50% do palhiço disponível como bastante desafiadoras, exigindo um grande esforço de coordenação das áreas agrícola e industrial.

No estudo do CTC (PAES & HASSUANI, 2005), foi considerada uma disponibilidade de cerca de 140kg de palhiço (base seca) por tonelada de cana. Para este trabalho foi estabelecido um referencial de recuperação de, no máximo, 50% do palhiço disponível. O restante deve ser deixado no campo para proporcionar uma adequada cobertura vegetal.

Tabela 18 - Custo de recolhimento de palhiço.

	Alternativa 1[1]	**Alternativa 2[2]**	**Alternativa 3[3]**
Palhiço posta na usina / (US$/t)	9,61	23,23	2,74
Separação entre palhiço e cana / (US$/t)	-	2,79	3,69
Processamento do palhiço[4]/(US$/t)	0,89	0,85	1,14
Custo Total[5] / (US$/t)	10,50	26,87	7,57

Notas:
1- Na Alternativa 1 a colhedora opera com os extratores ligados removendo o máximo de palha que é deixada no solo para posterior enfardamento e transporte à usina.
2- Na Alternativa 2 a colhedora opera com os extratores desligados e toda a palha é transportada junto com a cana para ser separada no sistema de limpeza a seco da usina.
3- Na Alternativa 3 a colhedora opera com o segundo extrator desligado e o primeiro em rotação reduzida, ficando parte da palha no campo e o restante é transportado com a cana para posterior separação no sistema de limpeza a seco da usina.
4- Além do custo de ajuste granulométrico do palhiço existe o impacto da perda de processamento no sistema de extração. Cerca de 30% do palhiço que chega ao sistema de limpeza a seco alimenta o sistema de extração.
5 - Valor do dólar considerado no estudo 3R$/US$
Fonte: Projeto BRA/96/G31apud CGEE 2009

4.4 Capacidade de Produção das Unidades e Filosofia de Operação

As unidades auxiliares foram dimensionadas de acordo com o tamanho recomendado por Seabra (2008). A produção de açúcar foi ajustada para possibilitar a estocagem de matéria-prima suficiente para operação das unidades auxiliares durante a entressafra. A produção de etanol foi ajustada para consumir a diferença entre o açúcar contido na cana e o consumido na unidades de sacaroquímica. A produção de biodiesel foi estabelecida com base em uma escala padrão de unidades (100.000 t/ano), e a esmagadora de soja foi dimensionada para suprir a necessidade de óleo vegetal para a planta padrão de biodiesel.

Inicialmente, foram gerados os balanços de massa e energia para condição de operação na entressafra e na safra para, em um segundo momento, buscar uma proposta de modulação dos equipamentos.

A Tabela 19 contém o resultado do balanço de massa, bem como, a capacidade sugerida das unidades:

Tabela 19 - Capacidade das unidades da biorefinaria

	Etanol	**Açúcar**	**Ácido Cítrico**	**Levedura**	**Lisina**	**PHB**	**Extratora**	**Biodiesel**
ATR[1] (%)	62	13	10	5	5	5	-	-
Capacidade Safra[2]	779	4000	164	164	45	33	1639	328
Capacidade Entressafra[2]	0	0	164	164	45	33	1639	328
Capacidade Projeto[2]	800	6000	170	170	50	35	1700	350

Notas:

1- Calculado pela razão do ATR necessário para fabricação do produto pelo ATR contido na cana

2- Capacidade para etanol em $m3.d^{(-1)}$, para açúcar em $sacas.d^{(-1)}$ e para os demais em $t.d^{(-1)}$.

Com base no consumo especifico de cada unidade, foi estimada a demanda de vapor e energia elétrica na safra e na entressafra. Para o balanço de energia foi considerada, como hipótese simplificadora, que o vapor de processo demandado por todas as unidades é de 0,25.M.Pa (2,5bar) e que a usina está equipada com caldeiras de alta pressão a 6,7M.Pa (67bar) e 520^{o}C.

A Tabela 20 indica as necessidades de vapor e energia elétrica da biorefinaria, bem como a necessidade de combustível adicional ao complexo. Conforme pode ser verificado nessa tabela, a biorefinaria necessita de um complemento de 18% do palhiço para possibilitar a operação na entressafra das unidades de sacaroquímica e de 28% do palhiço para manter o mesmo nível de exportação de energia da safra.

Os valores da Tabela 20 possibilitam o estudo do melhor arranjo de caldeiras e turbinas. Para isso, entretanto, é importante estudar as potencialidades de crescimento do complexo e interfaces com outros empreendimentos.

Tabela 20 - Necessidade de combustível para a biorefinaria.

Safra	**Quantidade de palhiço recuperada**		
	0%	**18%**	**28%**
Demanda de vapor de processo na safra / (t/h)	275	275	275
Vapor gerado safra / (t/h)	300	300	290
Demanda de vapor de processo na entressafra / (t/h)	129	129	129
Potência gerada na safra / (MWe)	54,5	54,5	52,7
Consumo de energia na safra / (MWe)	35,6	35,6	35,6
Potência exportada na safra / (MWe)	18,9	18,9	17,1
Área de estocagem de combustível / (ha)	0,6	3,1	5,6
Entressafra			
Vapor gerado na entressafra / (t/h)	129	129	234
Consumo de vapor de processo / (t/h)	129	129	129
Geração na entressafra / (MWe)	25,4	25,4	42,5
Consumo de energia na entressafra / (MWe)	25,4	25,4	25,4
Potência exportada na entressafra / (MWe)	0,0	0,0	17,1
Dias de operação casa de força na entressafra / (d)	22	130	130

Fonte: elaborado pelo autor

Como modelo de operação, os sistemas de extração de cana, produção de açúcar e de etanol operam somente na safra, enquanto as demais unidades operam o ano inteiro.

4.5 Características da Planta Industrial

A descrição do processo industrial tomou como base os livros de Hugot[9] e Camargo (1990), os trabalhos de Bernardo Neto[10], Silva (2007), Seabra (2008), o relatório reservado do CTC, o estudo do CGEE (2009), a consulta a fabricantes de equipamentos e empresas de engenharia e, principalmente, a experiência do autor na análise de diversos processos no setor sucroenergético, químicos e petroquímicos.

[9] HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Volume 1. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969.
[10] BERNARDO NETO, O. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Na fase de identificação de oportunidade, não é necessário um grande detalhamento das tecnologias empregadas. Essa etapa geralmente ocorre durante o projeto conceitual. Desse modo, as unidades anexas à usina foram tratadas como “caixas-pretas”, com seus índices técnicos utilizados para fins de balanço de massa e energia. No caso da usina, as opções tecnológicas foram aprofundadas para possibilitar um entendimento dos requisitos de uma usina projetada para servir como plataforma de uma biorefinaria.

De modo didático, o processo da usina foi dividido em oito etapas, conforme discriminado abaixo:

- Recepção, Preparo e Extração do Caldo;
- Tratamento do Caldo;
- Evaporação;
- Fábrica de açúcar;
- Fermentação;
- Destilação;
- Utilidades;
- Disposição de efluentes e estocagem de produtos.

A Figura 13 indica um diagrama simplificado de uma usina produtora de açúcar e etanol típica.

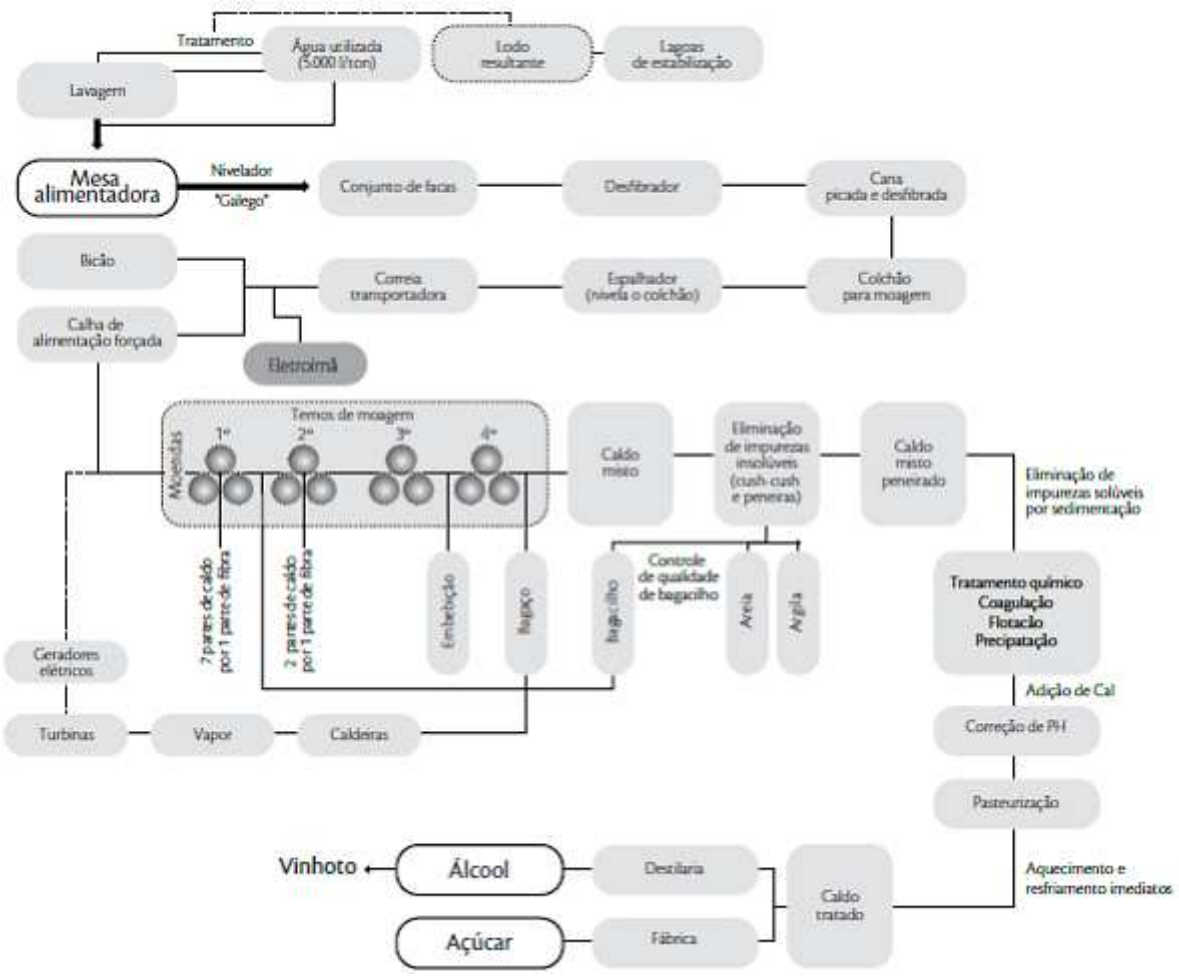

Figura 13 - Esquema de uma usina típica produtora de açúcar e etanol. Fonte: CGEE (2009).

A inserção de unidades de biorefino aumenta a demanda de energia térmica e elétrica do complexo. Dessa forma, um dos pontos importantes é que, na medida em que mais unidades sejam adicionadas ao complexo, seja buscado um aumento de eficiência energética. Além disso, considerando a necessidade de aproveitamento dos açúcares como matéria-prima, ao longo do descritivo da unidade foram destacados os pontos de perdas com as alternativas de melhorias.

Com base nos dados do controle mútuo do CTC nas safras 2005 – 2006 (CGEE, 2009), foram destacadas as perdas mais importantes, indicadas na Tabela 21 (CGEE 2009).

Tabela 21 - Perdas de açúcares típicas das usinas.

Perdas de Açúcar	Valor Atual (%)	Contribuição (%)
Lavagem de cana	0,47	3,32
Extração	3,73	26,38
Torta de filtro	0,54	3,82
Fermentação	5,17	36,56
Perdas na destilação	0,18	1,27
Indeterminadas	4,05	28,64
Total	14,14	100,00

Fonte: CGEE (2009).

Conforme pode ser verificado na Tabela 21, uma atenção especial deve ser dada aos sistemas de extração e fermentação. Com base nisso, estas foram as etapas que foram abordadas com maior profundidade.

4.5.1 Recepção, Preparo e Extração

Essa seção da fábrica tem a finalidade de condicionar a cana (limpeza e abertura das células) e extrair o caldo com um mínimo de perda de açúcares, bem como reduzir a umidade final do bagaço (CGEE, 2009).

O processo industrial inicia com a recepção da cana, quando se define a quantidade e a qualidade da matéria-prima. Essa parte do processo é a interface entre a área agrícola e industrial e tem como objetivo receber a matéria-prima, separar as impurezas vegetais e minerais e encaminhar a mesma para o processo de extração.

Já na recepção iniciam os primeiros cuidados para adaptar uma usina a uma biorefinaria. Considerando o interesse em maior aproveitamento da biomassa residual, podemos esperar uma maior recuperação do palhiço no campo. Conforme já discutido previamente, uma das melhores alternativas para o transporte do palhiço é o recolhimento do mesmo junto com a cana, resultando em uma menor densidade de carga dos caminhões.

Uma usina de grande porte que utilize cana picada (que deve ser processada o mais rápido possível) associada a um maior número de viagens dos

caminhões necessitará de um sistema de recepção de cana muito ágil e adaptado à separação do palhiço do colmo.

Uma vez transportada até a usina, a cana, com todas as impurezas, é pesada em balanças rodoviárias com o objetivo de quantificar a matéria-prima que entra no processo, possibilitando o pagamento, a obtenção do rendimento do processo de fabricação, entre outras informações.

Os caminhões são pesados antes e depois do descarregamento para mensurar a quantidade de cana entregue. Para realizar uma pesagem rápida e correta, deve-se dispor de duas balanças para a determinação conjunta do peso bruto e da tara (CAMARGO, 1990). É importante prever facilidades para uma pesagem rápida uma vez que o palhiço ao ser transportado junto com a cana reduz a densidade de carga dos caminhões aumentando o número de viagens.

Antes que o caminhão seja descarregado, a cana é analisada através de uma sonda de amostragem de matéria-prima que fornece os dados de qualidade da cana-de-açúcar (teor de sacarose, açúcares totais, teor de sólidos solúveis), que serão posteriormente utilizados para pagamento de cana e para calcular os rendimentos e outros parâmetros do processo.

Basicamente, existem dois tipos de sonda. A sonda horizontal cuja amostragem ocorre por tratores e a sonda oblíqua. A sonda oblíqua possibilita uma amostragem em tempos menores e, por isso, é a mais indicada para usinas de grande porte.

Prevendo-se eventuais paradas no sistema de transporte, costuma-se manter certa quantidade de cana em estoque (estoque sobre rodas), que deve ser renovado em um curto espaço de tempo para se evitar a perda de sacarose (SEABRA, 2008).

O tipo de corte determina como será realizada a etapa seguinte de limpeza da cana. O processo de limpeza pode ser realizado com água, denominada de limpeza úmida, ou com ar, denominada de limpeza a seco (BERNARDO NETO, 2009).

A limpeza úmida consiste na utilização de água para remover as impurezas. É utilizado na maioria das usinas, mas tem como inconvenientes o consumo de água e, principalmente, a elevada perda de açúcares que pode ser até 2% do açúcar da cana (BERNARDO NETO, 2009). Este tipo de limpeza é recomendado somente para cana inteira, oriunda do corte manual. De acordo com Marques (2009), na face

cortada da cana, o açúcar contido nas células da cana é facilmente transferido para a água de lavagem por difusão. Na cana colhida mecanicamente, essa perda é maior, uma vez que a matéria-prima é picada na forma de rebolos (ou toletes) que aumentam a superfície de contato com a água.

Muitas usinas estão passando por um processo de transição da colheita manual para a mecanizada. Com isso, recebem ao longo da safra cana inteira e cana picada. Com um sistema de limpeza úmida instalada, a forma mais comum de limpeza de cana das usinas consiste em lavar a cana inteira e não limpar a cana picada. Esta configuração de sistema de limpeza torna inviável o recolhimento do palhiço junto com a cana-de-açúcar, uma vez que as impurezas não serão separadas da cana com impactos negativos nas demais etapas do processo.

Considerando o interesse no aproveitamento integral da biomassa nas biorefinairas, bem como as restrições ambientais, é esperado o processamento predominante de cana picada, colhida mecanicamente e com alta quantidade de impureza vegetal para um melhor aproveitamento do palhiço. A quantidade de palhiço ainda vai depender da tecnologia predominante para o recolhimento de palha. A tecnologia que vem se destacando para esta condição é o sistema de limpeza a seco[11].

A limpeza a seco consiste na instalação de um conjunto de ventiladores que promove a separação das impurezas contidas na matéria-prima. A terra e outras impurezas minerais removidas são devolvidas para a lavoura enquanto os resíduos vegetais podem ser reaproveitados como combustível para a geração de energia elétrica, complementar ao bagaço, para as caldeiras ou destinados a processos de segunda geração.

Este sistema de limpeza pode ser instalado no mesa alimentadora, conforme a Figura 14, ou na esteira que transporta a cana para o preparo. Hoje não existe consenso no mercado sobre qual é o sistema de limpeza mais adequado.

Segundo Procknor[12] (STAB, 2009):

> “ (...) É voz corrente entre os técnicos que a mesa é muito mais cara, inclusive em manutenção. Por outro lado, vemos casos de mesas bem projetadas que separam muita impureza inorgânica sem sopragem nenhuma, o que não pode ser feito nas esteiras metálicas de descarga de cana. Isto significa que a palha separada posteriormente por sopragem na mesa terá muito menos quantidade de impureza inorgânica, que é a principal responsável pelo desgaste prematuro nas facas do triturador de

[11] Consulta a diversas empresas de engenharia e fabricantes de equipamentos
[12] Soluções de fábrica. Revista STAB Julho/Agosto de 2009.

> palha. Não deixa de ser uma vantagem importante. Como a sopragem na mesa é feita em uma largura de 12 m, em comparação com uma largura de três metros na esteira, a mesa necessita de mais potência nos sopradores, mas deveria ter uma melhor eficiência de separação. Mas por outro lado, há sistemas com esteiras que têm dois estágios de sopragem. Há que comparar na prática. Com as informações que temos no momento, preferimos uma mesa bem projetada, com sopragem para baixo que proporciona melhor aproveitamento do espaço físico".

Figura 14 - Sistema de limpeza a seco Simisa/Empral[13], instalado na saída da mesa.

O palhiço, após ser separado dos rebolos, passa por peneiras rotativas que tem como finalidade remover as impurezas minerais e, na seqüência, é triturado para ajuste da granulometria. O ajuste de granulometria é necessário, pois sua baixa densidade não permite a alimentação direta nas fornalhas das caldeiras[14].

O ajuste da granulometria é feita em picadores de lâminas acionados por motores elétricos. Estes picadores estão passando por um processo de amadurecimento tecnológico, pois têm demandando freqüentes paradas por desgaste das facas. Para a biorefinaria seria interessante o uso de dois picadores, se possível, adaptados para picar madeira, ficando um em operação com palhiço e outro na reserva.

Esse equipamento deverá ser alvo dos esforços de pesquisa para o desenvolvimento das futuras biorefinarias, pois é um equipamento importante para um maior aproveitamento do palhiço e pode ser a chave para integração de outras biomassas ligno-celulósicas no processo.

---

[13] Disponível em: <http://www.simisa.com.br/home/produtos.php?id=62>. Acesso em 21 de setembro de 2010.

Outro equipamento que requer um esforço de desenvolvimento é o sistema de limpeza a seco. Nos estudos de aproveitamento de palhiço conduzidos pelo CTC (PAES & HASSUANI, 2005), a eficiência de separação das impurezas minerais (areia) ficou na faixa de 45% a 72%, e a separação de impurezas vegetais (palhiço) de 55% a 60%. Alguns fabricantes[13] afirmam que conseguem separar cerca de 70% das impurezas vegetais. Mesmo com esta eficiência de separação mais alta, inevitavelmente teremos cerca de 30% do palhiço alimentando o sistema de preparo e extração, ocasionando perdas de processamento.

Após passar pelo sistema de limpeza a seco, o palhiço separado é picado e enviado para armazenagem, enquanto os rebolos limpos de colmo de cana são enviados para o sistema de preparo e extração para a separação do caldo do bagaço.

O sistema de preparo tem como objetivo expor as células de cana para facilitar o processo de extração. Atualmente, os equipamentos mais utilizados no preparo da cana são as facas rotativas (niveladoras e picadoras) e os desfibradores (CAMARGO, 1990).

As facas niveladoras uniformizam a alimentação de cana, formando uma massa homogênia, enquanto que o picador (ou facas picadoras) e o desfibrador aumentam a densidade e a superfície de contato permitindo um aumento de capacidade e de eficiência de extração. Após o picador, o colchão de cana passa por um eletroímã que tem como finalidade a remoção de metais que tenham vindo com a cana, protegendo de danos o sistema de extração (MARQUES, 2009).

Considerando-se o uso somente de cana-picada, o sistema de preparo pode ser simplificado. Algumas empresas de projeto (STAB, 2010)[15] têm questionado a necessidade de picadores para cana picada, realizando toda a operação de preparo em um único desfibrador pesado. As vantagens apresentadas são economia de escopo, simplificando as instalações e manutenção.

Outro aspecto relevante é que os sistemas de preparo apresentam grande consumo de potência que podem ser acionados por turbinas a vapor ou por motores elétricos. Devido à maior eficiência dos motores elétricos estes acionamentos têm

---

[14] Disponível em: http://www.piracicabaengenharia.com.br/us/artigos_full.asp?nID=355>. Acesso em 21 de setembro de 2010.

[15] Enigmas e Paradigmas. Revista STAB MAR/ABR 2010. Acesso em http://www.procknor.com.br/ 21/09/2010.

sido preferidos nas instalações mais modernas que visam à venda de excedentes de energia elétrica como co-produto (Bernardo Neto, 2009).

Após o preparo, a cana é enviada para sistema de extração que tem por objetivo separar a parte sólida (fibra) da líquida (caldo). Esta separação utiliza duas tecnologias distintas, sendo elas a extração ou através de moendas, ou através de ou difusores.

Existe uma longa discussão sobre qual é o melhor sistema de extração. No Brasil, o uso de moendas é predominante existindo poucas usinas com difusores instalados. Em janeiro de 2004, das mais de 324 usinas operando, aproximadamente dez tinham difusores instalados[16]. Em 2007 das 393 usinas com sistema de extração definidos, por volta de 22 usinas operam com difusores, representando cerca de 5,6% do mercado. Analisando-se as tomadas de decisões recentes nas últimas 46 escolhas de sistemas de extração, 26,1% das escolhas foram por difusores. Estas informações indicam que, embora o mercado brasileiro seja predominante de moendas, existe um crescente interesse pelo uso de difusores[17]. No exterior, os processos de difusão são mais utilizados na África e na America Central (IGLESIAS, 2009).

O primeiro difusor instalado no Brasil foi na usina Galo Bravo em Ribeirão Preto (1985). O projeto original do equipamento era para beterraba e, por isso, ocorreram muitos problemas na operação do mesmo (MODESTO *et al*, 2009). As dificuldades enfrentadas pela Galo Bravo, em seu difusor, podem ser uma das causas para a baixa utilização da tecnologia de difusão no país.

As moendas e os difusores apresentam diferenças no princípio de extração. Na moenda, o caldo é expelido da fibra por aplicações sucessivas de pressão na medida que a cana passa entre pares de rolos. Para melhorar a extração, realiza-se a adição de água, processo conhecido como embebição, conforme ilustrado na Figura 16 (CAMARGO,1990).

[16] Qual a melhor extração? Revista Alcoolbrás-Janeiro/Fevereiro de 2004.
[17] Apresentação da Dedini na Simtec 2007.

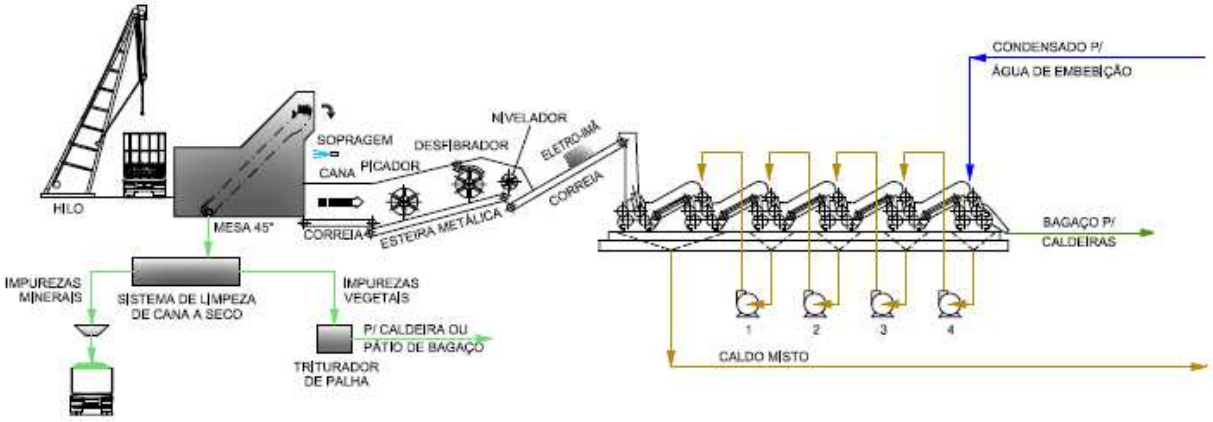

Figura 15 - Sistema de extração com seis ternos de moendas (CTC)[18].

No processo de difusão, a extração sólido-líquido ocorre por lixiviação com a lavagem da água e por difusão do açúcar contido nas células da cana para o caldo de lavagem por diferença de pressão osmótica.

Este processo ocorre pela ação da água e do vapor de água que atuam em contracorrente da camada de cana desfibrada, como na moenda, porém com cerca de treze recirculações de caldo ao invés de cinco como na moagem.

Após o difusor são necessários ainda um rolo desaguador e um terno de moenda para a secagem final do bagaço.

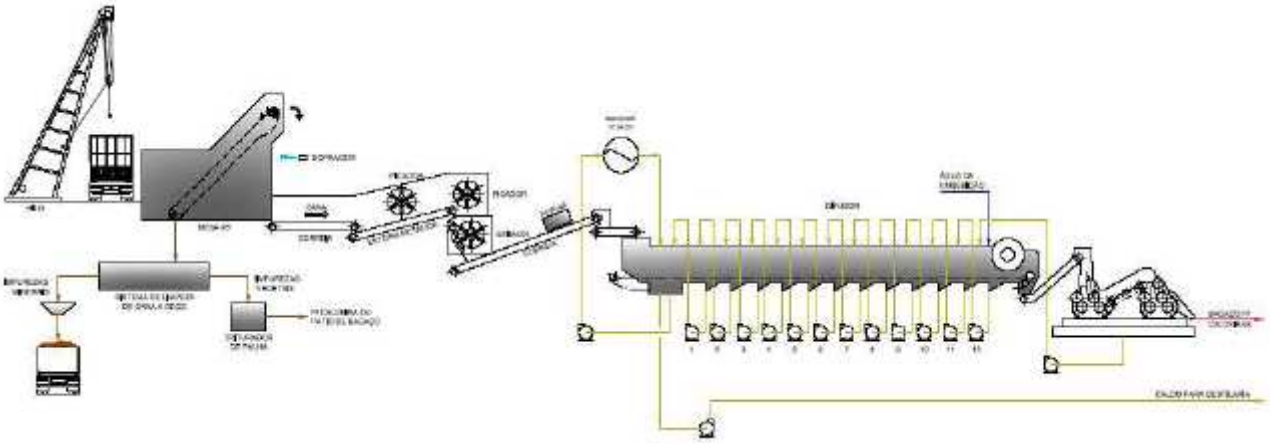

Figura 16 - Sistema de extração com difusor (CTC)[19].

Face às diferenças tecnológicas qual dos processos é mais interessante para uma biorefinaria?

[18] CTC. Estado da Arte na Produção de Etanol – Relatório Reservado. 2007.
[19] CTC. Estado da Arte na Produção de Etanol – Relatório Reservado. 2007.

Nesse caso, essa resposta não é trivial. Não existe um consenso entre fabricantes de equipamentos, empresas de consultoria, usina e outros atores. Cada sistema de extração tem suas particularidades que podem ser vantajosas, dependendo do caso.

Com relação à escala do equipamento, verifica-se uma vantagem aparente para as moendas. Com um tandem de moendas, composto tipicamente por quatro ou seis ternos, é possível se chegar a moagens médias de 30.000TCD o que equivale a uma moagem anual de 6.000.000 t.cana.

Tabela 22 - Capacidade de moagem do tandem de moenda

Tamanho	Moagem diária		
-	3,0 RPM	6,5 RPM	8 RPM
39,37” x 66,93”	4.416	9.600	11.808
57,08” x 98,42”	14.256	30.888	38.016

Fonte: Simisa[20]

Os dados de catálogo dos difusores indicam capacidade de até 17.000TCD para extração de até 98,2%.

Tabela 23 - Capacidade de moagem dos difusores.

Largura / (m)	Capacidade Nominal / (TCD)	Capacidade Máxima Recomendada / (TCD)
6	6000	7000
9	9000	10500
12	12000	13500
15	15000	17000

Fonte: Dedine[21].

Apesar da limitação de capacidade, valem alguns comentários. O primeiro deles é que, conforme já discutido anteriormente, poucas usinas têm capacidade de moagem acima de 15.000TCD. O segundo ponto é que, mesmo que a usina pretenda alcançar capacidades superiores a 15.000TCD ,isto pode levar vários anos justificando a modulação dos investimentos.

Além disso, os difusores podem alcançar eficiências superiores com custo de manutenção menor, conforme indicado na Tabela 24.

[20] http://www.simisa.com.br/home/produtos.php?id=61&tp=p acesso em 22/09/2010. Considerado a rotação recomendade de 6,5 podendo chegar a 8rpm em caso de picos de produção.
[21] http://www.codistil.com.br/pt/difusor.html acesso em 22/09/10. A Brumazzi indica capacidade similar e a lista de aplicações da Sermatec constam capacidades de até 12.000 TCD.

Tabela 24: Comparação moenda com difusor

Item	Moenda	Difusor
Eficiência Extração[1]	97%	98%
Custo de manutenção[2]	-	menor
Número de operadores	8 a 9	3
Custo de investimento[3]	-	Menor
Consumo de energia térmica	Baixo	Alto
Consumo de energia elétrica	Alto	Baixo
Risco de acidentes[4]	Alto	Menor

Fonte: Modesto, M. *et al* (2009).

Notas:

1- O artigo da referência indica 99%. Foi adotado um valor de 98% com base na experiência própria e consulta a fabricantes de equipamentos e empresas de engenharia.

2- Autor indica custo de manutenção do difusor 70% inferior ao das moendas. Isto se deve ao menor consumo de eletrodos para chapisco e menor consumo de lubrificantes. Além disso, a manutenção do difusor é realizada na própria usina, enquanto as moendas precisam ser desmontadas e enviadas para manutenção no fabricante na entressafra. Este aspecto assume maior relevância nas áreas de expansão devido à maior distancia das usinas em relação aos fabricantes de equipamentos.

3- O difusor não necessita das fundações pesadas de um tandem de moenda, pode ser montado no tempo. Como o caldo extraído no difusor é mais limpo e mais quente o sistema de aquecimento e clarificação é simplificado. Por outro lado, devido à maior embebição (mais água) requer maior área de evaporação[22].

4- O corpo do difusor é fechado, reduzindo o nível de ruído e acidentes. A operação de chapisco realizada manualmente nas moendas é uma atividade de risco que ainda não foi completamente automatizada.[23]

O difusor produz um bagaço final e um caldo com temperatura mais elevada, devido à temperatura mais alta do processo de difusão. Além disso, o bagaço produzido apresenta uma granulometria maior, pois não ocorre o processo de dilaceração das fibras existente na moagem.

Em geral, o caldo extraído do difusor é mais limpo, exigindo menores investimentos em tratamento. Além disso, o mesmo sai a uma temperatura mais elevada do que na moenda, porém mais diluído. Assim, seria necessário um balanço

[22] Com base na experiência do autor e consulta a empresas de engenharia.
[23] Com base na experiência do autor.

energético comparativo global para conhecer o impacto final na capacidade de venda de energia elétrica.

Com relação à flexibilidade temos uma vantagem para as moendas devido à facilidade de escalonamento de investimentos. Muitas vezes são instalados quatro ternos de moenda na primeira fase do projeto sendo adicionados mais dois somente quando aumenta a oferta de matéria-prima. Os fabricantes de difusor estão buscando equacionar esta questão, permitindo o aumento da largura dos equipamentos.

Na prática, como não existe um consenso sobre qual o melhor sistema de extração para uma destilaria autônoma, os empresários têm optado pelas moendas por tradição.

A viabilização das tecnologias avançadas pode ser determinante na escolha do sistema de extração. Carecem estudos sobre as diferenças do bagaço das moendas e difusores nos processos de hidrólise, pirólise e gaseificação, bem como do impacto das impurezas vegetais (palhiço) nos dois sistemas de extração. Conforme comentado previamente, o sistema de limpeza a seco é capaz de separar cerca de 50% a 70% do palhiço que chega junto com a cana, sendo o restante enviado ao sistema de extração juntamente com a cana.

Para o propósito deste trabalho, qualquer um dos sistemas de extração mostra-se adequado.

4.5.2 Tratamento do Caldo e Evaporação

O caldo extraído da cana ainda contém grande quantidade de resíduos sólidos, impurezas orgânicas minerais, tais como, terra e microorganismos, os quais precisam ser eliminados para se ter uma boa qualidade de açúcar e eficiência na produção de etanol (MARQUES, 2009).

O caldo, comumente, passa por um tratamento físico, físico-químico e térmico. O tratamento físico consiste em uma etapa de peneiramento em que as impurezas grosseiras são removidas. Estas impurezas, se forem arrastadas para a fermentação, vão para a centrífuga e prejudicam a recuperação de fermento. Isto

acaba resultando em um consumo de açúcares para produção de mais fermento com conseqüente menor produção de etanol.

As impurezas menores, no entanto, não são removidas no tratamento físico e permanecem no caldo. Para separação destas impurezas, é comum a adição de produtos para que a solução atinja o seu ponto isoelétrico, propiciando a aglomeração das partículas pequenas em partículas de dimensões maiores. O controle deste processo é efetuado pelo ajuste de pH.

O aquecimento do caldo acelera as reações químicas, facilitando as reações de coagulação e floculação dos colóides e não açúcares protéicos. O aquecimento visa também a eliminar microorganismos que podem infectar as leveduras no processo de fermentação e possibilitar a remoção do ar e dos gases dissolvidos. Estudos indicam que nos sistemas de pasteurização do caldo a cerca de 90 a 95^{o}C por um curto período de tempo, não se consegue uma efetiva eliminação dos microorganismos e nem uma efetiva desnaturação das proteínas, que causam alto consumo de antiespumante e dispersante na fermentação.

Os efeitos de redução do número de microorganismos contaminantes e do volume de espuma na fermentação são bastante evidentes quando se provoca o aquecimento do caldo em torno de 105^{o}C com posterior decantação a 98^{o}C, com um tempo adequado de retenção do caldo, conforme pode ser verificado na Tabela 25 (CAMARGO, 1990).

Tabela 25 - Efeito do aquecimento e da decantação no rendimento da fermentação e no consumo de antiespumante e dispersante.

	Aquecido a 90^{o}C sem decantação	**Aquecido a 105^{o}C com decantação**
Rendimento Fermentativo / (%)	83,8	88,9
Produção de etanol anidro / (l/tcana)	73,1	77,5
Consumo de dipersante / (g/l de etanol)	0,098	0,032
Consumo de antiespumante / (g/l etanol)	0,33	0,24

Fonte: Camargo, 1990

Uma vez que a biorefinaria proposta contempla a produção de leveduras, foi selecionado o tratamento completo do caldo com aquecimento a 105^{o}C para buscar uma levedura com menos influências de produtos químicos e antibióticos.

Além do aquecimento do caldo de cinco a sete graus Celsius acima da temperatura de ebulição, é importante realizar a decantação do caldo. Antes do

decantador, o caldo aquecido passa por um balão de flash, onde ocorre uma diminuição brusca de pressão provocando uma ebulição espontânea do caldo, eliminando assim o ar nele dissolvido que, quando presente, dificulta a decantação das impurezas mais leves.

A decantação, também chamada de clarificação, é a etapa de purificação do caldo pela remoção das impurezas floculadas nos tratamentos anteriores. Quando não é realizada a decantação, ocorre uma grande quantidade de material sedimentado no fundo da dorna. Ao recircular estes materiais para a fermentação, podem ocorrer problemas nas centrífugas e acúmulo de impurezas no fermento, prejudicando a produção de etanol e leveduras.

Para auxiliar a decantação são adicionados polímeros para possibilitar a aglomeração de partículas, formando flocos mais densos e aumentando a velocidade de decantação.

Até o decantador, o tratamento do caldo da biorefinaria estudada é comum para todos os processos. Após sair do decantador, o caldo, agora chamado de clarificado, é encaminhado para a produção de açúcar e etanol e para aqueles processos sucroquímicos que utilizem caldo de cana como matéria-prima.

No processo de decantação, obtém-se o caldo livre das impurezas, que é chamado de caldo clarificado, e o lodo (impurezas que decantam). O caldo clarificado passa por uma peneira com malhas menores que a do caldo misto, visando a eliminar o bagacilho ainda contido no caldo, e segue para a etapa de evaporação. O lodo também passa por um sistema de filtração, para recuperação de parte de seu conteúdo de açúcar. O sistema de filtração, normalmente, ocorre em filtros prensa ou filtros rotativos a vácuo, em que o lodo é filtrado, gerando uma torta, que é reciclada para a lavoura, e um caldo filtrado que é incorporado no caldo antes da decantação. Nesse ponto do processo, ocorre mais uma significativa perda de açúcares, os que não são extraídos dos resíduos sólidos da torta de filtro e, conseqüentemente, são perdidos.

Após a decantação, existe uma separação entre o caldo que será destinado à fabricação de açúcar e o que será fermentado para produção de etanol.

O caldo clarificado, resultado do tratamento de caldo, é aquecido novamente e segue para a etapa de evaporação, realizada por meio de conjunto de evaporadores (geralmente a vácuo), dimensionados para concentrar os sólidos para as etapas seguintes. Geralmente, na produção de etanol, o caldo clarificado passa

apenas um conjunto de simples de evaporadores, ajustado para obtenção de uma concentração de 18% de sólidos a fim de otimizar a eficiência da fermentação. Em alguns casos, o caldo clarificado, pode não passar pela etapa de evaporação e ser misturado apenas com o mel residual resultante da produção do açúcar. Neste procedimento, já é possível atingir a concentração de 18% de sólidos (MARQUES, 2009).

Para a produção de açúcar, o caldo clarificado passa por conjunto de evaporadores, até atingir uma concentração de 65% de sólidos, ideal para o início do processo de cozimento nas fábricas de açúcar (MARQUES, 2009).

Na fase de evaporação, é comum a ocorrência de perdas de açúcar por arraste na evaporação e a decomposição dos açúcares redutores devido a altas temperaturas. Por essas perdas serem de difícil determinação, elas também são classificadas como perdas indeterminadas (MARQUES, 2009).

No contexto de uma biorefinaria, os evaporadores têm uma importância muito grande com relação à eficiência energética. A maioria das usinas é equipada com quatro a cinco efeitos de evaporação em equipamentos de tubos curtos conhecidos como evaporadores Robberts (FULMER, 1991). Esses evaporadores são do tipo casco-tubo, onde o caldo a ser concentrado entra no equipamento passando, internamente, nos tubos em sentido ascendente, enquanto o vapor se condensa externamente. Neste tipo de evaporador, é possível manter apenas dois ou, no máximo, três efeitos em EME (Evaporadores de Múltiplos Efeitos) com temperaturas de formação do vapor vegetal, em níveis de pressão maior do que a atmosférica conforme indicado na Tabela 26.

Tabela 26 - Temperatura do vapor vegetal nos diferentes efeitos

Efeito	**Temperatura de Operação / ^{o}C**
1	120
2	110
3	100
4	90
5	80

Fonte: (FULMER, 1991)

Isso ocorre devido ao coeficiente global de transferência de calor que é baixo e necessita de uma diferença de temperatura mínima de troca de calor variando, em média, entre 10 e 20^{o} C, aumentando principalmente nos últimos

efeitos. A temperatura do primeiro efeito não pode ser aumentada em função da caramelização do açúcar, e a temperatura do último efeito não pode ser reduzida, pois o aumento do vácuo leva a dificuldades operacionais, devido à entrada de gases incondensáveis e aumento da viscosidade (FULMER, 1991).

Uma tecnologia promissora, para melhorar a eficiência energética na evaporação, é a utilização de evaporadores do tipo *Falling-Film* que, em função da maior velocidade de passagem do caldo, permite trabalhar com temperaturas de 5 a 20^{o}C superiores no primeiro efeito, sem causar caramelização. Esses evaporadores foram introduzidos na indústria de açúcar da beterraba durante a década de 60. Eles possuem a vantagem de permitir maiores velocidades para o caldo, e maiores coeficientes globais de transferência de calor, podendo por esta razão, utilizar pequenas diferenças de temperaturas entre os efeitos, ou mesmo aumentar a temperatura do vapor de entrada (130^{o}C -135^{o}C) sem problemas no processo de fabricação do açúcar. Dependendo desta temperatura, é possível que o EME trabalhe em todos os efeitos com pressão acima da atmosférica (OGDEN, 1990).

Nos últimos 10 anos, os maiores desenvolvimentos na área de evaporação têm sido relacionados com os evaporadores de placas (WILHELMSSON, 1998 e 1999, KAMPEN *et al*, 1999). As vantagens dos evaporadores de placas se baseiam nas mesmas dos trocadores de placa, que, devido às pequenas espessuras das placas (cerca de 0,8mm comparados aos 2mm de espessura de parede nos tubos), possuem melhores coeficientes globais de transferência de calor e são mais compactos, diminuindo os custos de investimentos. Além disso, o menor tamanho e volume também diminuem o tempo de residência do caldo no equipamento, reduzindo as perdas de sacarose. Como no caso dos evaporadores de casco-tubo, os equipamentos de placas também podem ter a entrada do fluxo do caldo de forma ascendente ou descendente (“*rising film plate*” ou “*falling film plate*”).

Enquanto o modelo *Roberts* de EME tem sido o mais utilizado mundialmente de forma geral, os evaporadores de filme descendente de tubos estão bem arraigados nas indústrias de produção de açúcar derivada da beterraba, laticínios, e papel entre outras, mas ainda não possuem forte tradição na usina açucareira derivada da cana. Esta situação, entretanto, vai se revertendo a medida que há uma preocupação com a otimização energética do processo e com a geração elétrica.

Uma tecnologia com potencial de redução drástica no consumo de vapor são os sistemas de recompressão de vapor. Conforme será visto posteriormente, a

biorefinaria possui excedente de eletricidade que poderia ser empregada para movimentar um compressor que comprima o vapor do quinto efeito do evaporador para ser utilizado como fonte quente no primeiro efeito. Devido ao elevado custo de capital, abundancia de combustível e baixo fator de utilização das usinas esta tecnologia ainda não foi viabilizada no país.

Após o processo de evaporação, o caldo passa a ser chamado de xarope, nome usado para o caldo concentrado na saída da evaporação destinado à fábrica de açúcar. Para a obtenção do açúcar, ainda são necessárias as fases de cozimento, centrifugação e secagem.

Para a produção de etanol, o caldo clarificado após a decantação é resfriado para que possa ser fermentado. Visando a reduzir as perdas na fermentação, após o resfriamento, o caldo está mais susceptível a contaminações e, por isso, o sistema a jusante do tratamento térmico, até a seção de fermentação, deve ser projetado com critérios de engenharia sanitária (CGEE, 2009).

4.5.3 Fábrica de Açúcar

A biorefinaria pode produzir açúcar como produto ou como matéria-prima para a produção de outras moléculas de maior valor agregado. Caso a biorefinaria deseje produzir açúcar somente como matéria-prima para as unidades anexas, o processo pode ser simplificado, pois os requisitos de qualidade poderiam ser menores do que os necessários para a comercialização deste insumo. Todavia, o complexo perde a flexibilidade de comercializar o produto, obtendo melhores margens caso ocorra uma elevação nos preços do açúcar a ponto de não compensar o processamento do mesmo.

Conforme já comentado, o xarope após sair dos evaporadores passa por uma etapa de cozimento onde é removida mais água até o início da formação dos cristais de sacarose. O produto final desta etapa é chamado de massa cozida. Esta massa cozida é enviada aos cristalizadores que são responsáveis pela formação final dos cristais. Na saída dos cristalizadores, a massa é centrifugada, separando os cristais de sacarose, que dão origem ao açúcar, do mel. O mel é uma solução rica em açúcares com menos sacarose que o caldo original.

O mel pode ser misturado com o xarope e encaminhado para uma nova cristalização e centrifugação. Em plantas tipicamente açucareiras, este processo ocorre três vezes. No caso da biorefinaria o mel é insumo para o processo de fermentação ou produção dos demais produtos. Assim sendo, bastam uma ou duas etapas de cristalização.

Na medida em que este processo se repete o investimento aumenta e a remoção de sacarose diminui. Na primeira cristalização, cerca de 68% da sacarose é removida. Na segunda, cerca de 21% (FULMER, 1991). Quando realizamos menos processos de cristalização e aproveitamos o mel, temos uma economia de escopo.

Quando o processo ocorre em batelada à unidade consome mais vapor. O vapor é utilizado para limpeza dos equipamentos após a batelada e durante a etapa de evaporação da água restante no xarope. No processo em batelada, cerca de 1kg de vapor remove cerca de 0,6 à 0,8kg de água (FULMER, 1991). No processo contínuo ocorre à redução, em 25%, no consumo de vapor e, principalmente, estabiliza a unidade evitando picos de consumo.

Como a maioria das usinas que possuem destilarias anexas usa duas cristalizações, este arranjo foi considerado neste trabalho. Os cristais de açúcar passam por um processo de secagem e posteriormente são enviados para armazenagem a granel.

4.5.4 Fermentação

A fermentação tem, como objetivo, converter em etanol os açúcares disponíveis na matéria-prima. Juntamente com a extração, é o processo em que ocorrem as maiores perdas de açúcar.

A fermentação é composta do processo fermentativc o, propriamente dito, da centrifugação e do tratamento do fermento. Trata-se de um processo biológico em que uma levedura, previamente propagada, metaboliza os açúcares, resultando na produção de etanol e de outros subprodutos.

Existem, basicamente, dois tipos de processos fermentativos sendo usados, industrialmente, no Brasil, sendo eles o sistema em batelada alimentada e o sistema contínuo multi-estágio. Ambos os processos praticam o reciclo do fermento.

A fermentação contínua apresenta custos de instalação menor, maior facilidade de automação e requer menos mão de obra em comparação com a batelada. Apesar destas vantagens, atualmente cerca de 80% do etanol é produzido por fermentação em batelada (CGEE, 2009).

Ocorre que, diferente da fermentação contínua em que as dornas estão sempre cheias, no processo em batelada as dornas podem ser limpas ao termino de cada ciclo. A assepsia das dornas resulta em menores contaminações o que, além de possibilitar um rendimento fermentativo melhor, acaba reduzindo o consumo de antibióticos e antiespumante[24].

Considerando a possibilidade de expansão da biorefinaria com a produção de etanol de segunda geração via hidrólise enzimática, optou-se pelo processo de fermentação em batelada devido à sua flexibilidade operacional e maior facilidade para lidar com condições mais desfavoráveis de qualidade de mosto.

Visando recuperar o etanol arrastado com o CO_2 gerado na fermentação, o projeto das dornas considera que as mesmas são fechadas e o CO_2 coletado é enviado para uma torre de lavagem em que cerca de 95% a 99% do etanol perdido é recuperado. Isto, em geral, representa cerca de 1% da produção total de etanol (Biomassa pra Energia 2008). O CO_2 exausto da coluna de lavagem será, futuramente enviado para produção de microalgas.

A operação de fermentação apresenta pequeno consumo de energia, utilizando vapor para a limpeza das dornas e energia elétrica para o acionamento mecânico. Apesar do baixo consumo de energia, a fermentação pode afetar, consideravelmente, o balanço termoelétrico de uma usina, uma vez que o teor alcoólico do vinho obtido, após a fermentação, afeta o consumo de energia da destilação e a geração de vinhoto.

Um dos parâmetros para obtenção de teores alcoólicos mais elevados é o rigoroso controle de temperatura da fermentação. Como o processo de fermentação é exotérmico, o calor gerado nas dornas precisa ser removido para o adequado controle da temperatura. As usinas modernas utilizam trocadores a placas para

[24] Notas de aula Professor Henrique Amorim da Fermentec no curso MPagro em 2009.

resfriamento das dornas com água de torres de resfriamento. Estes trocadores permitem altos coeficientes de troca térmica, porém a eficácia do processo de remoção de calor depende da temperatura da água de resfriamento. A temperatura ideal para fermentação se situa entre 20 e 32^{o}C o que é difícil de controlar em climas tropicas, como o do Brasil, em que as temperaturas de bulbo úmido da água de resfriamento podem chegar a cerca de 36^{0}C em alguns períodos (Oliverio, 2010).

Visando a verificar o impacto da temperatura nas condições de fermentação, foram realizados experimentos na Cosan com a utilização de água gelada como fluido de controle de temperatura da dorna. A água gelada foi produzida por um chiller de absorção em uma unidade semi-industrial e possibilitou a obtenção de vinhos com teor alcoólico superior a 15GL com a fermentação conduzida à 30^{o}C.

Conforme indicado na Tabela 27, é possível reduzir o consumo de vapor da destilação em 0,56kgvapor/letanol produzindo um vinho com teor alcoólico de 16^{o}GL.

Tabela 27: Impacto do teor alcoólico no consumo da destilação

Teor Alcoólico do Vinho / (^{0}GL)	**Consumo de Vapor destilação / (kg/l de etanol)**
8	2,10
9	1,92
10	1,76
12	1,64
14	1,57
16	1,54

Fonte: Amorim (2009)

Na análise econômica realizada, não foi considerado o uso de chiller de absorção para o controle de temperatura da fermentação. No projeto de expansão, entretanto, esta tecnologia seria adotada uma vez que, para aumentar o fator de utilização da usina, foi considerada a produção de etanol durante a entressafra em que ocorrem os picos de temperatura. Como fonte de açúcar na entressafra, foi considerada a utilização de sorgo sacarino e bagaço via hidrolise enzimática.

4.5.5 Destilação

A destilação tem como objetivo a retirada do etanol do vinho e o aumento da concentração do etanol de forma a tornar o produto especificado para comercialização. Compreende, basicamente, as etapas de separação e retificação do etanol. Em alguns casos, quando se deseja produzir etanol anidro, a desidratação também pode ocorrer por destilação.

Juntamente com o sistema de evaporação, os processos de destilação são os maiores consumidores de vapor do processo.

A tecnologia empregada, no país, foi desenvolvida para produção de etanol a partir do melaço, com baixo grau de automação em aparelhos de pequeno porte (CGEE, 2009). No Brasil, o tamanho médio dos equipamentos está na faixa de $300 m^3.d^{-1}$ (Biomassa para Energia, 2008) e os maiores aparelhos estão na faixa de 1000 m^3/d [25]. Para a biorefinaria proposta o aparelho de destilação considerado foi de 800 $m^3.d^{-1}$, composto de coluna de separação e retificação.

Visando a reduzir a vinhaça gerada no processo, foi considerado o uso de aquecimento indireto nos equipamentos de destilação. A maioria dos equipamentos no Brasil, utiliza a borbotagem do vapor vegetal na destilação[26]. Nesse tipo de equipamento, o vapor vegetal se condensa em contato com o vinho dentro do aparelho de destilação resultando em um aumento da vinhaça gerada.

O processo de destilação e retificação em múltiplos efeitos permite uma redução no consumo de vapor de processo e demanda de água de resfriamento. A integração energética de diferentes configurações de destilação com o sistema de evaporação pode reduzir drasticamente o consumo de vapor de processo.

[25] Consulta a fabricantes de equipamentos
[26] Vapor resultante da água extraída do caldo de cana nos evaporadores

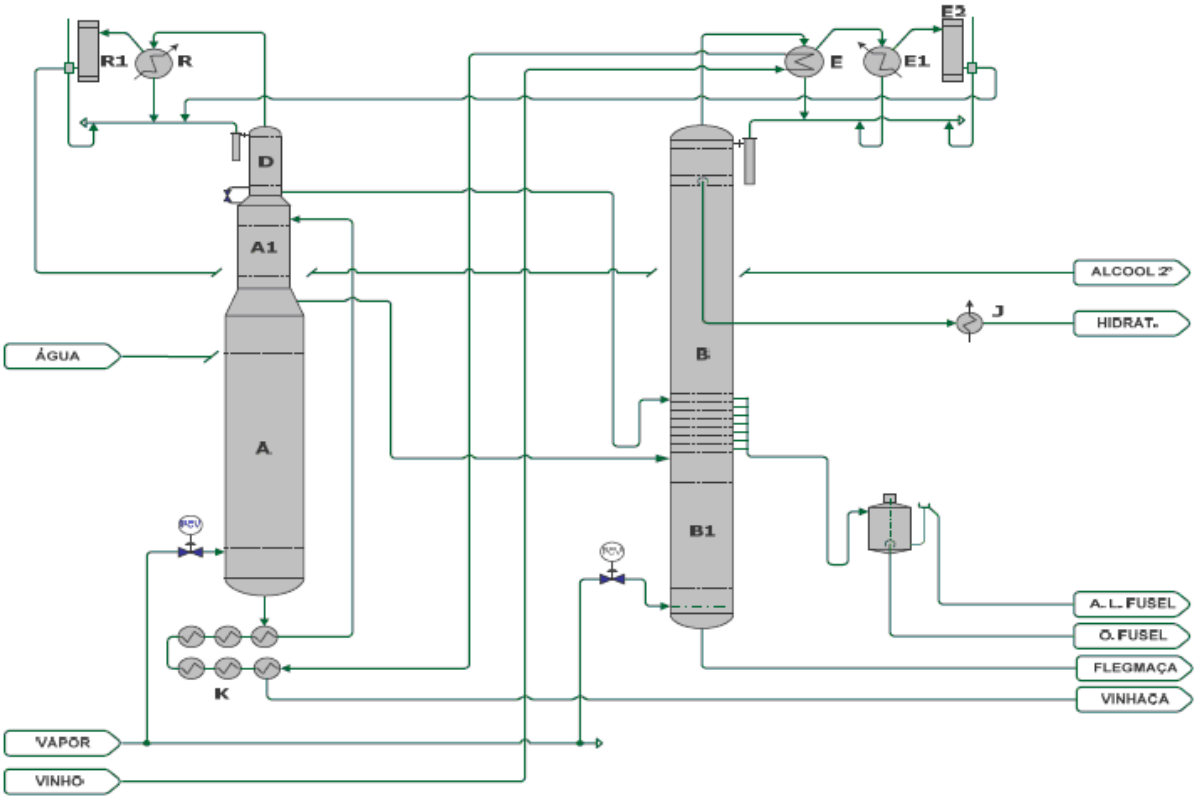

Figura 17: fluxograma simplificado de uma destilação convencional (MEIRELLES, 2006).

O consumo específico de vapor das usinas no Brasil está entre 400 kg.t.cana^{-1} e 500 kg.t.cana^{-1}. Integrando um aparelho de destilação, operando com pressão de 6,25 bar (0,625M.Pa), de forma similar à Figura 18 , com um sistema de evaporação é possível se chegar a um consumo específico de vapor de 155 kg.t.cana^{-1} (FULMER, 1991).

Para a biorefinaria, foi considerada destilação atmosférica uma vez que enquanto a unidade de segunda geração não está disponível o fator de operação da destilação é de aproximadamente 55%. Com esta baixa utilização dos equipamentos a atratividade dos investimentos em integração energética de processos fica reduzida.

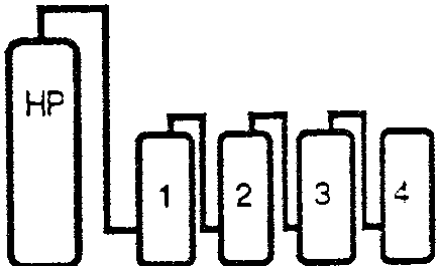

Figura 18: Integração energética de uma coluna pressurizada com quatro efeitos de evaporação, resultando em um consumo específico de vapor de 155 kg.t.cana^{-1} (FULMER, 1991)

De forma similar ao que foi comentado no sistema de evaporação, é possível utilizar recompressão mecânica de vapor trocando energia térmica por elétrica conforme indicado na Figura 16. Com este arranjo é possível obter consumos de vapor na destilação próximos de 0,8kg.l^{-1} de etanol.

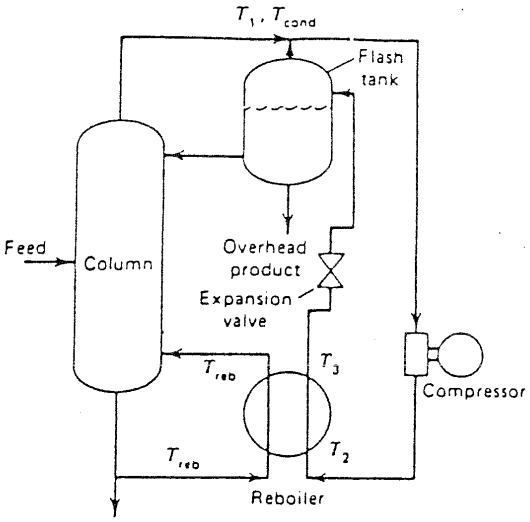

Figura 19: Fluxograma simplificado de um sistema de recompressão mecânica de vapor em uma coluna de etanol hidratado (OGDEN & FUELMER, 1990).

4.5.6 Casa de Força

A transformação da cana em produtos comercializáveis requer o uso de uma grande quantidade de energia. Esta energia pode ser dividida em energia térmica e energia mecânica.

A energia térmica é utilizada, basicamente, nos processos de aquecimento como evaporadores e colunas de destilação, enquanto que a energia mecânica é empregada nos sistemas de extração (moendas) e nas máquinas de fluxo (bombas e compressores).

A produção combinada de energia elétrica (ou mecânica) com energia térmica útil é conhecida por cogeração.

Basicamente, existem dois ciclos de cogeração, o *topping* e o *bottoming*. No ciclo *topping,* o combustível é queimado em caldeiras, gerando vapor. Este vapor passa por turbinas que acionam geradores elétricos e, depois, é encaminhado para

ser aproveitado como fonte térmica no processo a uma pressão reduzida conforme indicado na Figura 20.

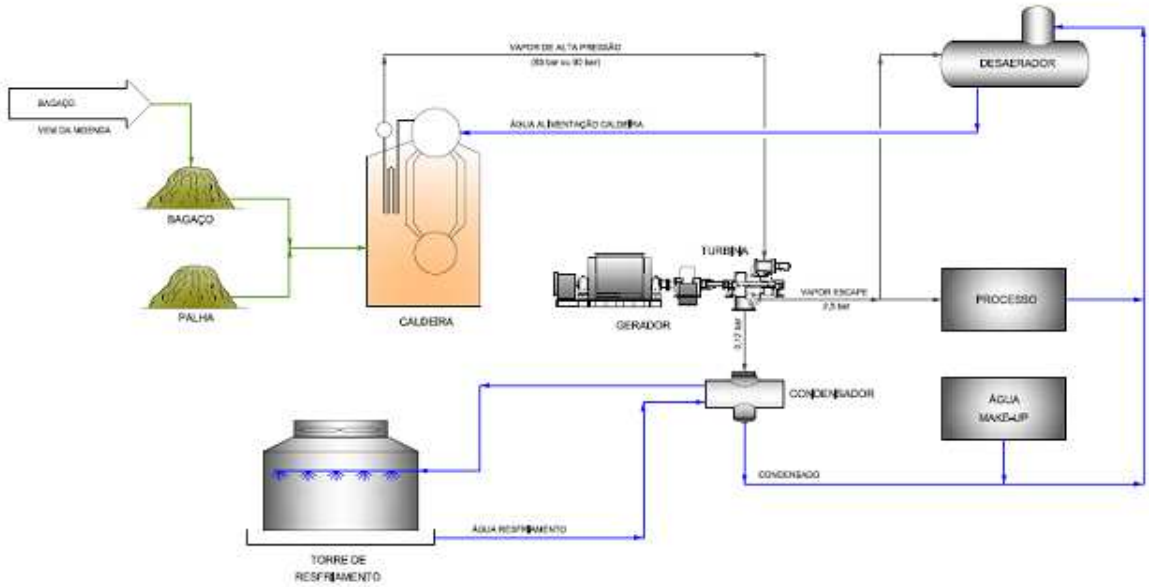

Figura 20: Fluxograma simplificado da geração de calor e energia por Ciclo Rankine (*topping*) em usina[27]

No ciclo *bottoming*, o combustível é queimado em uma turbina a gás produzindo energia elétrica e os gases exaustos da turbina são utilizados como fonte térmica diretamente ou podem passar por uma caldeira de recuperação de calor gerando vapor. Este vapor pode ser utilizado diretamente como fonte térmica ou pode acionar uma turbina de forma similar ao ciclo *topping*. Quando o vapor gerado na caldeira recuperadora também passa por uma turbina chamamos este ciclo de ciclo combinado.

A escolha do ciclo mais adequado depende de uma série de fatores, como a proporção de energia térmica e elétrica (ou mecânica) desejada, o tipo de combustível disponível, entre outros. Tradicionalmente, as usinas utilizam sistemas do tipo *topping*, pois a demanda de energia térmica é cerca de dez vezes maior que a necessidade de energia elétrica da usina. Além disso, o bagaço é sólido e teria que ser gaseificado previamente para ser queimado em turbinas a gás. Considerando que a gaseificação de biomassa ainda não está madura a escolha por

[27] CTC. Estado da Arte na Produção de Etanol-Relatório Reservado. 2007

um ciclo *bottoming* levaria à necessidade de utilização de outros combustíveis mais nobres como o gás natural ou o próprio etanol.

Devido à disponibilidade de bagaço as usinas não dependem de energia fóssil para seus processos e, por isso, a redução de consumo de energia não foi priorizada no passado. Na década de 1980, as usinas buscavam a auto-suficiência em energia, e aquelas que tinham dificuldades para vender o excedente de bagaço utilizavam caldeiras de baixa pressão para eliminarem o bagaço.

Com a desregulamentação do setor elétrico, permitindo que o produtor independente tenha acesso às redes de transmissão e distribuição, a energia elétrica passou a ser um novo produto das usinas. Isto tem estimulado a melhoria da eficiência energética das unidades. Ainda assim, o consumo de energia térmica é muito elevado se comparado aos valores obtidos nas usinas de milho e beterraba.

Durante o dimensionamento da casa de força das usinas, os projetistas consideram as necessidades de consumo de vapor do processo e a disponibilidade de combustível.

Conforme pode ser verificado na Tabela 28, o critério de dimensionamento da casa de força utilizou o critério de atendimento às necessidades de vapor de processo uma vez que o combustível precisa ser estocado para uso na entressafra.

Tabela 28 - Dimensionamento da casa de força da biorefinaria

Ano	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Moagem / (M.t.cana por safra)	0,7	1,4	2	2,5	3
Moagem horária / (t.cana.h^{-1})	370	370	370	625	625
Demanda de vapor usina autônoma / (t.h^{-1})	148	148	148	250	250
Demanda de vapor da biorefinaria / (t.h^{-1})	148	148	148	237	275
Geração de vapor para consumir todo o bagaço na safra / (t.h^{-1})	220	220	220	350	350
Capacidade de geração de vapor instalada na biorefinaria / (t.h^{-1})	170	170	170	340	340
Demanda de energia da usina autônoma (MWe)	10,4	10,4	10,4	17,5	17,5
Demanda de energia da biorefinaria safra (MWe)	10,4	10,4	10,4	27,9	35,6
Capacidade de produção de energia da biorefinaria (MWe)	30	30	30	60	60
Energia gerada na biorefinaria safra (MWe)	27	27	27	55	53

Fonte: Elaborado pelo autor

No dimensionamento da casa de força da biorefinara, é preciso avaliar também a condição de operação na entressafra uma vez que os equipamentos podem operar muito fora das suas condições de projeto. Para as caldeiras foi verificado junto ao fabricante que a condição de operação mínima não deve ser inferior a 50% da condição de projeto do equipamento. Abaixo de 70% da capacidade de projeto, as caldeiras já têm dificuldade de manter as condições de

pressão e temperatura do vapor. Para operação das caldeiras com cargas muito baixas, necessita de um projeto especial com maior superfície de superaquecimento ou recirculação dos gases, levando a uma elevação no valor do investimento e aumento nos prazos de entrega.

Na Tabela 29, está resumida a analise das condições de operação na entressafra.

Tabela 29: Condição de operação da casa de força da biorefinaria na entressafra.

Caso	**1**	**2**
Demanda de vapor de processo na entressafra para biorefinaria[1] / ($t.h^{-1}$)	129	129
Vapor adicional para atender a exportação de energia / ($t.h^{-1}$)	0	104
Geração total de vapor / ($t.h^{-1}$)	129	233
Capacidade de cada caldeira / ($t.h^{-1}$)	170	170
Número de caldeiras operando	1	2
Percentual da capacidade de projeto da caldeira / (%)	76	69
Demanda de energia da biorefinaria entressafra (MWe)	25,4	25,4
Energia gerada na biorefinaria (MWe)	25,4	42,5
Número de turbogeradores operando	1	2
Percentual da capacidade de projeto dos turbogeradores / (%)	85	71

Fonte: Elaborado pelo autor

Notas: 1- No Caso 1, casa de força opera apenas atendendo às demandas de vapor e energia elétrica da biorefinaria.

2- No Caso 2, a casa de força opera para manter o mesmo excedente de exportação de energia na safra;

Além da capacidade das caldeiras e turbogeradores, é importante definir as condições de temperatura e pressão do vapor gerado nas caldeiras.

Seabra (2008) estudou diferentes configurações da casa de força para uma usina de 2.000.000 t.cana por safra produzindo etanol, açúcar e energia elétrica. Em seu estudo, considerou diferentes níveis de pressão e temperatura nas caldeiras, diferentes consumos de vapor de processo, operação com bagaço somente na safra ou bagaço mais palha, operando também na entressafra. A Tabela 30 contempla os resultados do trabalho de SEABRA (2008).

Tabela 30 - Impacto das condições de projeto e operação da casa de força no custo da energia elétrica gerada

Cenário	6,5-CP	9,0-CP	6,5-CEST	9,0-CEST	6,5-CEST- AT	9,0-CEST-AT
Pressão/(M.Pa)	6,5	9,0	6,5	9,0	6,5	9,0
Temperatura (^{o}C)	480	520	480	520	480	520
Acionamento	turbina	turbina	eletrificado	Eletrificado	Eletrificado	eletrificado
Cogeração	extração	extração	extração e condensação	extração e condensação	extração e condensação	extração e condensação
Consumo de vapor / (kg.tcana^{-1})	490	490	345	345	345	345
Combustível	bagaço	bagaço	bagaço	Bagaço	Bagaço+palha	Bagaço+palha
Geração	safra	safra	safra	Safra	safra+entressafra	Safra+entressafra
Custo da energia elétrica excedente / (R$/MWh)	120	120	130	130	97	100

Fonte: Seabra, 2008**.**

Analisando as informações da Tabela 30 é possível verificar que, nas condições do estudo, à pressão de 6,5 M.Pa e temperatura de 480^{o}C possui resultado econômico similar à pressão de 9,0M.Pa e 520^{o}C. Atualmente já existem caldeiras no Brasil com pressão de 10 M.Pa e 540^{o}C. Na unidade da Cosan, em Jataí, foram instaladas duas caldeiras de 225t/h nestas condições[28]. Para a biorefinaria proposta foi limitado a temperatura em 520^{o}C que é o valor limite para utilização dos materiais T22 e P22 fabricados no Brasil (CGEE, 2009). Para a pressão de trabalho foi escolhida a pressão de 6,7 M.Pa. Embora esta condição não tenha sido contemplada no estudo de SEABRA (2008), a decisão por esta condição tomou como base o estudo realizado pela Procknor Engenharia comparando a temperatura de 480^{0}C com a de 520^{0}C para uma caldeira de 67bar. O resultado do estudo indicou que, a um preço de energia elétrica de R$125/MWh, a elevação de temperatura se pagaria em cinco safras[29].

Outra informação importante que pode ser obtida da Tabela 30 é que a estocagem de combustível, com conseqüente aumento do fator de utilização da casa de força, pode propiciar ganhos expressivos de competitividade com relação ao preço de venda de energia elétrica. Além disso, essa estratégia operacional viabiliza a instalação de unidades que demandam o uso de vapor o ano todo.

Para aplicação dessa estratégia, entretanto, alguns aspectos devem ser considerados. O primeiro deles é que o trabalho focou no custo de geração de energia e não no preço de venda. De fato, os atuais leilões de energia não diferenciam o momento em que a usina entrega a energia. Neste caso, o preço da

[28] Jornal da Cana Junho de 2010
[29] Procknor, C.. Soluções de Fábrica. Revista STAB MAIO/JUNHO. 2006

energia é o mesmo e, se a usina entregar parte da energia na entressafra, terá o benefício de maior aproveitamento do investimento. Isto pode sofrer alterações no futuro e a energia entregue no período seco (safra) pode ser mais valorizada.

Outro ponto que carece de informações é o custo de estocagem e manuseio desta enorme quantidade de biomassa. Não foram encontradas informações técnicas abundantes e, tão pouco, dados estatísticos sobre o problema de bagaçose. Essa doença é descrita como uma pneumonia de hipersensibilidade causada pela inflamação dos brônquios e alvéolos ocasionada por uma ação de endotoxinas. Essas endotoxinas se proliferam no interior da pilha de bagaço que possui temperatura e umidade adequada para elas.[30] A bagaçose pode ocasionar restrições à estratégia de estocar bagaço para operação da casa de força na entressafra.

Das opções, atualmente estudadas de armazenamento de bagaço e palhiço, a estocagem a céu aberto é aquela que tem o menor investimento, conforme indicado na Tabela 31.

Tabela 31 - Custo de investimento para estocagem de palhiço

Alternativa de Armazenagem	Recolhimento Granel	Recolhimento Enfardado
Céu aberto / (R$)	668.000	440.000
Lona Inflável / (R$)	7.818.000	7.590.000
Silo Bolsa / (R$)	2.170.00	2.428.000

Fonte: CGEE,2009

4.5.7 Premissas Comerciais

Conforme será visto no modelo de estrutura societária, foi considerado que a esmagadora e a planta de biodiesel seriam de terceiros, basicamente recebendo vapor e energia elétrica do complexo. Desta forma, não foi realizado estudo de viabilidade econômica para a esmagadora de soja e para a planta de biodiesel.

Dos produtos com base no açúcar o Brasil possui saldo comercial favorável em todos eles. Conforme já foi comentado no Capítulo 2, a lisina, o ácido cítrico e o ácido lácteo são blocos de construção para uma série de produtos.

[30] Revista Proteção. Março de 2003. Disponível em <http://www.asgav.com.br/sipargs/leituras/Pulmoes_em_alerta.PDF>. Acesso em 23 de setembro de 2010.

A lisina e o ácido cítrico, assim como as leveduras, também podem ser utilizados no setor de alimentos. Desta forma, a esmagadora poderá formular rações com farelo de soja, eventualmente milho plantado na safrinha da soja, lisina, melaço e futuramente bagaço hidrolisado.

Na fase de identificação de oportunidade, os estudos ainda são bastante simplificados e, por isso, foi adotada como premissa a exportação dos produtos. Visando a obter uma estimativa de receita atualizada do complexo foram verificados os volumes e valores exportados de cada produto nos três últimos anos, conforme indicado na Tabela 32.

Tabela 32 - Volumes de exportação e valores não deflacionados de janeiro a setembro dos anos de 2007, 2008 e 2009.

Produtos	Lisina	Ácido Cítrico	Levedura	Açúcar	Etanol	Ácido Lácteo
Exportação 2008[1] / (kt ou km3)	80	22	38	9.157	3.749	17
Exportação 2009[1] / (kt ou km3)	63	21	30	12.597	2.652	7
Exportação 2010[1] / (kt ou km3)	58	25	36	14.524	1.326	12
Preço 2008[2] / (US$/t ou US$/m3)	1,61	1,07	1,04	0,26	0,47	1,27
Preço 2009[2] / (US$/t ou US$/m3)	1,19	1,54	1,04	0,31	0,39	1,37
Preço 2010[2] / (US$/t ou US$/m3)	1,77	1,57	1,21	0,43	0,53	1,41
Aumento da quantidade exportada / (%)	-28	17	-6	59	-65	-30
Aumento do preço no período / (%)	10	47	16	65	13	11

Notas:

1- Considerado o período de janeiro a setembro para poder comparar com a exportação de 2010. A unidade para etanol é $k.m^3$ e para os demais produtos é k.t

2- Preço FOB calculado pela razão do valor exportado pela quantidade. Para etanol em US$/$m^3$ e para os demais produtos em US$/t.

Fonte: elaborado pelo autor

Os preços, assim como as exportações, podem sofrer uma influência muito grande do câmbio e de outros fatores. De qualquer forma, se pode observar que, enquanto os preços da lisina e etanol alternam ao longo dos anos, existe uma tendência no aumento dos preços e das exportações de ácido cítrico e açúcar. O preço do ácido lácteo também vem apresentando ganhos incrementais consistentemente. Analisando com um pouco mais de detalhes as informações a

respeito do ácido lático, o que se verifica é uma redução das exportações e aumento das importações, levando a uma situação de quase equilíbrio no saldo comercial.

Tabela 33 - balança comercial do ácido lático nos últimos cinco anos.

Ano	Exportações / (US$)	Importações/ (US$)	Saldo / (US$)
2006	12.258.056	2.363.898	9.894.158
2007	33.298.690	3.677.135	17.969.166
2008	27.773.311	5.525.379	22.247.932
2009	14.348.358	9.957.105	4.391.253
2010[1]	16.240.534	12.605.120	3.635.414

1 - No ano de 2010 o período considerado foi de janeiro a setembro.
Fonte: Sistema AliceWeb. Dados de janeiro a setembro de 2010. Disponível em <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>. Acesso em 15 de outubro de 2010.

Uma vez que o PHB ainda não é um produto comercial, foram buscadas na literatura as estimativas dos custos de produção para um futuro estudo de mercado com um preço de venda que cubra os custos e remunere o investimento. Para a análise econômica do complexo, foi considerada a hipótese simplificadora que a planta de PHB será de terceiros, de forma que biorefinaria venda açúcar, vapor e energia elétrica para o fabricante de PHB. Na Tabela 34, temos as estimativas de custo de produção de PHB.

Tabela 34 - Estimativas de custo de produção do PHB.

	Preço / (US$/t)
Bertrands (1992 *apud* Rossel et al., 2006)	5,85
Lee´s (1998 *apud* Rossel et al., 2006)	2,65
Rossel et al. (2006)[1]	2,25 – 2,75
Rossel et al. (2006)[2]	2,50 – 3,00

1- Planta integrada em uma usina.
2- Planta isolada.

Segundo Rossel *et al*. (2006), o açúcar é o principal fator de custo do polímero. Embora o açúcar represente cerca de 29% do custo de produção do polímero fica evidente que, em produtos com elevado cunho tecnológico, o peso da matéria-prima é menor que nos insumos básicos. No processo de produção de açúcar, a cana representa cerca de 60% dos custos (MARQUES, 2009).

Para o preço de venda de energia elétrica foi considerado um valor ligeiramente abaixo do obtido nas últimas cinco observações registradas.

Tabela 35: Preço de venda de energia eletrica

Observação	Fonte	Preço médio (R$/MWh)
1	Agente de mercado	150,00
2	Agente de mercado	136,00
3	Agente de mercado	145,00
4	7 Leilão de Energia Nova	145,00
5	1 Leilão de Reserva	155,66
6	Leilão de Fontes Alternativas	134,23
Média	-	144,32
Valor considerado	-	120,00

Fonte: Marques (2009), CCGE (2008a, 2008b *apud* ZILO, 2009)

Como hipótese simplificadora, foi adotada um valor de R$120/MWh para energia elétrica exportada e vendida para esmagadora.

O preço de venda do vapor foi adotado como sendo de R$ 7/t calculado como o custo marginal de geração de vapor com palha-de-cana.

Quando os preços dos produtos variam consideravelmente, a utilização dos preços atuais como critério de projeção de preços pode levar a alguns erros que podem causar grande impacto no valor econômico do projeto. O preço do etanol, por exemplo, variou de 600 a 1800R$/m3 nos últimos oito anos. Ainda assim, os preços de exportações praticados no ano de 2010 foram adotados como hipótese simplificadora no estudo de identificação de oportunidade.

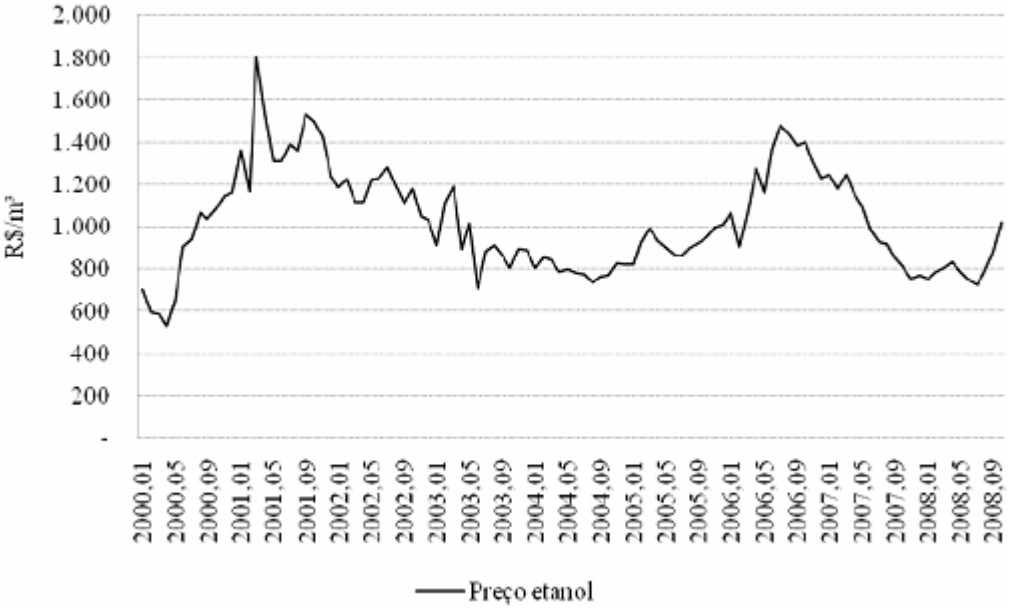

Figura 21 - Histórico de preços do etanol exportado – valores reais deflacionados pelo IPA reponderado – base: outubro de 2008 (Zilo 2009).

4.5.8 Estimativa Preliminar de Custos e Cronograma de Implantação

O cronograma físico de implantação do complexo (Tabela 36) foi estabelecido com base na curva de evolução do canavial e nos prazos de entrega dos equipamentos principais. O caminho critico na montagem de uma usina é o prazo de entrega das caldeiras, com cerca de 18 meses, seguido das turbinas com cerca de 12 meses[31]. Com base nos prazos de entrega e nas curvas de desembolso típicas de cada equipamento, foi estabelecido um cronograma financeiro durante a instalação da unidade.

Tabela 36 - Cronograma físico e financeiro da planta de referência e da biorefinaria.

Ano	0	1	2	3	4	5	6
Moagem de cana[1] (M.t)			0,72	1,4	2,0	2,5	3,0
Cana para etanol[1] (M.t)			0,72	1,4	1,8	1,8	1,8
Cana para levedura[1] (M.t)					0,2	0,2	0,2
Cana para Ácido Cítrico[1] (M.t)						0,47	0,47
Cana para Lisina[1] (M.t)							0,24
Cana para PHB[1] (M.t)							0,21
Cana para Açúcar[1] (M.t)						0,03	0,08
Investimento Usina Autônoma[2] (MMR$)	72	159	58	50	66	24	
Investimento Biorefinaria[2] (MMR$)	72	159	58	50	143	137	51

Fonte: Elaborado pelo autor

Notas: 1- O símbolo M representa 10^6.

2-Especificamente para valores financeiros foi utilizado MM para representar 10^6 por ser mais usual.

Os custos da planta de referência foram os indicados por Marques (2009). A estes custos foram adicionado as estimativas de valores das unidades anexas com base no estudo de Seabra (2008). A Tabela 37 apresenta os custos de produção adotados para a Biorefinaria.

[31] Consulta aos fabricantes de equipamentos

Tabela 37 – Estimativa de custos da biorefinaria

Ano	0 e 1	2	3	4	5	6
Compra de cana / (MMR$)[1]	-	33	63	89	113	135
Recolhimento de palha / (MMR$)	-	1	2	3	3	4
Capital de Giro / (MMR$)	-	6	0	3	1	2
Insumos Produção Etanol e Açúcar / (MMR$)	-	1	2	3	4	5
Insumos Biorefinaria / (MMR$)	-	1	2	38	52	79
Mão de Obra da Biorefinaria / (MMR$)	-	2	5	6	7	8
Mão de Obra Produção de Etanol e Açúcar / (MMR$)	-	2	5	5	5	5
Manutenção da Biorefinaria / (MMR$)	-	3	7	10	15	19
Manutenção Produção de Etanol e Açúcar / (MMR$)	-	3	7	9	12	14
Despesas Gerais e Administrativas / (MMR$)[2]	-	2	4	6	8	9

1 - Não foi considerada a redução do custo de plantio em função da rotação com soja. Para valores financeiros foi adotada a simbologia MM para representar 10^6.
2 - Considerado que as despesas gerais e administrativas da planta de referência são iguais às da biorefinaria.

Como a localização não foi definida, não foi considerado o frete entre o local de fabricação dos produtos até o Porto.

4.5.9 Modelo Societário

A definição do modelo societário depende de alguns fatores como o interesse estratégico dos investidores, capacitação das empresas para atuar nos diversos segmentos de negócio, além da facilidade de acesso à tecnologia, questões tributárias, entre outras. Para montar uma usina de açúcar e etanol, o investidor consegue acessar a tecnologia no mercado através de contratos com empresas de engenharia e fabricantes de equipamentos. O mesmo raciocínio é válido para o complexo soja, incluindo a planta de biodiesel. Contudo, os negócios são distintos. Normalmente, os profissionais que trabalham em uma usina não têm o conhecimento sobre o desenvolvimento de uma lavoura de soja, compra de soja, venda de farelo e comercialização de biodiesel, entre outras atividades. À medida que a complexidade dos processos aumenta, muitas vezes os detentores de tecnologia utilizam o *know how* como poder de negociação para obter participação na sociedade. Contudo foge ao escopo deste trabalho a discussão de qual seria a estrutura societária mais adequada para o complexo proposto.

Para fins de modelo econômico foram estimados os custos e a receita da produção de etanol, açúcar, lisina, ácido cítrico e levedura. Para o complexo soja e para a planta de PHB foi considerada apenas a venda de vapor e energia elétrica e açúcar da biorefinaria para estas unidades.

4.5.10 Viabilidade Econômica

O estudo de viabilidade econômica na fase de identificação de oportunidade tem um nível de simplificação compatível com a maturidade do projeto. Para uma análise econômica preliminar, sem as informações do projeto conceitual, podemos lançar mão de índices técnicos disponíveis na literatura trabalhos de outros autores, informações de consultores entre outros.

Na media em que o projeto avança, a precisão do investimento aumenta e com isto as incertezas em relação ao desempenho econômico diminuem. Os dados utilizadas no estudo de viabilidade econômica foram obtidos, principalmente, dos trabalhos de Marques (2009), Silva (2007), Seabra (2008), Zilo (2009) e Rossel *et al*. (2006).

Visando a avaliar o impacto da entrada das unidades auxiliares, foi realizada uma análise comparativa entre a instalação de uma usina autônoma e a biorefinaria proposta.

Para análise de investimentos, foi considerado o método do fluxo de caixa descontado, calculando-se o valor presente líquido do projeto para um período de 25 anos. Ao término do período foi considerado um valor residual de 20% do valor investido (ZILO, 2009).

A Tabela 38 indica a carga tributária considerada no estudo de viabilidade. O Imposto de renda Pessoa Jurídica (IRPJ) e a Contribuição Social sobre o Lucro Liquido – CSLL foram consideradas para todos os produtos comercializados. Já a incidência de PIS e COFINS foi considerada apenas sobre a venda de energia elétrica uma vez que a premissa foi de exportação dos demais produtos. O preço de energia elétrica de 140R$/MWh foi considerado como o valor, já descontados todas as tarifas, taxas de fiscalização, PIS e COFINS. Os tributos foram considerados pelo

critério do Lucro Real uma vez que as receitas brutas superam o valor máximo estipulado para o uso de lucro presumido (ZILO, 2009).

Tabela 38 - Carga Tributária considerada no Projeto.

Tributo	Alíquota	Incidência
Imposto de Renda Pessoa Jurídica	25%	Lucro Líquido
Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido – CSLL	9,00%	Lucro Líquido
Programa de Integração Social/Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – PIS/COFINS	9,25%	Lucro Líquido

As premissas comerciais têm um enorme impacto no resultado econômico do complexo. Um estudo consistente de mercado é fundamental para balizar as expectativas de preços e volumes dos produtos. Embora, nesta fase, as premissas comerciais sejam ainda bastante simplificadas, na etapa de projeto conceitual sugere-se que seja buscada uma correlação entres os preços dos produtos e insumos, e os preços do petróleo e derivados. Desta forma, seria factível uma análise de sensibilidade de cenários para verificar o impacto na usina autônoma e na biorefinaria de oscilações no preço do petróleo. Além dos preços do petróleo, caso a biorefinaria seja mais voltada para exportação de produtos, uma sensibilidades em relação ao câmbio também é importante uma vez que a maioria dos custos do complexo são em reais.

Tabela 39: Premissas comerciais consideradas na analise econômica do projeto.

Valor de venda de etanol hidratado / (R$/m3)	890
Preço da Energia descontado os impostos e tarifas / (R$/MWh)	120
Valor da venda da levedura seca / (R$/t)	2060
Valor de vendo do Açúcar Cristal / (R$/t)	736
Valor de venda do Ácido Cítrico / (R$/t)[1]	2665
Valor de venda da lisina / (R$/t)	3007
Valor de venda do PHB / (R$/t)	-

1 –Considerado que 1US$ = 1,7 R$ para todos os produtos.

Para análise financeira foi considerado um valor de 8,02% para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Este valor foi sugerido por Zilo (2009) que calculou a TMA com base no rendimento de títulos de longo prazo no Brasil.

Como hipótese simplificadora, foi considerada a realização dos investimentos com capital próprio.

Com base nas premissas acima, foram utilizados três indicadores de viabilidade econômica cujos resultados estão expressos na Tabela 40.

Tabela 40: Resultados da análise de viabilidade da biorefinaria

Indicador	Referência	Biorefinaria
VPL[1] / (MMR$)	233	472
TIR[2] / (%)	15	17
Payback / (anos)	9	9

1- Valor Presente Líquido
2- Taxa Interna de Retorno

Com base nos indicadores econômicos da Tabela 40, é possível verificar que a adição das unidades de biorefino gerou valor para os acionistas.

4.5.11 Estratégia de Saída

Considerando que a biorefinaria leva cerca de seis anos para atingir carga plena, diversas premissas previstas, originalmente, no estudo de viabilidade podem sofrer modificações expressivas. Foge ao escopo deste trabalho um estudo mais aprofundado dos critérios de saída, até porque estes estão fortemente relacionados com os acordos societários previstos.

De forma simplificada, foi considerado como critério de saída que o projeto seria concluído como uma destilaria autônoma.

4.5.12 Integração com Tecnologias Avançadas e Produção de Proteína Animal

Foi analisada, de forma prospectiva, a expansão da biorefinaria proposta considerando a introdução de tecnologias avançadas. Os objetivos de realizar este estudo foram:

- Instalar um segundo módulo de 15.000TCD e integrar a biorefinaria com a cultura do sorgo para produzir etanol suficiente para viabilizar a instalação de uma planta de produção de eteno;
- Verificar a necessidade de bagaço necessária para viabilizar a produção de etanol 330 dias por ano, aumentando o fator de utilização das dornas e equipamento de destilação;
- Produção de biocombustível de resíduos animais e aproveitamento do biogás, que são as alternativas atualmente comerciais que apresentam a maior economia de carbono em relação ao fóssil substituto, conforme indicado na Tabela 2;
- Produção de acido lático que também foi considerado um dos blocos de construção promissor;
- Aproveitamento de todo o CO_2 disponível na fermentação para produção de microalgas;

O sorgo sacarino tem sido estudado como fonte complementar de matéria-prima para a produção de etanol na entressafra da cana. Os seus colmos podem ser processados na mesma instalação destinada à produção de etanol de cana-de-açúcar, oferecendo também uma quantidade de fibra necessária para o ajuste do balanço termoelétrico da unidade. Os resultados preliminares indicam que o sorgo pode ser processado na entressafra da cana com teores de açúcar no colmo similares aos obtidos na cana-de-açúcar.

Visando a ofertar etanol em quantidade suficiente para processos alcoolquímicos, foi considerada a instalação de um segundo módulo de 15.000 TCD e a elevação dos dias de safra com o processamento de sorgo sacarino. Como hipótese simplificadora, foi considerada a produção de 60l de etanol por tonelada de sorgo. Com base nessas premissas, a biorefinaria necessitou de cerca de 947.100t.sorgo e aumentou em 39dias a safra original, conforme indicado na Tabela 41.

Tabela 41: Necessidade de sorgo para viabilizar a produção de eteno.

Informação	Valor	Unidade
Necessidade de etanol para produção de eteno	450.000	m^3/ano
Produção de etanol na FASE 1 da biorefinaria	138.174	m^3/ano
Necessidade de aumento de oferta de etanol	311.826	m^3/ano
Oferta de etanol com a entrada do segundo módulo de 15.000TCD	255.000	m^3/ano
Necessidade de produção de etanol de sorgo	56.826	m^3/safra
Quantidade de sorgo processada	947.100	t/safra
Capacidade de moagem para etanol primeira fase	9.000	$t.cana.d^{-1}$
Capacidade de moagem para etanol da segunda fase	15.000	$t.cana.d^{-1}$
Dias efetivos de operação com sorgo	39	d

Fonte: elaborado pelo autor

O aumento de 39 dias efetivos de processamento, resultando em 239 dias efetivos no ano, possibilitou a obtenção de um volume de etanol adequado para produção de eteno. Nesta condição, o fator de utilização dos principais equipamentos da usina ficou em 66% ainda bastante abaixo dos valores praticados nas usinas de milho.

Visando a elevar ainda mais o fator de utilização da destilaria para os padrões similares ao obtido na produção de etanol de milho, foi estudada a produção de etanol de segunda geração via hidrólise enzimática.

Conforme indicado na Tabela 42, para obtenção de 90% de utilização dos equipamentos da indústria, além do processamento do sorgo, cerca de 60% do combustível gerado, incluindo o bagaço de cana e sorgo acrescido do palhiço, teria que ser destinado para produção de etanol de segunda geração.

Tabela 42: Necessidade de bagaço para produção de etanol de segunda geração

	Valor	Unidade
Dias de operação desejados da destilaria para 90% de utilização dos equipamentos	330	d/safra
Dias utilizados[1]	239	d/safra
Produção de etanol com 90% de utilização dos equipamentos	620.139	m^3/ano
Produção de etanol de segunda geração	170.139	m^3/ano
Rendimento de etanol de bagaço[2]	100	l/tbagaço
Necessidade de bagaço para produção de etanol de lignocelulose	1.701.389	t/ano
Geração anual de bagaço	1.875.717	t/ano
Geração anual de bagaço equivalente c/ 50% recuperação de palha	972.000	t/ano
Percentual do combustível usado para segunda geração	60	%

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: 1- Considerados 200 dias efetivos de processamento de cana e 39 de processamento de sorgo

2 - Considerado somente o aproveitamento da celulose com o atual nível tecnológico (RABELO *et al*., 2010).

Visando a ofertar uma maior quantidade de bagaço para produção de etanol de segunda geração, foi avaliado o potencial de substituição do mesmo por biogás nas caldeiras da biorefinaria.

De forma prospectiva, foi considerado o aproveitamento energético do metano obtido via biodigestão anaeróbica da vinhaça. Conforme indicado na Tabela 43, cerca de 8% da demanda de biomassa de lignocelulose para planta de segunda geração poderia ser atendida com a substituição do bagaço por metano, oriundo da biodigestão da vinhaça, nas caldeiras.

Tabela 43: Produção de metano via biodigestão da vinhaça[1]

Produção típica de vinhaça	10	l/letanol
Produção anual de vinhaça	6.201.389	m^3/ano
DQO vinhaça	20	kg/m^3
Taxa de remoção de DQO no biodigestor	85	%
Produção de biogás	0,37	Nm^3/kg de DQO removido
Concentração media de metano no gás	70	%
Produção típica de metano	0,26	Nm^3/kg de DQO removido
Poder calorífico do metano	34.450	kJ/Nm^3
Poder calorífico do bagaço	7.325	kJ/kg
Equivalência em bagaço	4,7	kgbagaço/Nm^3 de metano
Produção de metano	27.304.714	Nm^3 metano/ano
Produção de bagaço equivalente	138.517	t/ano
Percentual do bagaço necessário para produção de etanol de lignocelulose	8	%

1 – Cálculos efetuados com base em Procknor (2008).

Considerando a integração com a produção de proteína animal, foi avaliada a produção de metano em um confinamento de 10.000 cabeças por 100 dias e um frigorífico com capacidade de abate de 100.000 cabeças por ano.

Tabela 44: Produção de metano na produção de proteína animal.

Informação	**Valor**	**Unidade**
Confinamento	10.000	Cabeças
Produção de biogás	0,37	Nm^3.d.cabeça^{-1}
Dias de confinamento	100	Dias
Produção de biogás	370.000	Nm^3/ano
Produção de metano	259.000	Nm^3/ano
Produção de bagaço equivalente	1.218	t/ano
Capacidade do frigorífico	100.000	cabeças/ano
Produção de metano	2	Nm^3/cabeça
Produção anual de metano	200.000	Nm^3.metano/ano
Produção de bagaço equivalente	941	t/ano
Percentual do bagaço necessário para produção de etanol de lignocelulose	0,13	%

Fonte: CARIOCA & ARORA, 1984

De acordo com os valores verificados na Tabela 44, o biogás produzido na integração com a pecuária, se for utilizado como combustivel, contribui com a oferta de 0,11% do total de bagaço necessário para produção de etanol por hidrólise enzimática.

Conforme pode ser observado, à produção de metano da vinhaça e da produção de proteína animal não é suficiente para permitir a oferta de todo o bagaço necessário à operação da biorefinaria o ano inteiro. Para isso, a biorefinaria precisa investir em duas linhas que não são excludentes. A primeira delas voltada para eficiência energética, instalando o segundo módulo com as melhores tecnologias disponíveis no mercado. Na segunda abordagem, o complexo deverá buscar outras fontes de energia para complementar o balanço termoelétrico no caso de aproveitamento de bagaço como matéria-prima.

A primeira fonte energética complementar é a própria lignina por considerar-se que a lignina existente no bagaço pode ser separada e utilizada como combustível nas caldeiras em complemento ao metano, oriundo da biodigestão da vinhaça e da produção de proteína animal. Conforme indicado na Tabela 5 cerca de 39% da energia total necessária para ofertar o bagaço, como matéria-prima para segunda geração, poderia ser obtida da queima do metano e da lignina.

Tabela 45: Estimativa da necessidade de complemento de biomassa para viabilizar a geração de etanol o ano inteiro.

Informação	Valor	Unidade
Quantidade de bagaço ofertado com a queima da lignina	514.467	t.ano
Quantidade de bagaço ofertado com a queima de metano	140.676	t.ano
Produção de bagaço equivalente	655.143	t ano
Demanda de bagaço para produção de etanol de celulose	1.701.389	t.ano
Necessidade de oferta de bagaço via complemento com outra biomassa na caldeira	1.046.245	t.ano
Percentual da energia necessária para ofertar o bagaço como matéria-prima atendido pela queima de lignina e metano.	39	%

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que cerca de 26% do bagaço é composto por xilanas (SEABRA, 2008), e que somente as hexoses foram aproveitadas para produção de etanol, o complexo oferta uma grande quantidade de açúcares. Essa quantidade de açúcares poderia viabilizar a produção de metano para aumentar a oferta de bagaço para a produção de etanol de segunda geração, ácido lático e outros blocos de construção com cinco átomos de carbono como o ácido itacônico e o xylitol.

Uma biomassa de alta eficiência fotossintética, que poderia complementar o balanço termoelétrico da biorefinaria é o eucalipto. Os resíduos da cultura ou até mesmo a madeira poderiam ser aproveitados como combustível para aumentar a oferta de bagaço ou até mesmo como matéria-prima para planta de segunda geração. A floresta energética pode ser plantada em áreas cuja declividade não é apropriada para a cultura da cana, as distâncias transportadas podem ser maiores e, eventualmente, pode haver economia de escopo no uso do maquinário agrícola e caminhões.

Na linha de analisar de forma prospectiva a utilização de tecnologias avançadas no esquema de biorefino, chama atenção o enorme potencial de aproveitamento do CO_2 gerado no processo de fermentação. Este CO_2 poderia ser transformado em carboidratos, utilizando algas como plataforma de conversão.

De acordo com o trabalho de Borges (2010), a produção anual de 100.000 t/ano de microalgas consome 188.356 kg/CO_2. Considerando a hipótese de direcionar todo o CO_2 da fermentação para o cultivo de algas, poderíamos produzir cerca de 260.000 t/ano de microalgas com teor de óleo variando de 30% a 70%. Como hipótese simplificadora, apenas para ter uma sensibilidade do potencial de produção de biocombustíveis de terceira geração, foi adotado um teor de óleo de 50% na composição das microalgas. Neste caso, o complexo poderia ofertar mais cerca de 130.000 t/ano de biodiesel. A fração que não contem lipídios poderia ser convertida em biogás para aumentar a oferta de bagaço como matéria-prima.

Neste Capítulo, foi exercitado um caminho de crescimento da biorefinara convencional em um complexo aproveitamento integral da biomassa de uma região e com a utilização de tecnologias avançadas. O complexo sugerido é suprido com matérias-primas energéticas com alta conversão fotossintética (cana, sorgo, eucalipto e microalgas). Há disponibilidade de metano que poderia ser utilizado em fornos ou para produção de hidrogênio. Possui escala adequada para a produção dos principais blocos de construção, incluindo o eteno, para fabricação de produtos de alto valor agregado. Apresenta um elevado fator de utilização dos equipamentos, viabilizando a utilização de tecnologias com maior eficiência energética. Integrado com a cadeia da soja, oferta proteína vegetal e animal contribuindo para aumento da sustentabilidade da sua produção.

5 CONCLUSÕES

A transformação de uma economia baseada em unidade exportadora de *commodites*, em uma economia baseada em arranjos produtivos dedicados à fabricação de produtos de alto valor agregado requer elevado esforço de coordenação entre diversas atividades. Este trabalho buscou contribuir com essa transformação, estudando a utilização de uma usina de cana-de-açúcar, como plataforma para uma biorefinaria.

Considerando os objetivos propostos, no trabalho, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Devido ao baixo custo do açúcar da cana e a disponibilidade de fibra para geração de vapor e energia elétrica, uma usina produtora de açúcar e etanol e energia é uma plataforma adequada para a introdução de novos processos de conversão da biomassa. A operação de forma sazonal, devido ao período de safra da cana, é um importante obstáculo que precisa ser equacionado para implantação desses processos;
- Foram identificados os candidatos mais promissores para serem utilizados como blocos de construção para fabricação de produtos de alto valor agregado. Alguns deles como o próprio etanol, o ácido cítrico, a lisina e o sorbitol já são fabricados no Brasil pelas usinas. Além dos produtos já citados, com base no grau de maturidade das tecnologias e na análise de artigos e patentes sobre aplicações dos produtos, o ácido lático, o ácido itacônico e o PHB foram destacados como produtos promissores;
- Considerando o etanol como bloco de construção, o déficit de monoetilenoglicol e butadieno, no Brasil, pode ser uma oportunidade de fortalecimento da alcoolquímica no país;
- A partir da análise dos fatores de competitividade das empresas, foram identificados alguns requisitos importantes para o desenvolvimento de uma biorefinaria com base na cana-de-açúcar. A escala de produção de 15.000 TCD se mostrou apropriada para fornecimento de açúcares para as atuais tecnologias de aproveitamento de sacarose utilizadas no país. Para o desenvolvimento da cadeia alcoolquímica com base em eteno, entretanto, escalas iguais ou superiores a 30.000TCD são mais adequadas. O

aproveitamento do palhiço é fundamental para oferta de combustível para geração de vapor e energia o ano inteiro. Para isso, as usinas que colhem a cana mecanicamente e estão equipadas com sistemas de limpeza a seco, preparo e trituração de palhiço terão mais facilidades para receberem unidades de biorefino. No contexto de uma biorefinaria, a busca por redução de estoques e aumento no fator de utilização dos equipamentos tem grande relevância. No curto prazo, a integração da cana com sorgo sacarino e a cultura do eucalipto, foram consideradas tecnologias promissoras.

- O uso de sistema de água gelada para controle de temperatura da fermentação, foi considerado um requisito técnico importante à manutenção dos processos fermentativos para produção de etanol na entressafra;
- Com base no estudo de caso, foi sugerida uma estratégia de modulação das unidades, iniciando com o sistema de recepção, preparo e extração, tratamento de caldo e destilaria de uma usina autônoma. Na medida em que o processamento de cana se aproxima da capacidade de projeto dos equipamentos de fermentação e destilação, novas unidades vão sendo adicionadas de forma a compatibilizar o consumo de açúcares na biorefinaria com o aumento de oferta dos mesmos. Essa forma de implantação do complexo, além de proporcionar uma curva de investimentos mais suave, também permite concluir o projeto com produtos convencionais (etanol e açúcar) em caso de alterações significativas nas premissas que nortearam a decisão de implantação da biorefinaria;
- Como forma de sistematizar o fluxo de informações para identificação da oportunidade de implantação da biorefinaria, foi sugerida a adoção de padrões internacionais de condução de projetos;
- A produção de soja, na reforma de cana, é uma prática com potencial de considerável redução nos custos de plantio da cana. O volume produzido, entretanto, é insuficiente para justificar a implantação de uma unidade de extração. Caso exista disponibilidade de soja na região de implantação da biorefinaria, uma unidade de extração de óleo de soja com capacidade de esmagamento de 500.000t/ano e uma de produção de biodiesel de 100.000t/ano podem ter as demandas energéticas atendidas pela queima de bagaço e palhiço.

Com base nos indicadores econômicos obtidos no estudo de caso, a biorefinaria com produção de etanol, açúcar, ácido cítrico e levedura adicionou valor para os acionistas quando comparada com uma usina autônoma de mesma capacidade de processamento de cana.

5.1 Restrições e Limitações

Algumas premissas adotadas podem alterar significativamente as conclusões do estudo de caso. A primeira delas é que não foi realizado um estudo consistente de mercado dos produtos desenvolvidos na biorefinaria. As premissas comerciais consideraram preços atuais orientados para exportação. Os custos de armazenamento, comercialização e, principalmente, logísticos também não foram incluídos na análise uma vez que a localização da unidade não foi definida. Também forma adotas hipóteses simplificadoras sobre os níveis de pressão e temperatura das utilidades demandadas em cada processo.

Com relação à prospecção de utilização de tecnologias avançadas é importante ressaltar que para introdução das mesmas existe um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento, levando grandes incertezas com relação à viabilidade econômica das alternativas citadas.

5.2 Sugestões para pesquisas posteriores

Neste trabalho, foram identificadas questões que merecem aprofundamento em trabalhos futuros para contribuir com o desenvolvimento das biorefinarias. Estes temas são apresentados a seguir:

- Realização de análise de competitividade dos produtos oriundos dos diversos blocos de produção levantados neste trabalho;
- Realização de estudos de integração vertical das diferentes cadeias de blocos de construção em uma usina;
- Identificação da escala econômica de produção dos químicos intermediários e dos produtos finais obtidos pelos blocos de construção identificados neste trabalho;

- Realização de análise econômica comparativa para determinar em que casos a produção de derivados de eteno verde, em uma usina, é mais competitiva que a produção de eteno verde nas petroquímicas;
- Realização de estudo de mercado para análise de viabilidade econômica da produção de PHB;
- Análise do impacto dos diferentes sistemas de extração na utilização do bagaço para produção de açúcares;
- Análise do impacto dos diferentes sistemas de extração no processamento do sorgo sacarino;
- Realização de estudos de extração de óleo de soja, utilizando etanol como solvente;
- Realização de estudo dos requisitos de uma caldeira para utilização de bagaço, palhiço de cana, bagaço e palhiço de sorgo, eucalipto e lignina;
- Realização de estudo da cadeia de produção de produtos aromáticos com base na lignina;
- Realização de estudo dos requisitos de flexibilidade de uma unidade de produção de etanol de segunda geração para processamento de bagaço e palha de cana, bagaço e palha de sorgo e eucalipto como matéria-prima;
- Realização de estudo sobre o uso de novos materiais para aumento das horas de operação do sistema de trituração de palhiço;
- Desenvolvimento de modelos com os custos e rendimentos para produção dos blocos de construção, químicos intermediários e finais, de forma a permitir o uso de programação linear para escolha de processos de biorefino;
- Realização de estudos sobre a produção de hidrogênio em pequena escala, via reforma a vapor de biogás, eletrólise ou biodigestão anaeróbica de resíduos para facilitar a introdução em usinas de processos que demandem hidrogênio;
- Análise de capacidade de oferta de proteína animal, utilizando rações compostas por farelo de soja, levedura, lisina, bagaço hidrolisado e melaço;
- Análise da flexibilidade dos processos de biorefino, utilizando opções reais;

– Análise comparativa das alternativas de produção de água gelada, usando chiller de absorção, compressores elétricos ou ejetores.

6 REFERÊNCIAS

ANGARITA, E.E.Y. *et al.* Produção de óleos vegetais e biodiesel : tecnologia e análise de ciclo de vida. In: Cortez, L.A.B. *et al*. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. Capítulo 16. p. 531-571

Amorim, Henrique. **Desafios na Produção de Etanol**, 2009. Trabalho apresentado na Disciplina de Tecnologia de Álcool Etílico no Mestrado Profissional em Agroenergia em 03/10/2009, São Paulo.

BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C. *et al*. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: Barros&Marques Editoração Eletrônica, 2006. v. 1.

BERNARDO NETO, O. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2a geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1a geração)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BORGES, F.C. **Proposta de modelo conceitual de biorrefinaria com estrutura descentralizada**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BROWN, R.C. Biorefineries Based on Thermochemical Processing. In: KAMM, B. *et al*. **Biorefineries - Industrial Processes and Products**: Status Quo and Future Directions. Weinheim: WILEY-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, v.1. 2006. Chap. 11. p. 227-252.

CAMARGO, Carlos Augusto (Coord.). **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Álcool**: manual de recomendações. São Paulo: IPT, 1990.

CARIOCA, J.O.B. & ARORA, H.L. **Biomassa**: Fundamentos e Aplicações Tecnológicas. Fortaleza: UFC, 1984.

CEBIM, Geraldo José. **Plantio mecânico de cana de açúcar (*Saccharum spp.*)**: desempenho operacional e econômico. Piracicaba, [s.n.], 2008.

CGEE. **Bioetanol combustível**: uma oportunidade para o Brasil. Brasília:Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.

CGEE. Sucroquímica. In: ____. **QUÍMICA verde no Brasil**: 2010 – 2030. Brasília, D.F: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Capítulo 5. p. 175-218.

COLIN, E.C. Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. **European Journal of Operational Research**. 2008. p. 232-235.

Editora Gazeta. Anuário Brasileiro da Soja. Safra 2008/2009 p 14.

ELY, R.N. **Avaliação Prospectiva das Rotas de Biorefinarias no Brasil, a partir do Bagaço de Cana-de-Açúcar como Matéria-Prima Básica**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE. 276pp. 2010. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2010.

FULMER, M.E. **Eletricity-Ethanol Co-Production from Sugar-cane: A technical e economical Assessment**. PU/CEES Report n. 258. Princeton: Princeton University, 1991.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Volume 1. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969.

IEL/SEBRAE. **O Novo Ciclo da Cana**: Estudo sobre a Competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana de Açúcar e Prospecção de Novos Empreendimentos. Instituto Euvaldo Lodi/ Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, Brasília, 2005.

KAMM, B. *et al*. **Biorefineries - Industrial Processes and Products**: Status Quo and Future Directions. Weinheim: WILEY-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, v.1. 2006.

KAMPEN, W. H.; MONGE, A.; ENGOLIO, J. Experience with a (Pilot) Rising Film Plate Evaporator and New Mist Eliminator in Louisiana. **International Sugar Journal**, [S.l.], v. 101, n. 1210, p. 523-526, 1999.

MARQUES, P. V. (Coord.) **Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2009. 194 p.

MEIRELLES J.A. **Expansão da Produção de Bioetanol e Melhoria Tecnológica da Destilação Atmosférica**. Workshop "Produção de Etanol" – EEL/USP – 10/11/2006. 2006.

MODESTO, M. *et al*. Ethanol Production from Sugar Cane: Assessing the Possibilities of Improving Energy Efficiency through Exergetic Cost Analysis. **Heat Transfer Engineering**, 30(4): 272–281, 2009.

OGDEN, J. M.; HOCHGREB, S.; HYLTON, M. Steam Economy and Cogeneration in Cane Sugar Factories. **International Sugar Journal**, [S.l.], v. 92, n. 1099, p. 131-142, 1990.

OGDEN, J.M. & FUELMER, M. Assessment of new Technologies for co-production of alcohol, sugar and electricity from sugar cane. PU/CEES Report n. 250. Princeton: Princeton University, 1990.

OLIVERIO *et. al*. Alcoholic Fermentation with temperature controlled by ecological absorption chiller – **EcoChill. Proc. Int.Soc. Sugar Cane Technol**., Vol.27, 2010.

PAES, L.A.D. & HASSUANI, S.J. Potencial trash of the sugar cane plantation, including trash recovery factors. In: Hassuani *et al*. **Biomass power generation**: sugarcane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. Capítulo11. p 70-73.

PARLAMENTO EUROPEU, CONSELHO. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009 , relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE (Texto relevante para efeitos do EEE). Disponível em <http://eur-

lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:01:PT:HTML>. Acesso em 02 de julho de 2010.

PENARIOL, A.L. & SEGATO, S.V. Importância da rotação de culturas na cana-de-açúcar. In: Segato , S.V. *et al* (org.). **Expansão e renovação do canavial**. Piracicaba: CP 2, 2007. Capítulo 1. p. 11-18.

PETROBRAS. **Sistemática de Planejamento, Aprovação e Acompanhamento de Projetos de Investimento do Sistema Petrobras**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2005. Revisão 3. Documento Interno do Sistema Petrobras.

PNNL, NREL. **Top Value Added Chemicals From Biomass**. V1. Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. Produced by Pacific Northwest National Laboratory PNNL) and the National Renewable Energy Laboratory (NREL). Springfield: T. Werpy and G. Petersen, Editors, 2004.

RABELO, S.C. *et al*. Aproveitamento de Resíduos Industriais. In: SANTOS, F. et al. **Cana-de-Açúcar**: bioenergia, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas. Viçosa: Fernando Santos, Aluízio Borém, Celso Caldas editores, 2010. Capítulo 17. p. 465-486.

REE, R. V.ANNEVELINK, B. **Status Report Biorefinery** 2007. Wageningen: Agrotechnology and Food Sciences Group, 2007.

RABELO, S.C. *et al*. Aproveitamento de Resíduos Industriais. In: SANTOS, F. et al. **Cana-de-Açúcar**: bioenergia, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas. Viçosa: Fernando Santos, Aluízio Borém, Celso Caldas editores, 2010. Capítulo 17. p. 465-486.

ROSSEL, C.E.V. *et al.* Sugar-based Biorefinery – Technology for Integrated Production of Poly (3-hydroxybutyrate), Sugar, and Ethanol. In: KAMM, B. *et al*. **Biorefineries - Industrial Processes and Products**: Status Quo and Future Directions. Weinheim: WILEY-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, v.1. 2006. Chap. 10. p. 209-226.

SEABRA, J.E.A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SILVA, D.P. **Estudo econômico do período de duração da safra de cana-de-açúcar na produção de açúcar e álcool para usinas de médio porte da região centro-sul do Brasil**. Monografia (Especialização). CEUN-EEM - Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2007.

TIROLE, Jean. **The theory of industrial oranization**. Cambridge: MIT Press, 1988.

WALL BAKE, J. D Van Deen et al. Expleining the experience curve: Cost Reduction of Brazilian ethanol from sugarcane. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 33, p. 644-658, 2009.

WILHELMSSON, B. Minimization of Sugar Loss and Colour Formation in the EC500 Plate Evaporator. **International Sugar Journal**, [S.l.], v. 101, n. 1205, p. 259-264, 1999.

WILHELMSSON, B. Practical Benefits of Plate Evaporators. **International Sugar Journal**, [S.l.], v. 100, n. 1195, p. 358-359, 1998.

XAVIER, C. E. O. et al. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil**: safra 2008/2009. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2009. 82 p.

ZILO, L.B. Análise comparativa da viabilidade econômico financeira para instalação de destilaria de etanol de cana-de-açúcar no Norte de Goiás e no Vale do São Francisco/BA: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2009.

Apêndice A

Premissas do Fluxo de Caixa da Planta de Referência

Demonstrativo de Resultados	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 a 24	25
Dados Operacionais																		
Dias Efetivos de Safra			82	157	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Moagem (M.t/safra)			0,73	1,40	1,98	2,50	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Palha Processada (t/safra)			61.129	117.267	165.921	210.208	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000	252.000
Produção de Etanol Hidratado / (m3/safra)			62.390	119.686	169.344	214.544	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199	257.199
Produção de Levedura Sangrada da Fermentação / (t/ano)					3.387	4.291	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144	5.144
Produção de Energia Elétrica / (MWh/safra)			32.549	62.441	88.347	170.168	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000	204.000
Produção de Energia Elétrica / (MWh/entressafra)			40.303	77.315	109.393	125.510	165.861	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114	155.114
Premissas Comerciais																		
Valor de venda de etanol hidratado / (R$/m3)			890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890
Preço da Energia Elétrica vendida na safra descontado os impostos (TUST, ANEEL, P&D) / (MWh)			120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Preço da Energia Eletrica vendida na entressafra descontado os impostos (TUST, ANEEL, P&D) / (MWh)			120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Valor da venda da levedura seca / (R$/t)			2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060
Receitas / (MMR$)																		
Receita bruta na venda de etanol hidratado			56	107	151	191	229	229	229	229	229	229	229	229	229	229	229	229
Receita na venda de Energia Elétrica na safra			4	7	11	20	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Receita na venda de Energia Elétrica na entressafra			5	9	13	15	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Receita com a venda de leveduras			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual da indústria																		82
Receita liquida			64	123	174	226	273	272	272	272	272	272	272	272	272	272	272	354

Custos / (MMR$)																		
Compra de Cana			(33)	(63)	(89)	(113)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)
Recolhimento de Palha			(0,9)	(1,8)	(2,5)	(3,2)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(4)	(4)	(4)	(4)
Insumos de produção			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)
Mão de obra			(2,3)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4)	(4)	(4)	(4)
Manutenção de entressafra			(3)	(7)	(9)	(12)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
Despesas Gerais e Administrativas			(2)	(4)	(6)	(8)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)
Total de Custos			(43)	(82)	(115)	(144)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)	(172)
Lucro Bruto / (MMR$)			21	41	60	82	102	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	182
Depreciação			(23)	(29)	(32)	(38)	(41)	(41)	(41)	(41)	(41)	(41)	(18)	(12)	(9)	(2)	0	0
Lucro antes do IR e CSLL (EBIT)			(2)	12	28	44	61	59	59	59	59	59	83	88	91	98	100	182
Imposto de Renda Pessoa Jurídica - IRPJ			0	(3)	(7)	(11)	(15)	(15)	(15)	(15)	(15)	(15)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(46)
Contribuição Social Sobre o Lucro Liquido - CSLL			0	(1)	(3)	(4)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(7)	(8)	(8)	(9)	(9)	(16)
Fluxo de Caixa / (MMR$)																		
Lucro Líquido			(1)	8	18	29	40	39	39	39	39	39	55	58	60	65	66	120
Depreciação/amortização			23	29	32	38	41	41	41	41	41	41	18	12	9	2	0	0
Fluxo de caixa operacional			22	37	50	68	81	80	80	80	80	80	72	70	69	67	66	120
Capital de giro			(6)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Investimento de capital depreciável	(72)	(159)	(58)	(50)	(66)	(24)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terreno	(0,2)											0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de caixa	(72)	(159)	(42)	(13)	(15)	44	81	80	80	80	80	80	72	70	69	67	66	120
TMA / (%)	8,02																	
VPL / (MR$)	233																	
TIR / (%)	15																	
Payback / (anos)	9																	

Apêndice B

Fluxo de Caixa da Biorefinaria

Demonstrativo de Resultados	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 a 24	25
Dados Operacionais																			
Dias Efetivos			82	157	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Moagem (t/safra)			0,73	1,40	1,98	2,50	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Produção de Etanol Hidratado (km3/safra)			62	120	157	116	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
Produção de Levedura Sangrada da Fermentação (t/ano)			0	0	0	2.325	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763	2.763
Produção de Levedura Seca (t/ano)			0	0	0	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
Produção de Açucar Cristal (/t)			0	0	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Produção de Acido Cítrico / (/t)			0	0	0	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
Produção de lisina / (t)			0	0	0	0	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700	13.700
Produção de Energia Eletrica (MWh/safra)			33.264	63.813	90.289	106.707	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867	81.867
Produção de Energia Eletrica (MWh/entressafra)			24.715	47.413	67.084	62.382	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213	53.213
Exportação de vapor (t/ano)			0	0	0	427.680	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424	611.424
Premissas Comerciais																			
Valor de venda de alcool hidratado / (R$/m3)			890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890	890
Preço da Energia Eletrica vendida na safra descontado os impostos (TUST, ANEEL, P&D) / (R$/MWh)			120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Preço da Energia Eletrica vendida na entressafra descontado os impostos (TUST, ANEEL, P&D) / (R$/MWh)			120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Valor da venda da levedura seca / (R$/t)			2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060	2.060

Valor de vendo do Açucar Cristal / (R$/t)			736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736
Valor de venda do Acido Cítrico / (R$/t)			2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665	2.665
Valor de venda da lisina / (R$/t)			3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007
Valor de vapor / (R$/t)			7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Receitas / (MMR$)																			
Receita bruta na venda de etanol hidratado			56	107	140	103	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123
Receita na venda de Energia Elétrica na safra			4	8	11	13	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Receita na venda de Energia Elétrica na entressafra			3	6	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Receita com a venda de leveduras			0	0	0	97	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Receita com a venda de açúcar cristal			0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Receita com a Venda de Ácido Cítrico			0	0	0	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133
Receita com a Venda de lisina			0	0	0	0	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
Receita com venda de utilidades			0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Valor residual da industria																			133
Custos / (MMR$)																			
Compra de Cana			(33)	(63)	(89)	(113)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)	(135)
Recolhimento de Palha			(0,9)	(1,8)	(2,5)	(3,2)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)	(3,8)
Insumos da produção de açúcar e etanol			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)
Insumos da produção de levedura					(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)	(35)
Insumos da produção de ácido cítrico						(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)	(13)
Insumos da produção de lisina							(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)	(26)
Mão de obra Açúcar e etanoll			(2,3)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4,5)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
Mão de Obra Levedura					(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)
Mão de Obra Ácido Cítrico						(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)	(1,3)
Mão de Obra Lisina							(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,2)

Manutenção etanol e açúcar			(3)	(7)	(9)	(12)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
Manutenção levedura					(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)
Manutenção ácido cítrico						(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)
Manutenção lisina							(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)	(1,9)
Despesas Gerais e Administrativas			(2)	(4)	(6)	(8)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)
Total de Custos			(43)	(82)	(151)	(197)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)	(254)
Lucro Bruto / (MMR$)			20	38	22	175	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	310
Depreciação			(23)	(29)	(33)	(48)	(61)	(61)	(61)	(61)	(61)	(61)	(38)	(32)	(28)	(14)	0	0	0
Lucro antes do IR e CSLL (EBIT)			-4	9	-11	128	116	116	116	116	116	116	139	144	149	163	177	177	310
Imposto de Renda Pessoa Juridica - IRPJ			1	(2)	3	(32)	(29)	(29)	(29)	(29)	(29)	(29)	(35)	(36)	(36)	(36)	(36)	(36)	(36)
Contribuição Social Sobre o Lucro Liquido - CSLL			0	(1)	1	(11)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(12)	(13)	(13)	(15)	(16)	(16)	(28)
Fluxo de Caixa / (MMR$)																			
Lucro Líquido			-2	6	-7	84	76	76	76	76	76	76	91	95	99	112	125	125	246
Depreciação/amortização			23	29	33	48	61	66	66	66	66	66	43	38	33	19	5	0	0
Fluxo de caixa operacional			21	35	26	132	138	139	139	139	139	139	131	130	129	128	127	126	247
Capital de giro			(6)	0	(3)	(1)	(2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Investimento de capital depreciavel	(72)	(159)	(58)	(50)	(143)	(137)	(51)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terreno	(0,2)											0	0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de caixa	(72)	(159)	(43)	(15)	(120)	(7)	84	139	139	139	139	140	132	130	129	128	127	126	247
Fluxo de caixa acumulado	(72)	(231)	(275)	(290)	(410)	(417)	(333)	(193)	(54)	85	225	364	496	626	755	883	1.010	1.136	2.268
Resultados																			
TMA / (%)	0,08																		
VPL / (MMR$)	472																		
TIR / (%)	17																		
Payback	9																		
VPL/investimento	0,95																		

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo