



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS
QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS**

OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO

Daniella Fartes dos Santos e Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientadores: José Vitor Bomtempo, D.Sc e Flávia Chaves Alves. D.Sc

Rio de Janeiro, 2015.

OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO

Daniella Fartes dos Santos e Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de MESTRE em Engenharia Química.

Aprovado por:

Fabício Brollo Dunham, D.Sc.

Fabio de Almeida Oroski, D. Sc.

Weber Antônio Neves do Amaral, D.Sc

Orientado por:

José Vitor Bomtempo, D.Sc

Flávia Chaves Alves, D.Sc

Rio de Janeiro, 2015.

“A necessidade é a mãe da inovação”

Platão – 427 a.C.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer ao meu marido, Felipe Matos, pela confiança incondicional em meu trabalho, pelo carinho, apoio e paciência durante meus monólogos sobre o setor sucroenergético.

Agradeço a minha família, Maristela, Fernando, Fernanda e Maicon, pelo amor e dedicação em me ensinar os valores que carrego por toda a vida, e que apesar da distância e da saudade, sempre me apoiaram e incentivaram a cruzar novas fronteiras.

Agradeço também aos meus orientadores, José Vitor e Flávia, pelo valioso conhecimento que compartilharam comigo, pela disposição em ajudar e pela simpatia que tornaram a elaboração desse trabalho muito mais agradável.

Agradeço imensamente a todos os profissionais que foram entrevistados e concordaram em ceder seu tempo para contribuir com a construção desse trabalho.

Por fim, agradeço ao Cnpq pelo apoio financeiro.

RESUMO

O desenvolvimento da indústria de cana-de-açúcar no Brasil começou desde o período de colonização, no entanto foi em 1975 com o Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL) que a produção de etanol no país foi intensificada, fazendo sua produtividade quintuplicar nos cinco anos seguintes. Desde então o setor evoluiu atingindo o estágio de uma indústria aparentemente madura se for considerado o elevado avanço industrial em produtividade. Apesar da aparente estagnação das rotas atuais de conversão do açúcar em etanol, a produção principalmente de grandes quantidades de biomassa com elevado teor energético indica o aparecimento de oportunidades de inovação que não só podem expandir o setor como modifica-lo. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi identificar e analisar as oportunidades de inovação do setor sucroenergético e seus principais fatores impulsionadores e inibidores através da ótica de especialistas das áreas de pesquisa, política e indústria do setor. Para isso foi utilizada uma metodologia de entrevistas do tipo focalizadas com 17 especialistas do setor sucroenergético escolhidos com o auxílio da abordagem de sistemas setoriais de inovação. Dentre os principais resultados deste trabalho tem-se que: as oportunidades que mais foram destacadas pelos entrevistados foi a produção do etanol de segunda geração, a venda da bioeletricidade e a geração de novos produtos a partir de fonte renovável; os principais fatores responsáveis por impulsionar essas inovações envolvem aspectos ambientais, financeiros e organizacionais; os principais fatores inibidores são de origem tecnológica, política e organizacional; e que existem grandes dificuldades de comunicação entre os agentes das áreas de pesquisa e indústria.

ABSTRACT

The development of sugarcane industry in Brazil started since the colonization period, however it was in 1975 with the National Alcohol Program (PROÁLCOOL) that ethanol production in the country has intensified, making their productivity quintuple in the five following years. Since then, the industry has evolved reaching the stage of an apparently mature industry, if the high industrial advance in productivity is considered. Despite the apparent stagnation of the current conversion routes from sugar into ethanol, the particularly large amounts of biomass produced with a high energy content indicates the appearance of innovation opportunities that can not only expand the sector but also modifies it. Thus, the aim of this study was to identify and analyze the ethanol industry innovation opportunities and their main driving factors and inhibitors through the specialists' opinions in the areas of research, policy and industry. A methodology of focused interviews was used with 17 ethanol industry experts chosen by the approach of sector innovation systems. Among the main results of this work are: the most highlighted opportunities that were responded by the interviewers was the production of second-generation ethanol, the sale of bioelectricity and the generation of new products from renewable sources; the main factors responsible for driving these innovations involve environmental, financial and organizational aspects; the main inhibiting factors are originated from technological, political and organizational aspects; and there are major difficulties in communication between the staff of research and industry areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de etanol nas últimas 11 safras. Fonte: UNICA (2015)	7
Figura 2: Distribuição das usinas no território brasileiro. Fonte: NOVACANA (2015b). .	7
Figura 3: Processo de produção de açúcar e etanol. Fonte: Traduzido de FINGUERUT (2005).	8
Figura 4: Quantidade de subprodutos do processamento da cana-de-açúcar. Fonte: CGEE (2012).	9
Figura 5: Morfologia da cana-de-açúcar. Fonte: CANILHA <i>et al.</i> (2012).....	10
Figura 6: Evolução do preço do etanol anidro e hidratado na usina de 2003 a 2015. Fonte: NOVACANA (2015).	11
Figura 7: Organização do sistema de inovação sucroalcooleiro de primeira geração.	19
Figura 8: Etapas da metodologia.	21
Figura 9: Oportunidades de inovação do setor sucroenergético.....	22
Figura 10: Esquema de construção da lista dos especialistas.	23
Figura 11: Oferta interna de energia elétrica por fonte. Fonte: MME/EPE (2014).....	28
Figura 12: Média de produção de energia hidráulica ao longo do ano de 2013. Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ONS (2014a).	29
Figura 13: Comparação da produção de energia hidroelétrica entre os anos de 2013 e 2014. Fonte: ONS (2014a).....	30
Figura 14: Complementaridade entre o parque hidroelétrico e a safra canavieira. Fonte: NYKO <i>et al.</i> (2010).....	32
Figura 15: Classificação dos fatores impulsionadores para a cogeração e venda da bioeletricidade.....	38
Figura 16: Distribuição das categorias dos fatores inibidores a cogeração e venda da bioeletricidade.....	39

Figura 17: Etapas de produção do etanol de segunda geração via hidrólise enzimática. Fonte: Dantas (2013).....	42
Figura 18: Fatores impulsionadores para o etanol 2G.....	59
Figura 19: Fatores inibidores para o etanol 2G.	59
Figura 20: Etapas do processo produtivo de etanol e geração da vinhaça.	61
Figura 21: Fatores impulsionadores para a produção de biogás.....	72
Figura 22: Fatores inibidores para a produção de biogás.....	72
Figura 23: Processamento da cana para a produção conjunta de açúcar e etanol. Fonte: CGEE (2009).	75
Figura 24: Esquema do processo de uma destilaria autônoma. Fonte: CGEE (2009). 77	
Figura 25: Fatores impulsionadores para a primeira geração.	87
Figura 26: Fatores inibidores para a primeira geração.	87
Figura 27: Representação esquemática de um sistema BIG-CC. Fonte: CGEE (2009).	92
Figura 28: Rotas potenciais a partir do gás de síntese. Fonte: Aguiar e Silva (2010)..	93
Figura 29: Fatores impulsionadores para a gaseificação.....	97
Figura 30: Fatores inibidores para a gaseificação.....	98
Figura 31: Abordagem de pesquisa para biocombustíveis e químicos de matéria-prima renovável. Fonte: Traduzido de BOZELL & PETERSEN (2010).....	101
Figura 32: Estratégias para a produção de commodities químicas a partir de biomassa. Fonte: CHRISTENSEN <i>et al.</i> (2008).	102
Figura 33: Produtos a partir da celulose. Fonte: PEREIRA JR. <i>et al.</i> (2008)	102
Figura 34: Produtos a partir da hemicelulose Fonte: PEREIRA JR. <i>et al.</i> (2008).	103
Figura 35: Produtos a partir da lignina. Fonte: PEREIRA JR. <i>et al.</i> (2008).....	103
Figura 36: Fatores impulsionadores para os Novos Produtos	111

Figura 37: Fatores inibidores para os Novos Produtos..... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Área plantada e produção de biomassa dos principais produtos agrícolas do Brasil.....	10
Tabela 2: Motores de transformação identificados para o SI em álcool combustível. ...	18
Tabela 3: Resumo dos motores de inovação identificados na transição do SPIS.....	20
Tabela 4: Fatores Impulsionadores e Fatores Inibidores para a Cogeração e Venda da Bioeletricidade.	37
Tabela 5: Fatores impulsionadores e inibidores da produção do etanol 2G.	58
Tabela 6: Fatores impulsionadores e inibidores para o aproveitamento da vinhaça.	70
Tabela 7: Perdas de ART no processo de produção.....	74
Tabela 8: Comparação entre moenda e difusor.	79
Tabela 9: Indicadores de desempenho da tecnologia industrial	82
Tabela 10: Indicadores de desempenho da tecnologia energética.....	83
Tabela 11: Fatores impulsionadores e Inibidores para Oportunidades no Processo de Primeira Geração.....	86
Tabela 12: Fatores Impulsionadores e Inibidores para a Gaseificação	95
Tabela 13: Fatores Impulsionadores e Inibidores para os Novos Produtos.....	109
Tabela 14: Resumo dos fatores inibidores e interesse dos entrevistados sobre as oportunidades.....	120

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	O SETOR DE ETANOL NO BRASIL	5
2.1.1	<i>A cana-de-açúcar</i>	9
2.2	SISTEMAS SETORIAIS DE INOVAÇÃO	12
2.2.1	<i>Sistema Setorial de Inovação - Setor de Etanol</i>	16
3	METODOLOGIA	21
3.1	ESCOLHA DOS GRUPOS DE OPORTUNIDADES	21
3.2	ESCOLHA DOS ENTREVISTADOS.....	23
3.3	REALIZAÇÃO DAS ENTREVISTAS.....	24
3.4	DETERMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS FATORES IMPULSIONADORES E INIBIDORES	25
3.5	RELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ÁREAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO.....	26
4	ANÁLISE SOBRE AS OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA	27
4.1	COGERAÇÃO E VENDA DA BIOELETRICIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR	27
4.1.1	<i>Sistema elétrico brasileiro e o sistema de leilão de energia</i>	27
4.1.2	<i>A venda da bioeletricidade da cana-de-açúcar</i>	30
4.1.3	<i>Opinião dos especialistas sobre a cogeração e a venda da bioeletricidade</i>	34
4.1.4	<i>Fatores impulsionadores e inibidores para a cogeração e venda da bioeletricidade</i>	37
4.2	ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO.....	40
4.2.1	<i>Desafios dos pré-tratamentos</i>	43
4.2.2	<i>Desafios da hidrólise</i>	44
4.2.3	<i>Desafios da Fermentação</i>	46
4.2.4	<i>Opinião dos Especialistas sobre o Etanol de Segunda Geração</i>	47
4.2.5	<i>Fatores Impulsionadores e Inibidores para o Etanol de Segunda Geração</i>	57
4.3	APROVEITAMENTO DA VINHAÇA.....	61
4.3.1	<i>Fertirrigação</i>	62
4.3.2	<i>Concentração por evaporação</i>	63
4.3.3	<i>Produção de biogás</i>	63
4.3.4	<i>Opinião dos especialistas sobre o aproveitamento da vinhaça</i>	65
4.3.5	<i>Fatores Impulsionadores e Inibidores para Aproveitamento da Vinhaça</i>	69
4.4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO	74
4.4.1	<i>Processo de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar</i>	75
4.4.2	<i>Oportunidades no processo de primeira geração</i>	77
4.4.3	<i>Opinião dos especialistas sobre oportunidades no processo de primeira geração</i>	83

4.4.4	<i>Fatores impulsionadores e Inibidores para o processo de produção de etanol de primeira geração</i>	86
4.5	GASEIFICAÇÃO	89
4.5.1	<i>Opinião dos Especialistas sobre a Gaseificação</i>	93
4.5.2	<i>Fatores impulsionadores e inibidores para a gaseificação</i>	95
4.6	NOVOS PRODUTOS	99
4.6.1	<i>Opinião dos especialistas sobre os Novos Produtos</i>	104
4.6.2	<i>Fatores Impulsionadores e Inibidores para os Novos Produtos</i>	109
5	RELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ÁREAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO	113
5.1	COMUNICAÇÃO COM A INDÚSTRIA	113
5.2	COMUNICAÇÃO COM A PESQUISA	116
5.3	COMUNICAÇÃO COM A ÁREA DE POLÍTICA	118
5.4	PERSPECTIVA DE EVOLUÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO	120
6	CONCLUSÃO	125
6.1	OPORTUNIDADES PARA NOVAS PESQUISAS	127
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
8	ANEXO	137
8.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PRÉ-TRATAMENTOS EXISTENTES	137

LISTA DE SIGLAS

1G – Primeira Geração

2G – Segunda Geração

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

AEAC – Álcool Etil Anidro Carburante

AEHC – Álcool Etil Hidratado Carburante

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica

ATR – Açúcar Total Recuperável

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CBP – *Consolidated Bio Processing*

CCEAR – Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CGEE – Centro de Gestão e Estudo Estratégicos

Cogen – Associação da Indústria de Cogeração de Energia

Copel – Companhia Paranaense de Energia Elétrica

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

FSI – Funções do Sistema de Inovação

GGE – Gases de Efeito Estufa

GNL – Gás Natural Liquefeito

IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*

LFA – Leilão de Fontes Alternativas

LULUCF – *Land Use, Land Use Change and Forestry*

MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

MEG – Mono-Etileno-Glicol

MME – Ministério de Minas e Energia

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONS – Operador Nacional do Sistema

ONU – Organização das Nações Unidas

PAISS – Plano Conjunto BNDES - Finep de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucoenergético e Sucoquímico

ppmv – Partes Por Milhão por Volume

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Alcool

RCE – Reduções Certificadas de Emissões

SHF – *Separate (ou Sequential) Hydrolysis and Fermentation*

SI – Sistema de Inovação

SIN – Sistema Interligado Nacional

SNI – Sistemas Nacional de Inovação

SPIS – Sistema de Produção e Inovação Sucoalcooleiro

SSCF – *Simultaneous Saccharification and Cofermentation*

SSF – *Simultaneous Saccharification and Fermentation*

SSI – Sistema Setorial de Inovação

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestion*

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar

UTE – Usina Termoelétrica

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda energética, cientistas em todo o mundo têm verificado aumentos significativos da concentração de dióxido de carbono na atmosfera. A concentração de CO₂ em 2013 foi cerca de 40% maior do que em meados de 1800, e tem apresentado um crescimento médio de 2 ppmv (partes por milhão volumétrico) por ano nos últimos dez anos (IEA, 2014a).

O aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) tem ocorrido principalmente devido à vasta utilização de fontes energéticas fósseis. Estima-se que no ano de 2012 82% da energia primária¹ utilizada no planeta foram de origem fóssil (IEA, 2014b).

Uma alternativa para reduzir esse consumo pelas fontes fósseis é através da utilização dos biocombustíveis e da energia proveniente da biomassa. O etanol é um tipo de biocombustível que tem sido produzido em diversos países a partir de diferentes matérias-primas. Nos Estados Unidos da América (EUA) ele é comumente produzido a partir do milho, na Europa, da beterraba e no Brasil da cana-de-açúcar.

O desenvolvimento da indústria de cana-de-açúcar no Brasil começou desde o período de colonização, no entanto a produção de etanol no país foi intensificada a partir de 1975 com o início do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL). No período de 1976/77 a 1980/81 a produção anual mais que quintuplicou, passando de 664 mil m³ para 3,7 milhões m³. Esse volume de produção, essencialmente de etanol anidro, já permitia uma mistura de cerca de 20% com toda gasolina vendida no país. No ano de 1985 a produção já havia triplicado, atingindo o volume de 11,5 milhões m³ produzidos, criando excesso de oferta, e assim, incentivando a adoção de carros dedicados ao consumo apenas de etanol, em sua variedade hidratada (FURTADO *et al.*, 2010).

Desde então o setor evoluiu atingindo o estágio de uma indústria aparentemente madura se for considerado o avanço industrial em produtividade. De acordo com Nogueira (2008), o aumento de produtividade industrial está limitado a apenas 4%.

¹Energia primária é o recurso energético que se encontra disponível na natureza (petróleo, gás natural, energia hídrica, energia eólica, biomassa e solar).

Apesar da aparente estagnação das rotas atuais de conversão do açúcar em etanol, estudos mostram que o potencial energético da cana-de-açúcar não é totalmente aproveitado pelas usinas, em uma análise simplificada pode-se dizer que apenas 1/3 da energia da cana está concentrada no caldo, os outros 2/3 estão retidos no bagaço e na palha (FURLAN *et al.*, 2013; OGEDA & PETRI, 2010; CANILHA *et al.*, 2012).

A cana-de-açúcar apresenta diversas vantagens se comparada com as outras matérias-primas, como custo de produção menor, melhor balanço energético e maior produtividade por hectare (GOLDEMBERG & GUARDABASSI, 2009). Uma característica também interessante da cana-de-açúcar é a grande produção de biomassa, maior do que qualquer outra cultura brasileira (CANILHA *et al.*, 2012).

A grande produção de biomassa com alto potencial energético é apenas uma das oportunidades de inovação que surgem no setor de etanol brasileiro. Atualmente as usinas sucroenergéticas já utilizam o bagaço da cana para fazer a cogeração e até a venda do excedente de energia. A vinhaça, outro subproduto produzido em grandes quantidades, é utilizada para fertirrigação. No entanto, várias outras oportunidades surgem no contexto do setor sucroenergético, como a produção do etanol de segunda geração (2G), a produção do biogás a partir da vinhaça, a gaseificação da biomassa, a produção de intermediários químicos renováveis, entre outros.

Apesar das inúmeras oportunidades de inovação que aparecem no setor sucroenergético, a questão tecnológica é apenas um dos requisitos necessários para que essas oportunidades definitivamente se transformem em inovação. Malerba (2006) ressalta a importância da troca de informação entre diferentes atores do setor, como as empresas, as universidades, os centros de pesquisa, as agências governamentais, os fornecedores e consumidores. Na abordagem de Sistema Setorial de Inovação (SSI), o desempenho inovador de um determinado setor não pode ser atingido, focando nos esforços e conquistas das empresas individualmente. Pelo contrário, a inovação é um processo que resulta da interação de atores de uma mesma, ou de diferentes naturezas institucionais (MALERBA, 2006).

Diante de tantos aspectos que devem ser analisados – recursos disponíveis, maturidade tecnológica, dinâmica dos novos mercados, novos atores envolvidos – a escolha da melhor oportunidade de inovação para cada usina se torna complexa. A possibilidade de novas rotas de conversão e novos produtos aumenta ainda mais a dificuldade do setor em lidar com as novas tecnologias e novos mercados.

Dessa forma, compreender as vantagens e desvantagens de cada oportunidade de inovação sobre pontos de vista de diferentes agentes do setor expande a análise para além da empresa unicamente, detectando fatores relevantes que poderiam ser ignorados se a análise fosse realizada sem considerar os papéis dos diferentes atores do setor.

Sendo assim este trabalho foi movido pelas seguintes perguntas:

- Quais as principais oportunidades de inovação no setor sucroenergético brasileiro?
- Quais os principais fatores que impulsionam ou inibem cada uma dessas oportunidades?
- Diferentes agentes do setor sucroenergético enxergam essas oportunidades da mesma forma? E como eles se relacionam para aproveitar essas oportunidades?

Diante dessas perguntas foi possível estabelecer o objetivo geral do trabalho como: Identificar as oportunidades de inovação do setor sucroenergético brasileiro e seus principais fatores influenciadores através da ótica de agentes das áreas de pesquisa, política e indústria.

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Identificar as principais oportunidades de inovação da parte industrial do setor sucroenergético;
- Analisar os fatores impulsionadores e inibidores de cada uma dessas oportunidades pela ótica de agentes do setor sucroenergético;
- Categorizar esses fatores de forma a sistematizar a análise sobre a oportunidade de inovação;
- Analisar a comunicação entre as áreas de pesquisa, política e indústria do setor sucroenergético.

Além desta introdução, esse trabalho está dividido em mais 5 capítulos. O Capítulo 2 trata de uma revisão da literatura do setor de etanol brasileiro e da abordagem de Sistemas Setoriais de Inovação, a qual fornece o embasamento teórico para a análise do papel dos agentes de inovação. O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada no trabalho, enfatizando a identificação das oportunidades de inovação e as entrevistas realizadas com os agentes de inovação. O Capítulo 4 discute individualmente cada uma das oportunidades de inovação sob a ótica dos agentes do setor, identificando os

fatores que mais influenciam ou inibem o aproveitamento dessa oportunidade. O capítulo 5 faz uma análise sobre a comunicação entre os agentes do setor, considerando as oportunidades de inovação de uma forma geral. E, por fim, capítulo 6 traz as conclusões do trabalho e identifica as oportunidades para novas pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Como foi comentado na introdução, este estudo se dedica à análise das oportunidades de inovação através da ótica dos agentes do setor sucroenergético. Sendo assim, não só o setor sucroenergético deve ser revisado como também o papel desses agentes dentro do setor.

Dessa forma, o capítulo de revisão da literatura está dividido em duas partes. A primeira parte é referente ao estudo do setor de etanol brasileiro, dando ênfase às características da cana-de-açúcar, uma vez que muitas das oportunidades surgem do aproveitamento da biomassa dessa matéria-prima. A segunda parte explora o conceito de Sistemas Setoriais de Inovação, com base no qual serão construídos os argumentos teóricos para a análise das relações entre os agentes do setor sucroenergético.

2.1 O Setor de Etanol no Brasil

Introduzida no período colonial, a cana-de-açúcar se transformou em umas das principais culturas da economia brasileira, se destacando pela produção de açúcar e de etanol. Esta segunda particularmente foi alavancada em 1975 com a criação do PROÁLCOOL, que visava obter uma alternativa aos elevados preços dos combustíveis importados diante da crise do petróleo de 1973 e 1979. Nesta época o governo brasileiro investiu na ampliação da produção agrícola, na modernização e melhoria das destilarias e instalou novas unidades produtoras e armazenadoras (DANTAS, 2009). Desde então o setor evoluiu atingindo o estágio de uma indústria madura, considerando principalmente o avanço industrial em produtividade.

A União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA) divide a história da cana-de-açúcar em quatro momentos. O primeiro se refere desde a chegada da cana-de-açúcar no Brasil, em 1532, até 1972. Neste período, alguns eventos podem ser destacados como: o lançamento do veículo Ford por Henry Ford, que podia ser movido à gasolina, querosene ou etanol; o Decreto 19.717 que obrigava a utilização de 5% de etanol anidro como aditivo na gasolina; e a criação da Cooperativa de Produtores da Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (Copersucar) (UNICA, 2015).

O segundo momento é o período entre 1973 e 2002. Esse período foi um dos mais importantes para a indústria de etanol, pois marca a primeira crise do petróleo em

1973, a criação do PROÁLCOOL em 1975 e a segunda crise do petróleo em 1979. Com o PROÁLCOOL, o governo criou incentivos para substituir em larga escala os combustíveis derivados de petróleo por etanol, de forma a combater os preços do petróleo importado, que haviam quadruplicado. Neste período pode-se destacar o auge e o declínio da utilização de etanol combustível. Em 1985 os carros movidos a etanol representavam 96% das vendas (UNICA, 2015). No entanto, no final dos anos 90 devido à crise econômica enfrentada pelo país e a elevada inflação, a venda desses automóveis começava a cair e a gasolina retomava espaço na matriz energética brasileira.

Ainda neste momento, pode-se destacar: a introdução da bioeletricidade como um novo produto da cana-de-açúcar; a realização do Rio 92 Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, onde foi debatido o papel do etanol na redução das emissões de GEE; a criação da UNICA em 1997; e a primeira produção de plástico biodegradável de cana-de-açúcar em 2002 (UNICA, 2015).

O terceiro momento (2003-2009), chamado de “a revolução *flex*”, tem esse nome pelo lançamento dos automóveis com motores *flex fuel*, capaz de funcionar com etanol hidratado ou gasolina. Outros eventos podem ser destacados nesse período como: o lançamento do primeiro avião movido a etanol pela Embraer em 2004; o primeiro leilão de energia para compra da bioeletricidade da usina, em 2005; o primeiro projeto de cogeração do bagaço a ser aprovado pela Organização das Nações Unidas (ONU) para receber créditos de carbono; e o Protocolo Agroambiental para antecipar o fim das queimas da palha da cana-de-açúcar.

O quarto, e atual momento que o setor vive, marca principalmente os desenvolvimentos tecnológicos voltados para novos produtos das usinas, como os biocombustíveis avançados, intermediários químicos e bioplásticos.

Hoje o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e está entre os líderes em produção de etanol. Na safra de 2013/2014 foram produzidos mais de 27,5 milhões de m³ de etanol, sendo aproximadamente 9,5% desse montante destinado à exportação (UNICA, 2015b). Um dos mercados externos bastante visados para exportação é o EUA, principalmente o estado da Califórnia. Atualmente 39 usinas já exportam para Califórnia e outras 206 usinas estão cadastradas e autorizadas a exportar etanol para os EUA (NOVACANA, 2015a).

O Brasil conta atualmente com 409 usinas distribuídas principalmente pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás (NOVACANA, 2015b). Na Figura 1 é possível verificar a produção de etanol ao longo das últimas 11 safras com uma participação bem mais significativa da região Centro-Sul do que da Norte-Nordeste. Na Figura 2 pode-se verificar que as usinas estão concentradas principalmente no estado de São Paulo e nos estados vizinhos e no litoral da região Nordeste.

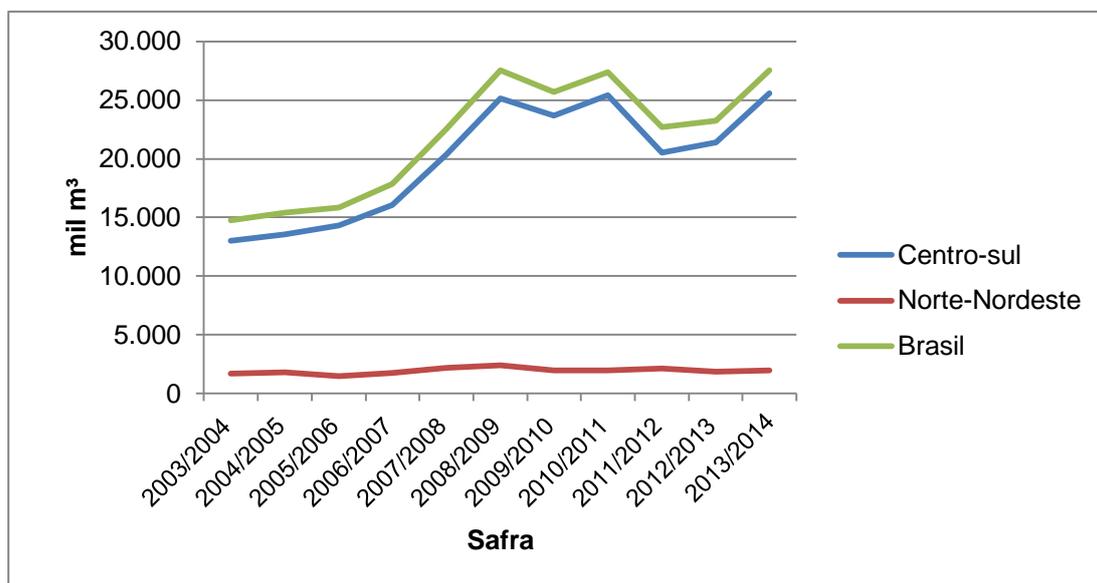


Figura 1: Produção de etanol nas últimas 11 safras. Fonte: UNICA (2015)



Figura 2: Distribuição das usinas no território brasileiro. Fonte: NOVACANA (2015b).

O processo de produção do etanol está atrelado à produção de açúcar, já que o etanol pode ser produzido diretamente do caldo da cana ou do melaço do processamento de açúcar. A Figura 3 mostra um fluxograma desse processo produtivo. Inicialmente a cana-de-açúcar passa por um processo de moagem para se extrair o caldo. Em seguida esse caldo é tratado e passa por uma sequência de evaporadores e cristalizadores de forma a obter o açúcar comercializável. O etanol pode ser obtido da fermentação do melaço da produção de açúcar ou diretamente do caldo da cana-de-açúcar. Depois de fermentado, o etanol passa por um processo de destilação onde é separado da água para produção do etanol anidro e hidratado (FINGUERUT, 2005).

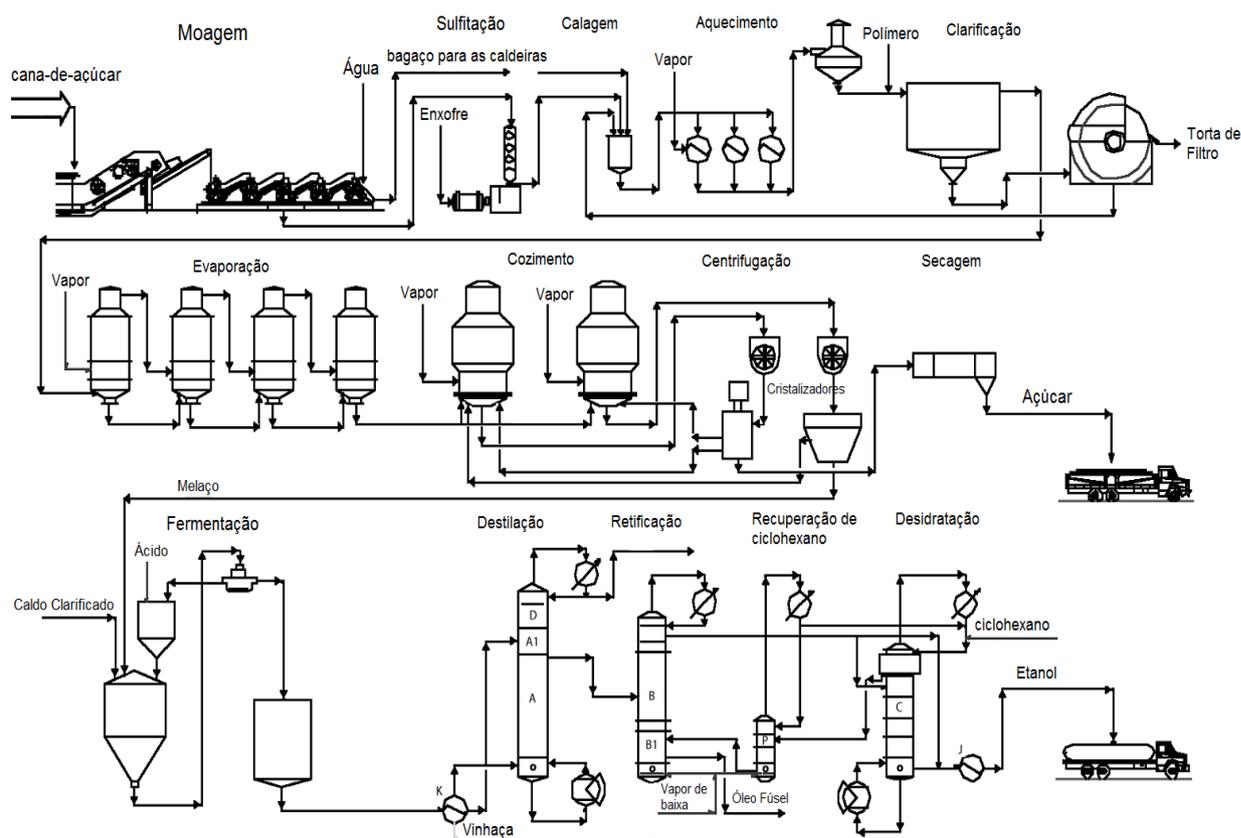


Figura 3: Processo de produção de açúcar e etanol. Fonte: Traduzido de FINGUERUT (2005).

O setor de etanol apresenta diversas oportunidades de inovação principalmente pela quantidade de resíduo que é gerado durante o processamento da cana-de-açúcar. Se consideradas as produções de açúcar e etanol, tem-se principalmente a geração de bagaço e de vinhaça como principais subprodutos. A Figura 4 mostra as quantidades médias geradas de resíduos a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar.

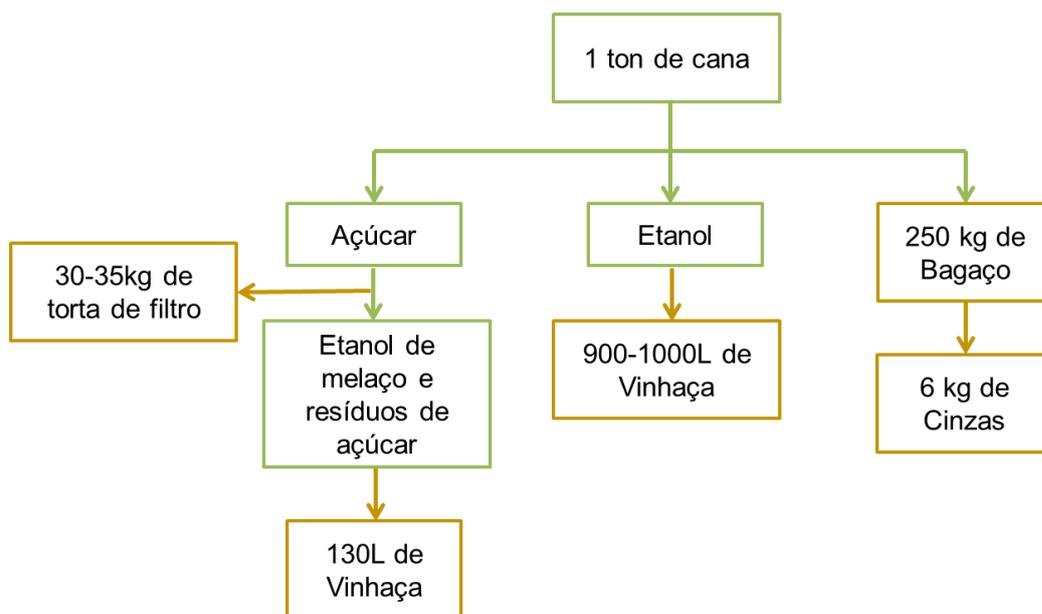


Figura 4: Quantidade de subprodutos do processamento da cana-de-açúcar. Fonte: CGEE (2012).

No decorrer das próximas seções serão discutidas oportunidades de inovação envolvendo esses resíduos. Dessa forma, faz-se necessário um entendimento sobre as composições tanto desses resíduos quanto da própria cana-de-açúcar. Sendo assim, a próxima seção discutirá brevemente algumas características dessa matéria-prima.

2.1.1 A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar está entre os principais produtos agrícolas produzidos no Brasil. Ela é constituída de material lignocelulósico e é uma gramínea perene do gênero *Saccharum* (CANILHA *et al.*, 2012). Material celulósico ou lignocelulósico é um termo genérico para descrever os constituintes principais na maioria dos vegetais, isto é, a celulose, a hemicelulose e a lignina. A composição depende não apenas do tipo de vegetal, mas também de condições de crescimento, da parte da planta escolhida e da idade de colheita (OGEDA & PETRI, 2010).

A cana-de-açúcar é nativa de clima temperado quente, comum em regiões tropicais como o Brasil, Índia, África e Ásia-Pacífico. A morfologia da planta da cana pode ser visto na Figura 5:

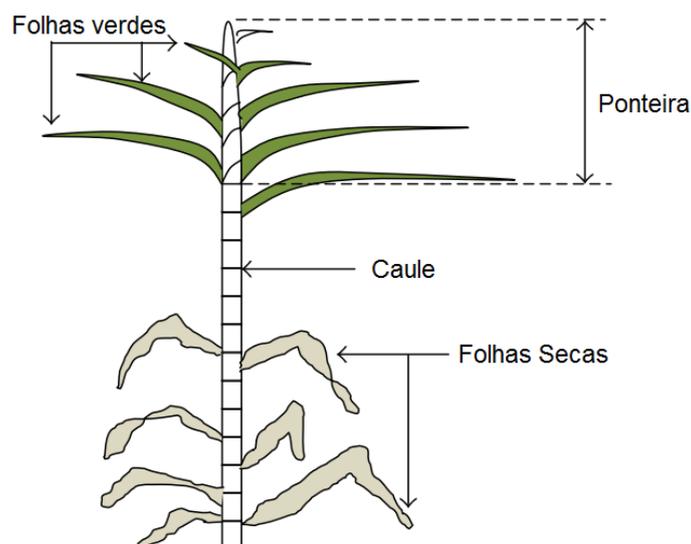


Figura 5: Morfologia da cana-de-açúcar. Fonte: CANILHA *et al.* (2012).

A cana-de-açúcar é composta principalmente pelo caule e pelas folhas. O caule é utilizado no processo de moagem para retirada do caldo da cana para a produção de açúcar e etanol. O caule sem o caldo é chamado de bagaço, e junto com as folhas e as ponteiros formam o conjunto de biomassa da cana-de-açúcar.

Como foi dito na seção anterior, o processamento da cana-de-açúcar gera uma grande quantidade de subprodutos, principalmente de material lignocelulósico. Na Tabela 1 é possível verificar que a cana-de-açúcar é a segunda cultura brasileira que mais utiliza área no território nacional e também a que produz a maior quantidade de biomassa residual.

Tabela 1: Área plantada e produção de biomassa dos principais produtos agrícolas do Brasil.

Produto	Área Plantada (1000 hectares)	Produção de Biomassa (1000 t)
Soja	25.042,2	66.383,0
Cana-de-Açúcar	8.527,8	602.178,8
Milho	7.596,3	38.861,8
Arroz	2.427,1	11.600,3
Trigo	2.166,2	5.788,6
Mandioca	1.787,5	24.524,3

Fonte: CONAB (2012) e EMBRAPA (2010) *apud* CANILHA *et al.* (2012).

O etanol é produzido principalmente pela cana-de-açúcar, pelo milho (nos EUA) e pela beterraba (na Europa). A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta diversas vantagens em relação às outras matérias-primas por várias razões: o custo de produção é menor, reduz em 84% as emissões de gases de efeito estufa se considerada uma análise de ciclo de vida e apresenta maior produtividade por hectare, (GOLDEMBERG & GUARDABASSI 2009).

Apesar das vantagens da cana-de-açúcar diante das outras matérias-primas, o setor de etanol brasileiro vem enfrentando diversas dificuldades que têm aumentado seus custos de produção. Esse aumento dos custos pode ser percebido pelo aumento do preço do etanol nas usinas, como mostra a Figura 6.

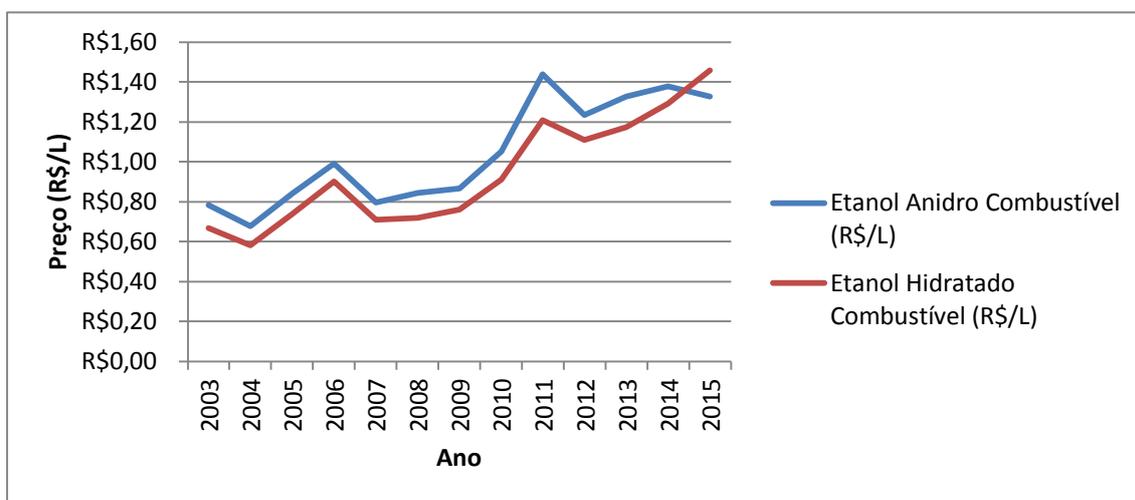


Figura 6: Evolução do preço do etanol anidro e hidratado na usina de 2003 a 2015.
Fonte: NOVACANA (2015).

O aumento do custo de produção do etanol ocorreu por diversas razões que envolvem principalmente aspectos agrícolas, como secas, má adaptação de variedades de cana em diferentes solos, investimentos tardios na recuperação de canaviais e mecanização. Esse aumento nos custos agrícolas impacta fortemente no preço do etanol uma vez que cerca de 70% do custo de produção do etanol derivam do preparo, cultivo e coleta da matéria-prima (NYKO *et al.*, 2013).

Diante um cenário de dificuldades enfrentadas pelo setor, juntamente com a percepção de que existe um grande potencial energético não aproveitado pelas usinas, uma análise sobre as oportunidades de inovação no setor sucroenergético torna-se ainda mais valiosa. No entanto, como foi mencionado anteriormente, a inovação não depende unicamente de fatores tecnológicos, ao contrário, é essencial

considerar as conexões entre diferentes agentes do setor para avaliar o real potencial de uma oportunidade de inovação.

Para compreender a importância e o papel dos agentes de inovação, a próxima seção se dedicará a estudar os Sistemas Setoriais de Inovação.

2.2 Sistemas Setoriais de Inovação

Existem diversas tentativas de mensurar a inovação. Investimento em P&D e patentes registradas são exemplos de medidas que têm sido usadas como indicadores de inovação. No entanto, a análise sobre muitas das medidas é feita tomando como parâmetro uma única empresa.

De acordo com Malerba (2006), tentar compreender a inovação através de ações como: focar em uma empresa como o ator principal da inovação, considerar como únicas fontes de inovação o *learning-by-doing* ou P&D, considerar o sistema de patentes e agências de incentivos públicos como as únicas instituições relevantes para o processo de inovação, leva o estudioso a capturar apenas parte desse processo.

Dessa forma, foi escolhida para esse estudo a abordagem de Sistema Setorial de Inovação. Nesta abordagem, o desempenho inovador de um determinado setor não pode ser analisado focando os esforços e conquistas das empresas individualmente. Pelo contrário, a inovação é um processo que resulta da interação de atores de uma mesma, ou de diferentes naturezas institucionais (FURTADO *et al.*, 2010).

Um dos primeiros estudiosos a propor a definição de Sistemas de Inovação (SI) foi Lundvall em 1992, em seu livro *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, onde definiu o SI como um conjunto de componentes discretos e a relação entre eles. Para o autor, duas dimensões se destacam na definição de um SI, as estruturas de produção, isto é, tanto organizações e instituições envolvidas em pesquisa e desenvolvimento como também atividades rotineiras de produção, distribuição e consumo; e a definição institucional, que inclui todos os aspectos da estrutura econômica e prática institucional que afetam a aprendizagem. A abordagem de Lundvall (1992) reconheceu que a organização dos SI é influenciada por fatores econômicos, políticos e culturais que ajudam a determinar a escala, direção e sucesso de todas as atividades de inovação.

Buscando entender as especificidades de um setor, Malerba e Orsenigo (1996) introduziram o conceito de Sistema Setorial de Inovação, cuja análise se baseia na

ideia de que diferentes setores operam em diferentes regimes tecnológicos. As principais diferenças entre as abordagens de Sistema Nacional de Inovação (SNI) e Sistema Setorial de Inovação (SSI) estão relacionadas com as fronteiras delimitadas para estudo. Enquanto os SNI são limitados por fronteiras nacionais, a abordagem de SSI estuda sistemas que podem ser locais, nacionais ou multinacionais. Muitas vezes essas três dimensões coexistem em um setor. Além disso, os SNI's resultam da composição de diferentes setores, alguns dos quais são tão importantes que dirigem o crescimento da economia nacional.

Pela definição de Malerba (2006), um setor é um conjunto de atividades que são unificadas por alguns grupos de produtos direcionados para uma determinada ou emergente demanda e que compartilham algum conhecimento comum. Empresas de um setor têm ao mesmo tempo pontos em comum e pontos heterogêneos.

De modo a aprofundar os estudos sobre SSI, Malerba (2006) define que a estrutura da abordagem por sistemas setoriais se concentra em três dimensões principais dos setores:

- **Conhecimento e Domínio Tecnológico:** Essa dimensão é essencial para delimitar o setor, uma vez que qualquer setor pode ser caracterizado por uma base específica de conhecimento.
- **Atores e Redes:** Caracteriza o setor uma vez que reúne todos os seus agentes. Esses agentes podem ser pessoas ou organizações. E ainda essas organizações podem ser empresas ou outras instituições, como universidades, instituições financeiras e agências governamentais. Essas organizações também podem ser partes da empresa, como departamentos de P&D e produção. Esses atores são caracterizados por específicos processos de aprendizado, competências, crenças, objetivos, estruturas organizacionais e comportamentos que interagem através de processos de comunicação, troca, cooperação, competição e comando.
- **Institutions:** As *institutions* incluem normas, rotinas, hábitos comuns, práticas estabelecidas, regras, leis, padrões, entre outros. As interações entre os agentes são moldadas pelas instituições.

Malerba (2006) explica que o *Conhecimento e o Domínio Tecnológico* não se distribuem automaticamente entre as empresas, e para que eles possam ser absorvidos, as empresas precisam acumular diversas habilidades. Essa apropriação vai depender de duas dimensões do conhecimento. A primeira é grau de

acessibilidade deste, a qual pode ser interna ou externa ao setor. Caso ela seja externa, a apropriação vai estar relacionada com os diferentes níveis e fontes de oportunidades tecnológicas e científicas. A segunda se refere à característica acumulativa do conhecimento, isto é, a que grau um conhecimento pode ser gerado a partir de outro.

Em relação à dimensão *Atores e Redes*, o autor destaca que os principais atores são as empresas, no entanto a contribuição de fornecedores e usuários é indispensável para uma análise do setor. Outras organizações como universidades, órgãos financiadores, agências governamentais, entre outras, suportam a inovação, a difusão de tecnologia e a produção pelas empresas. Dentre diferentes setores, o papel de cada um desses agentes pode variar enormemente.

Quando o foco é em usuários, agências governamentais e consumidores, a abordagem de SSI traz uma nova visão sobre demanda. Em um sistema setorial, a demanda não é vista como um conjunto agregado de compradores ou clientes semelhantes entre si, mas como um conjunto de agentes heterogêneos que interagem de várias maneiras com os produtores. A demanda torna-se então um misto de consumidores individuais, empresas e órgãos públicos, que são caracterizados por seus conhecimentos, processos de aprendizagem e competências, e que são afetados por fatores sociais e instituições (MALERBA, 2006).

Assim, na abordagem de sistema setorial, a inovação é considerada como um processo que envolve interações sistemáticas entre uma grande variedade de atores para a geração e troca de conhecimentos relevantes para a inovação e sua comercialização.

A última dimensão exposta por Malerba (2006) são as *Institutions*. Para o autor elas desempenham um papel importante por afetarem a taxa de mudança tecnológica, e a organização da atividade de inovação. Elas podem surgir como resultado de decisão planejada por empresas ou outras organizações, ou como consequência imprevista da interação dos agentes. Elas também podem ser nacionais ou pertencer a um setor específico. Muitas vezes, as características das instituições nacionais favorecem setores específicos que se encaixam melhor nas especificidades dessas instituições. Assim, em certos casos, alguns sistemas setoriais se tornam mais predominantes em um país do que em outros, porque as instituições existentes nesse país proporcionam um ambiente mais adequado para a inovação.

Em seu trabalho, Malerba (2006) deixa claro que o SSI é dinâmico e que suas transformações ocorrem através das interações entre as três dimensões citadas. Tentando aprofundar a compreensão sobre a dinâmica de um sistema de inovação, Hekkert *et al.* (2007) discutem que inúmeras atividades estão envolvidas nesse processo de transformação, e que é necessário que haja um mapeamento das atividades que mais influenciam no objetivo do SI. Essas atividades foram chamadas de Funções do Sistema de Inovação (FSI). Os autores detectaram sete FSI's:

- **FSI 1: Atividades Empreendedoras** – Através do empreendedorismo, tanto novas empresas ou empresas existentes que diversifiquem sua estratégia, transformam o potencial de novos conhecimentos, rede de relacionamentos e mercados, em ações para gerar e tirar vantagem de novas oportunidades de negócio.
- **FSI 2: Desenvolvimento de Conhecimento** – A pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a criação de conhecimento são pré-requisitos para os SI. Existem três indicadores mais comuns para medir o desenvolvimento do conhecimento: projetos de P&D, patentes e investimentos em P&D.
- **FSI 3: Difusão do Conhecimento Através de Redes** – A função principal das redes de relacionamento é trocar informações. Elas são ainda mais importantes num contexto heterogêneo onde as atividades de P&D contemplam o governo, competidores e outros agentes de mercado.
- **FSI 4: Direcionamento da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico** – Devido à limitação de recursos é necessário que haja um planejamento sobre qual opção tecnológica é mais interessante de se investir. O direcionamento da pesquisa não é exclusivamente uma questão de influência governamental ou de mercado. Normalmente é um processo iterativo e cumulativo de troca de ideias entre produtores de tecnologia, usuários de tecnologia e diversos outros atores, no qual a própria tecnologia não é uma constante, mas uma variável.
- **FSI 5: Formação de mercado** – Devido à dificuldade de desenvolvimento de novas tecnologias, é necessário que hajam mecanismos que facilitem esse processo. Algumas possibilidades de proteção são a formação de nichos temporários de mercado, a implementação de regimes favoráveis de tributação e definição de quotas mínimas de consumo.
- **FSI 6: Mobilização de recursos para a inovação** – Para viabilizar a produção do conhecimento é necessário que haja tanto recursos humanos quanto financeiros. Esses recursos são os insumos básicos para impulsionar as atividades dos SI's.

- **FSI 7: Criação de legitimidade e contenção da resistência à mudança –**
Normalmente, a adoção de uma nova tecnologia é acompanhada de um novo regime que pode provocar uma resistência. Grupos contra e a favor da tecnologia pressionarão por recursos para pesquisa, diferenciação tributária e demais formas de legitimar o uso da nova tecnologia.

Hekkert *et al.* (2007) apontam que as FSI's podem influenciar positivamente umas às outras de forma a gerar os motores de transformação do SI.

Tendo discutido alguns dos principais conceitos sobre o SSI, a próxima seção se dedicará a fazer uma análise especificamente no setor sucroenergético brasileiro. Essa análise é essencial para o entendimento do ambiente onde as oportunidades de inovação poderão ser aproveitadas.

2.2.1 Sistema Setorial de Inovação - Setor de Etanol

De acordo com Malerba (2006), entender as especificidades dos principais setores de uma economia contribui imensamente para o conhecimento do crescimento nacional e dos padrões nacionais de atividades inovadoras. Sendo assim, é importante analisar o setor de etanol brasileiro com a perspectiva das dimensões dos SSI.

Pode-se dizer que o PROÁLCOOL, instituído em 1975, foi o principal marco no desenvolvimento do mercado de biocombustíveis no Brasil e também para a estruturação do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro (SPIS). Foi através dele que o setor recebeu incentivos à produção de etanol, cedendo créditos com juros negativos, para a modernização, ampliação e construção de novas usinas e também para plantação de novas lavouras (VERGES, 2013).

Em poucos anos o sucesso do programa foi sentido no rápido aumento de produção, entre a safra de 1976/76 e 1980/81 a produção anual quintuplica passando de 664 mil m³ para 3,7 milhões m³. No ano de 1985 a produção já havia triplicado novamente, atingindo o volume de 11,5 milhões m³ produzidos, criando excesso de oferta, incentivando a adoção de carros dedicados ao consumo apenas de etanol, em sua variedade hidratada (FURTADO *et al.*, 2010).

No entanto, apesar de seu papel central no sucesso do SPIS, o PROÁLCOOL não pode ser compreendido como um evento isolado dentro do SI de etanol no Brasil. Políticas empregadas ao longo de décadas permitiram que os agentes acumulassem

conhecimento pelo processo de aprendizado, possibilitando o salto de produtividade observado na implementação do programa.

O trabalho de Dunham (2009) mostra como o processo de estruturação do SPIS, no período anterior a 1975, pode ter sido importante para o sucesso do PROÁLCOOL. O estudo identifica seis motores que transformaram o SPIS. O objetivo final foi associar os eventos às FSI, estruturando-as numa sequência lógica e temporal.

Dunham (2009) mapeou seis motores de inovação que consideram responsáveis pela construção do SPIS no Brasil:

- Processo de modernização de 1875 e instalação dos engenhos centrais;
- Superação da crise do mosaico²;
- Formação do mercado de álcool combustível;
- Desenvolvimento de variedades de cana após a crise do mosaico;
- Expansão produtiva da agroindústria sucroalcooleira em São Paulo;
- Relacionamento da agroindústria sucroalcooleira com a indústria de equipamentos.

Cada um desses motores foi classificado quanto às suas motivações, inovações, funções ativadas e resultados. Como se pode observar pela Tabela 2, cada um desses motores, dentro de seu período de atividade, foi capaz de acionar uma ou mais funções, gerando processos inovadores que fundamentaram a construção do SPIS.

²O agente causador do mosaico é conhecido como *Sugar Cane Mosaic Virus* (SCMV) ou simplesmente vírus do mosaico. Recebeu este nome por causar nas folhas da cana-de-açúcar estrias brancas que formam uma espécie de mosaico (Oliver & Szmrecsányi, 2003).

Tabela 2: Motores de transformação identificados para o SI em álcool combustível.

Motores	Processo de modernização de 1875	Superação da crise do mosaico	Formação do mercado de álcool	Desenvolvimento de variedades de cana	Expansão produtiva em São Paulo	Relacionamento com a indústria de equipamentos
Motivação da mudança	Aumentar a competitividade do açúcar no mercado internacional	Recuperar, com urgência, a produtividade do açúcar	Desviar o excedente do açúcar para a produção de álcool	Aumentar a produtividade da cana-de-açúcar	Aproveitar oportunidades no mercado paulista de açúcar	Aproveitar a crescente demanda por equipamentos
Inovação	Aquisição e uso de equipamentos industriais modernos	Organização de um sistema de experimentação e difusão de tecnologia agrícola	Aquisição e uso de destilarias de álcool anidro	Melhoramento genético da cana e difusão de tecnologias agrícolas	O motor girou em torno do aumento das escalas de produção	Equipamento de maior porte e com tecnologia própria
FSI envolvidas	FSI 1, FSI 4, FSI 6 e FSI 7	FSI 2, FSI 3, FSI 4	FSI 1, FSI 5, FSI 7	FSI 2, FSI 3, FSI 4 e FSI 6	FSI 1 e FSI 7	FSI 1, FSI 2 FSI 5 e FSI de relacionamento com fornecedores
Resultados obtidos	O motor falhou. A modernização não foi alcançada. Resultado colateral: criação dos fornecedores de cana.	O motor transformou o SI. A crise do mosaico foi superada.	O motor transformou o SI. O mercado de álcool foi formado.	O motor transformou o SI de forma desigual, sendo mais intensa em São Paulo do que no resto do Brasil.	O motor transformou o SI em São Paulo, aumentando o parque agroindustrial.	O motor transformou o SI em São Paulo, acelerando a modernização agroindustrial.

Fonte: Dunham (2009).

Na Figura 7 estão representados os principais agentes que compõe o SPIS da cana-de-açúcar atualmente, bem como os fluxos produtivos, de conhecimento e financeiros. No estudo de Furtado *et al.* (2010), é destacada a grande importância da pesquisa agrícola dentro do sistema. Tanto as instituições de pesquisa, quanto as universidades têm um forte direcionamento para o aumento da produtividade no campo, gerando novas variedades, mais produtivas e resistentes a doenças.

De acordo com Verges (2013), a maneira como esse sistema é organizado favorece a melhora incremental do processo produtivo, em detrimento das inovações radicais. Segundo o autor isso é notado pela pequena importância das *start-ups* dentro do sistema que caracteriza a primeira geração de biocombustíveis.

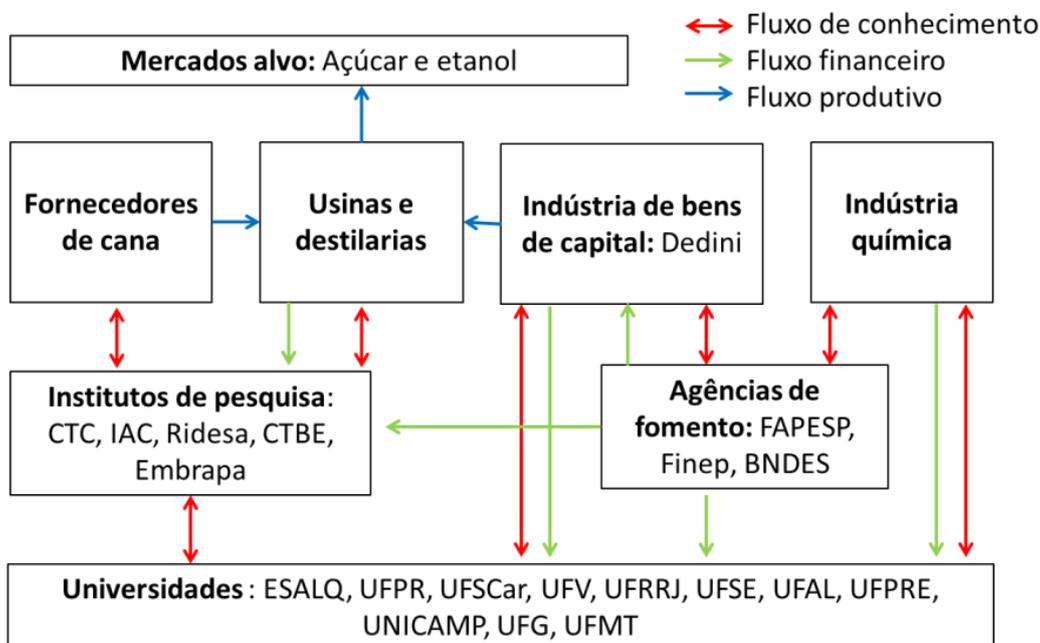


Figura 7: Organização do sistema de inovação sucroalcooleiro de primeira geração.
 Fonte: Adaptado de FURTADO *et al.* (2010).

O estudo de Verges (2013) mostrou que a partir de 2000, mudanças institucionais, regulatórias e competitivas vêm mudando a configuração do setor, o que leva o SPIS a um processo de transição, nas quais os agentes são incentivados a acumular competências em áreas fora do escopo tradicional exigido pelas características do setor sucroenergético.

No estudo são identificados três motores capazes de promover transformações no SPIS: mudança no perfil das empresas, o programa de financiamento a inovação PAISS e a crise de produtividade agrícola do setor. O resumo dos principais resultados encontrados pode ser verificado na Tabela 3. Os resultados mostram que esse conjunto de eventos tem a capacidade de alterar a matriz de incentivos dos agentes, melhorando os regimes de oportunidade, cumulatividade e apropriabilidade das inovações dentro do setor.

Tabela 3: Resumo dos motores de inovação identificados na transição do SPIS.

	Empresas	PAISS	Agrícola
Motivo da Mudança	Liberalização do setor causa uma consolidação das empresas atuantes	Falta de coordenação, falta de recursos e ausência de políticas para os biocombustíveis avançados	Redução do ritmo de ganhos de produtividade com a mecanização e expansão agrícola para a fronteira
Inovação	Empresas de diferentes perfis são atraídas para a atividade, buscando oportunidades de lucro e diversificação produtiva	Adoção do modelo de edital para cessão de créditos	Mudança geográfica dos centros de pesquisa para o Cerrado e desenvolvimento de novos projetos de máquinas adaptadas à lavoura canavieira
FSIs	FSI 2, 5, 7, 6, 1	FSI 4, 6, 8, 1	FSI 4, 2, 3, 6
Resultados	Empresas com maior porte financeiro e tecnológico ingressam no setor, dando legitimidade às empresas e dinamismo ao SPIS	Aumento do volume de crédito, atração de projetos de P&D, descentralização da pesquisa	Desenvolvimento de variedades mais adaptadas ao stress hídrico e solo da região. Criação de máquinas mais eficientes e com menor impacto sobre a compactação do solo

Fonte: VERGES (2013)

Diante de um cenário de mudança no SPIS sucroenergético – podendo ainda acrescentar outros motores, como o PAISS Agrícola – a análise sobre as oportunidades de inovação envolvendo agentes do SPIS torna-se ainda mais relevante. No próximo capítulo serão descritas as metodologias utilizadas para a escolha do grupo de oportunidades analisados, desenvolvimento das entrevistas com os especialistas, análise das oportunidades e, por fim, avaliação da comunicação entre os atores de diferentes áreas do setor.

3 METODOLOGIA

A principal fonte de informação para realização deste trabalho foi proveniente de entrevistas realizadas com especialistas de diferentes áreas do setor sucroenergético. A metodologia utilizada foi através de entrevistas focalizadas, também chamadas de semiestruturadas, que tiveram como objetivo identificar e analisar diferentes oportunidades de inovação no setor. As diferentes percepções entre especialistas das áreas de política, pesquisa e indústria também permitiram uma análise sobre a comunicação entre estes atores do sistema de inovação.

Nas próximas seções serão descritas as etapas da metodologia conforme apresentado na Figura 8.

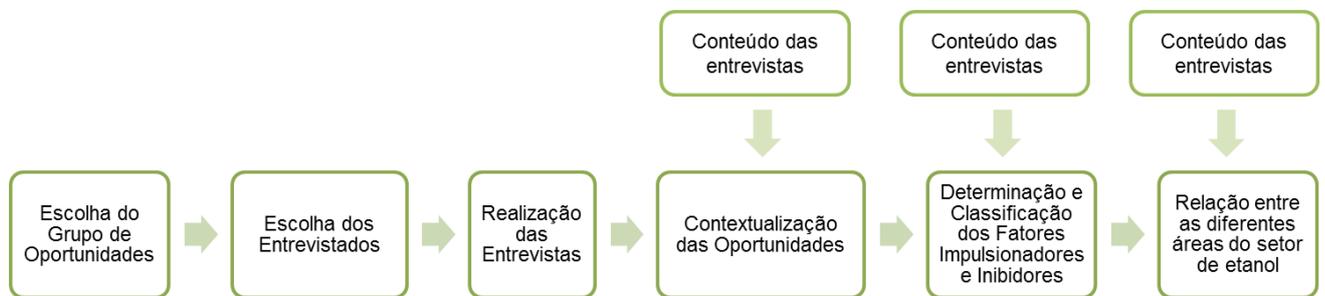


Figura 8: Etapas da metodologia.

3.1 Escolha dos grupos de oportunidades

Em toda a cadeia de produção do etanol aparecem oportunidades de inovação. Pode-se considerar desde o trabalho de melhoramento genético das variedades de cana até a logística de distribuição do produto final. Sendo assim, para determinar quais oportunidades de inovação seriam estudadas foram colocadas algumas fronteiras de análise.

Primeiramente foi decidido concentrar a análise na parte industrial do processamento da cana-de-açúcar. Essa decisão se deu principalmente pelas opiniões controversas sobre o potencial do processo de primeira geração. A vertente que defende o esgotamento das tecnologias sucroenergéticas se baseia no desempenho alcançado pelas usinas em séculos de desenvolvimento, que quase atingem o máximo teórico. Segundo Nogueira (2008) o aumento de produtividade industrial está limitado a apenas 4%. No entanto, as perspectivas relacionadas à utilização dos resíduos

agroindustriais aumenta consideravelmente o potencial inovador concentrado nas usinas.

Neste sentido, foram utilizados dois critérios para a escolha dos grupos de oportunidades: estarem relacionadas ao processo tradicional de produção de etanol (também chamado de primeira geração) e seus principais resíduos e estarem contempladas no Plano Conjunto BNDES - Finep de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico – PAISS.

O primeiro critério considerou o próprio processo de primeira geração e a destinação de seus dois principais resíduos: o bagaço, que em geral é destinado para o processo de cogeração de energia, e a vinhaça que é geralmente utilizada nos processos de fertirrigação.

O segundo critério levou em conta as linhas temáticas do PAISS. De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES, 2014), o PAISS é uma iniciativa conjunta do BNDES e da Finep de seleção de planos de negócios e fomento a projetos que contemplem o desenvolvimento, a produção e a comercialização de novas tecnologias industriais destinadas ao processamento da biomassa oriunda da cana-de-açúcar, com a finalidade de organizar a entrada de pedidos de apoio financeiro no âmbito das duas instituições e permitir uma maior coordenação das ações de fomento e melhor integração dos instrumentos de apoio financeiro disponíveis.

O PAISS, lançado em março de 2011, leva em consideração três linhas temáticas: Etanol de Segunda Geração, Novos Produtos da Cana-de-Açúcar e Gaseificação. A partir dos critérios mencionados, foram escolhidos seis grupos de oportunidades, como mostrado na Figura 9.



Figura 9: Oportunidades de inovação do setor sucroenergético.

3.2 Escolha dos Entrevistados

A escolha inicial dos entrevistados foi realizada por membros do grupo de pesquisa do setor de Gestão e Inovação Tecnológica do Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da EQ/UFRJ que tinham experiência em pesquisa no setor e contato com especialistas. Foi utilizada também a estrutura do SI desenvolvida no trabalho de Furtado *et al.* (2010), para sinalizar os agentes mais importantes do setor.

Em seguida, para aprimorar a seleção dos entrevistados, foi incorporada na metodologia das entrevistas uma pergunta sobre as pessoas que o entrevistado achava relevante ser incluída na lista de especialistas. Conforme um mesmo nome ia sendo repetido, dava-se uma prioridade para esta pessoa. A Figura 10 apresenta um esquema sobre como esse processo foi realizado.

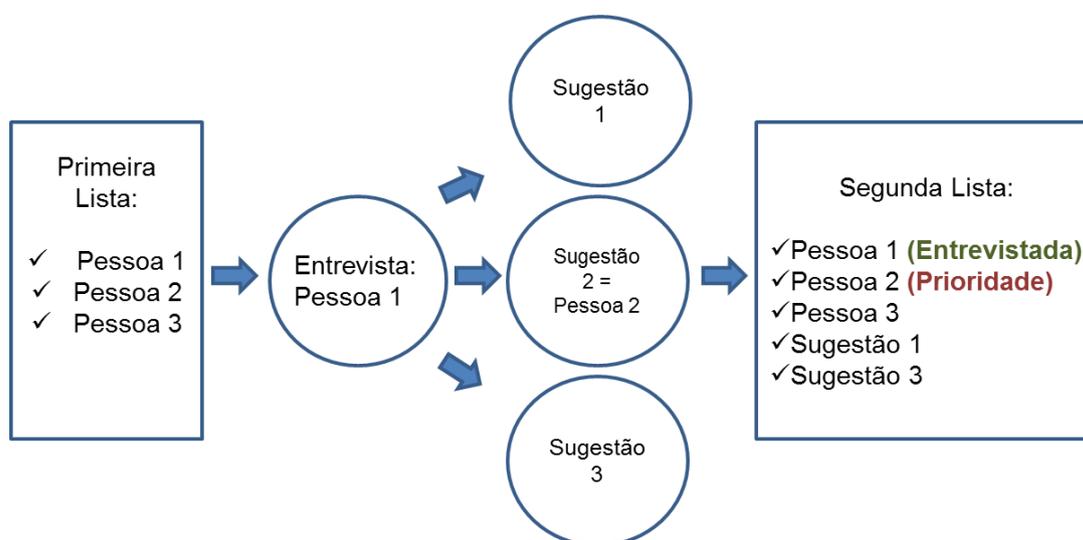


Figura 10: Esquema de construção da lista dos especialistas.

Essa metodologia resultou em 17 especialistas entrevistados. Os especialistas foram divididos em três áreas: política, pesquisa e indústria. Quando se buscou os especialistas da área da política, o foco foi voltado para profissionais de agências de apoio ao desenvolvimento e inovação, como BNDES e Finep. Os especialistas da pesquisa foram procurados principalmente em universidades públicas com grandes grupos de pesquisa envolvidos em estudar essas oportunidades de inovação e nos principais centros de pesquisa do setor como o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) e o Centro de Tecnologia Canavieira. Para os especialistas da indústria focaram-se principalmente nas maiores e mais inovadoras empresas do setor e de empresas fornecedoras de equipamentos.

Dentre os 17 entrevistados 3 foram da área de política, 7 da área de pesquisa e 7 da área de indústria. As posições dos especialistas dentro de suas respectivas instituições garantiram que as entrevistas fossem realizadas por profissionais diretamente envolvidos com as oportunidades discutidas.

Ao longo do texto os entrevistados serão citados como: entrevistado “*número*” da área de “*área*”, por exemplo, “entrevistado 1 da área de pesquisa”.

3.3 Realização das Entrevistas

De acordo com Gil (2008), a entrevista é uma técnica em que o investigador se apresenta frente ao investigado e lhe formulam perguntas com o objetivo de obtenção dos dados que interessam à investigação. O tipo de entrevista realizada neste estudo é classificada pelo autor como focalizada. Essa metodologia tem pouca estruturação, mas com determinados focos pré-estabelecidos. Neste caso os focos eram principalmente as oportunidades de inovação. A principal vantagem dessa metodologia é que o entrevistado tem ampla liberdade para expressar-se, o que leva à grande quantidade de informação (GIL, 2008; VERGARA, 1998).

A primeira parte para a realização da entrevista foi a etapa de comunicação com os entrevistados. O primeiro contato com o especialista ocorreu através de um e-mail constando o tema da pesquisa, o objetivo a ser atingido pela entrevista, os pesquisadores participantes e, por fim, a consulta sobre a disponibilidade da pessoa. Para os entrevistados no estado do Rio de Janeiro sugeria-se um encontro pessoalmente com o especialista, para os demais estados sugeria-se a realização da entrevista por videoconferência.

Antes do início da entrevista, foi pedida a permissão de todos os entrevistados para que se gravasse o conteúdo discutido. Esse arquivo de áudio foi armazenado e revisado.

A duração da entrevista foi determinada somente pelo tempo mínimo de 30 minutos. O tempo máximo não foi determinado uma vez que era interessante para o trabalho extrair o máximo de informação de cada entrevistado, de forma que a duração total da entrevista era principalmente função da disponibilidade do entrevistado. As entrevistas tiveram duração média de uma hora, sendo a mais rápida de 35 minutos e a mais longa de 2 horas e 22 minutos.

Como foi dito na seção anterior, ao final de cada entrevista foi perguntado ao entrevistado quais nomes de pessoas envolvidas com o setor poderiam ser interessantes para contribuir com a pesquisa. Essas respostas nos auxiliavam a aprimorar e até validar a seleção dos entrevistados.

No final das entrevistas também eram perguntados aos entrevistados referências de estudos que ajudassem com o esclarecimento dos tópicos abordados na discussão, o que contribuiu significativamente na elaboração da contextualização das oportunidades de inovação analisadas.

3.4 Determinação e classificação dos fatores impulsionadores e inibidores

Com a contextualização de cada uma das oportunidades e a opinião dos especialistas, foi possível identificar quais os principais fatores impulsionadores e inibidores de cada oportunidade de inovação. Detectados esses fatores, eles foram classificados em 6 categorias:

- **Custo:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com aumento/diminuição dos custos para uma empresa do setor;
- **Tecnológico:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com oportunidades/dificuldades tecnológicas, isto é, ainda existe, e se faz necessária, muita pesquisa em torno do tema;
- **Ambiental:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com questões ambientais;
- **Organizacional:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com características organizacionais ou até mesmo gerenciais das empresas do setor;
- **Político:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com medidas da esfera política;
- **Externo:** Se o fator (impulsionador ou inibidor) está relacionado com características externas ao setor, isto é, não pode ser controlado pelo setor, e não faz parte de nenhuma das categorias anteriores.

É importante salientar que muitos fatores podem conter características de mais de uma dessas categorias ao mesmo tempo. No entanto, a classificação foi feita levando em consideração a forma como o fator foi abordado pela maioria dos entrevistados. Então, por exemplo, um fator inibidor que poderia ser ao mesmo tempo classificado

como fator inibidor de custo ou tecnológico (no caso de uma tecnologia que é cara, mas ainda está em desenvolvimento), seria classificado como inibidor *tecnológico*, se os entrevistados tivessem abordado esse desafio focando nas dificuldades tecnológicas ainda em desenvolvimento. No entanto, se os entrevistados abordassem esse desafio focando no custo elevado que as empresas precisariam arcar, ele era classificado como fator inibidor de *custo*.

Essa metodologia simplifica as características desses fatores, mas foca no que os especialistas do setor acreditam ser a essência das principais barreiras ou estímulos para uma oportunidade de inovação.

Depois de classificados, esses fatores eram analisados de forma a compreender as origens dos principais desafios que impedem o pleno aproveitamento daquela oportunidade de inovação.

3.5 Relação entre as diferentes áreas do setor sucroenergético

Por fim, o trabalho buscou identificar o nível de comunicação entre as áreas de política, pesquisa e indústria do setor. Para isso, foi incluída na metodologia da entrevista uma pergunta sobre o relacionamento da área do entrevistado com as outras duas áreas do setor que estavam sendo estudadas. A resposta dos entrevistados incluía tanto exemplos de uma comunicação efetiva com as outras áreas, quanto desafios que dificultavam o estreitamento dessas conexões.

4 ANÁLISE SOBRE AS OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Este capítulo se dedicará a analisar as seis oportunidades de inovação destacadas na seção de metodologia: cogeração e venda da bioeletricidade da cana-de-açúcar, etanol de segunda geração, aproveitamento da vinhaça, oportunidades no processo de primeira geração, gaseificação e novos produtos.

Primeiramente serão apresentados os aspectos gerais de cada oportunidade, em seguida serão analisadas as opiniões dos especialistas do setor sobre as principais vantagens e desvantagens dessas oportunidades. Por fim, os fatores inibidores e impulsionadores serão analisados e categorizados.

4.1 Cogeração e Venda da Bioeletricidade da Cana-de-Açúcar

O setor sucroenergético se desenvolveu de forma a ser autossuficiente em energia. A disponibilidade de uma grande quantidade de resíduo de difícil armazenagem favoreceu a estrutura que se tem hoje de queima do bagaço para sustentar energeticamente a usina. No início do desenvolvimento do setor, o interesse dos empreendedores era ser autossuficiente em energia e eliminar o resíduo gerado da produção de açúcar e etanol. Essas características levaram o setor a se desenvolver energeticamente de maneira pouco eficiente, de forma a dar fim à grande quantidade de bagaço gerado (NYKO *et al.*, 2010).

A oportunidade de agregar a energia elétrica da cana, ou bioeletricidade, aos produtos das usinas, se apresenta como uma forma de aproveitar os recursos disponíveis que durante vários anos foram subutilizados, para gerar uma nova fonte de renda. Para entender melhor as oportunidades e os desafios associados à comercialização da bioeletricidade no Brasil, o sistema elétrico brasileiro e o sistema de leilão de energia serão brevemente analisados a seguir.

4.1.1 Sistema elétrico brasileiro e o sistema de leilão de energia

A matriz elétrica brasileira expandiu-se e consolidou-se ao longo do século XX com base na exploração de recursos hídricos através de empreendimentos focados na geração centralizada e na exploração da economia de escala (PINTO JÚNIOR *et al.*, 2007). Conforme relatado no Balanço Energético Nacional de 2014 (MME-EPE, 2014), a principal fonte de oferta interna de energia elétrica foi a hidráulica com participação

de 72,7% no ano de 2013, conforme apresentado na Figura 11. Essa participação pode ser ainda maior se todo o potencial dos reservatórios for utilizado, o que depende principalmente do perfil climático do ano. Em anos de afluições atípicas, como o ano de 2014, o sistema elétrico brasileiro recorre ao parque térmico, isto é, à utilização de usinas termoeletricas (UTE's) para suprir a necessidade do sistema.

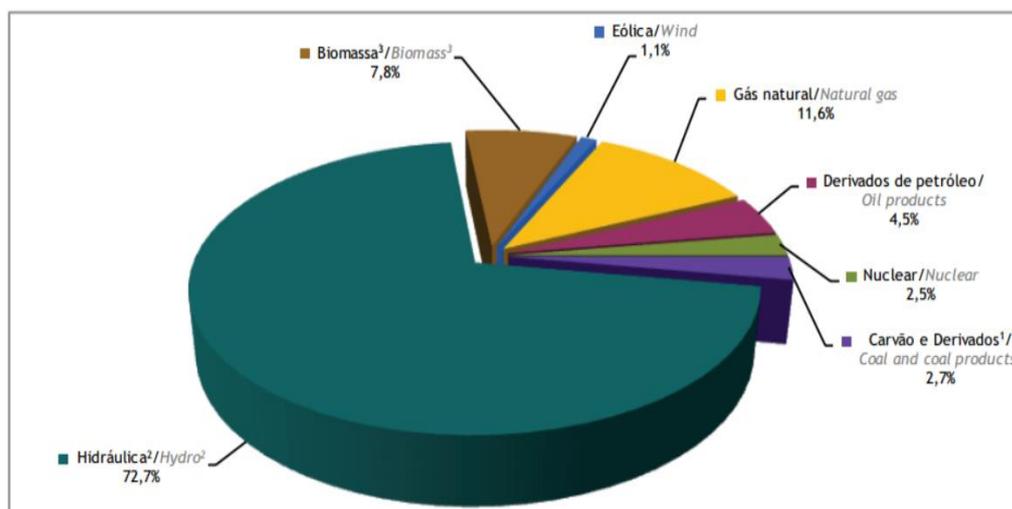


Figura 11: Oferta interna de energia elétrica por fonte. Fonte: MME/EPE (2014).

¹ Inclui gás de coqueria

² Inclui importação de eletricidade

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia, e outras recuperações

A utilização da hidroeletricidade requer planejamento da oferta energética, uma vez que este sistema possui uma sazonalidade de períodos úmidos e secos. Para ter controle sobre a oferta de energia, a expansão do parque hidroelétrico brasileiro ocorreu associada à construção de grandes reservatórios, cuja função era estocar água no período úmido para convertê-la em energia elétrica no período seco. No entanto essa estratégia não elimina a intermitência de períodos de alta e baixa oferta de energia, como pode ser visto na Figura 12, mantendo a necessidade de uma fonte alternativa de energia.

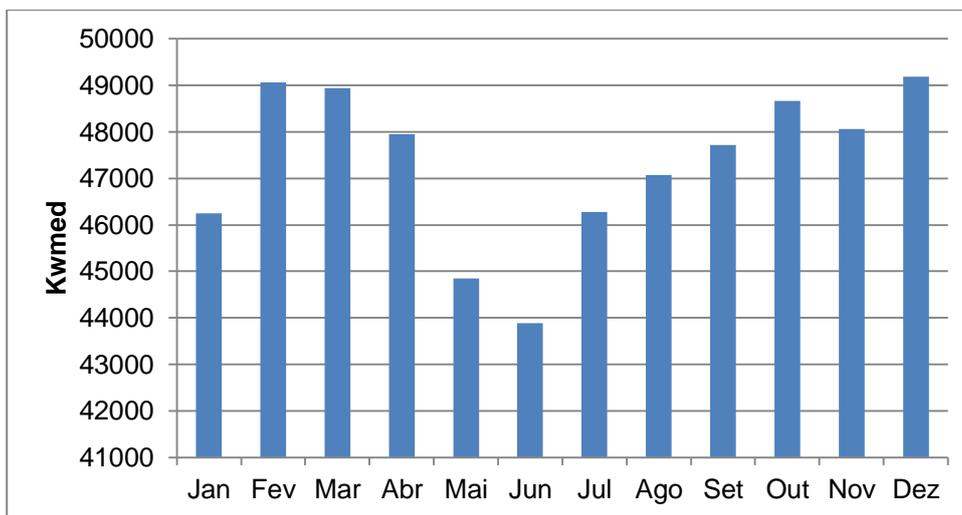


Figura 12: Média de produção de energia hidráulica ao longo do ano de 2013. Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ONS (2014a).

O parque térmico brasileiro pode ser dividido em dois tipos de usinas: térmicas inflexíveis e térmicas flexíveis (Castro *et al.*, 2010). As inflexíveis têm esse nome devido às suas características técnicas (cogeração, energia nuclear), visto que operam de forma contínua, funcionando como uma fonte regular de energia. Já as flexíveis, só são requisitadas a despachar para manter baixo o risco de desabastecimento conforme exigido pelo Operador do Sistema³.

A vantagem na construção de um parque de térmicas flexíveis está no fato do modelo de contratação permitir que só haja gastos com combustíveis fósseis quando for necessário para manter a segurança do abastecimento. No entanto, também apresenta duas grandes desvantagens, a incerteza do despacho na economicidade da geração térmica e o risco financeiro associado a um despacho prolongado de todo o bloco térmico em caso de uma situação hidrológica adversa (Castro *et al.*, 2010).

A oferta energética também sofre oscilação entre os anos, já que a incerteza associadas às condições climáticas do ano posterior não podem ser determinadas com precisão. Na Figura 13 é possível perceber a clara diferença da geração de energia hidráulica entre os anos de 2013 e 2014.

³ O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Fonte: ONS (2014b).

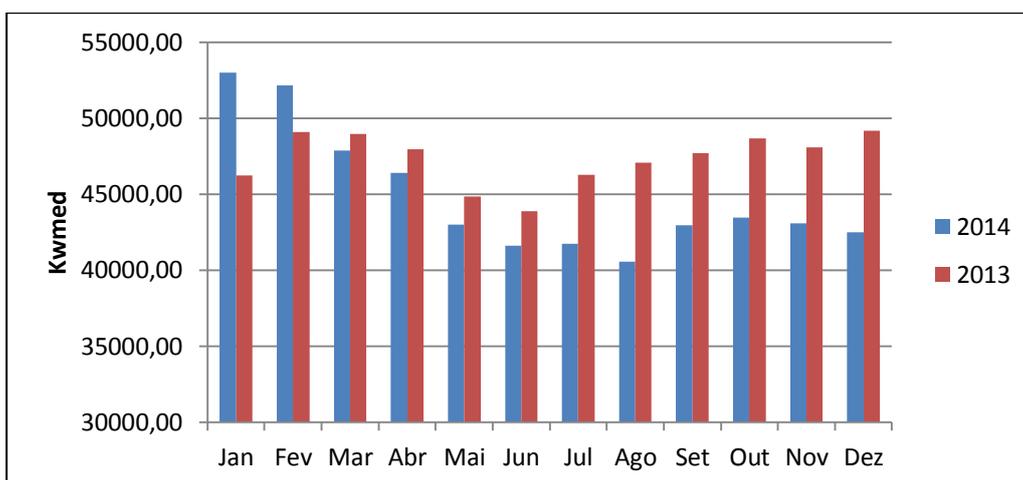


Figura 13: Comparação da produção de energia hidroelétrica entre os anos de 2013 e 2014. Fonte: ONS (2014a).

Para realizar a venda da energia elétrica existem dois ambientes de contratação: O Ambiente de Contratação Regulada (ACR), onde os agentes vendedores (geradores, comercializadores e autoprodutores) e as distribuidoras estabelecem Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) para atender a demanda de seus consumidores; e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), onde os geradores, consumidores livres, autoprodutores, comercializadores, importadores e exportadores de energia estabelecem entre si contratos bilaterais de compra e venda de energia com preços e quantidades livremente negociados (Dantas, 2013).

Para fazer a comercialização da energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) juntamente com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) organizam os leilões de energia. A ANEEL é responsável por definir as regras dos leilões enquanto que a CCEE é a condutora do leilão propriamente dito.

Com o objetivo de incentivar a diversificação da matriz de energia elétrica do país, foram criados os Leilões Especiais, dentre os quais se tem o Leilão de Fontes Alternativas (LFA), onde a contratação da energia é principalmente direcionada a vendedores e distribuidores de energia elétrica proveniente de biomassa e energia eólica (MME, 2014).

4.1.2 A venda da bioeletricidade da cana-de-açúcar

Uma motivação relacionada com a cogeração e a possibilidade de vender esse excedente de energia é o aumento da demanda anual de energia elétrica. Dados da EPE (2012) mostram que o consumo de eletricidade no país vai crescer 4,5% ao ano na próxima década. Dessa forma, a possibilidade de uma nova fonte de energia

elétrica num país onde sua principal fonte é limitada à expansão⁴, é de grande interesse de investimento. Soma-se ainda ao fato de ser uma energia de fonte renovável com potencial de atender uma demanda que atualmente é suprida por usinas térmicas, isto é, a geração de eletricidade a partir da biomassa da cana apresenta, em função da baixa utilização de insumos de origem fóssil em seu processo produtivo, uma emissão de GEE relativamente pequena.

A bioeletricidade da cogeração é uma fonte de geração distribuída, visto que é gerada junto ou próxima aos consumidores, possui portes relativamente pequenos e existe um número relativamente grande de unidades sucroenergéticas (Nyko *et al*, 2010). Além de ser distribuída, essa bioenergia é gerada próximo ao principal centro consumidor do país, a região Sudeste.

A bioeletricidade proveniente da cana-de-açúcar ainda apresenta uma periodicidade que complementa as oscilações do parque hídrico na região Centro-Sul, onde estão localizadas 70% da capacidade total dos reservatórios brasileiros. Essa complementaridade aumenta ainda mais o potencial da bioeletricidade como principal fonte complementadora da energia hidroelétrica no país, como mostrado na Figura 14.

No estudo realizado por Nyko *et al.* (2010), foi analisado que na safra de 2009/2010 foram gerados 5.870 GWh, ou o equivalente a uma potência de 670 MW médios, pelas usinas sucroenergéticas. No entanto, de acordo com estimativas da Associação da Indústria de Cogeração de Energia (Cogen), com a utilização de 75% do bagaço e 70% da palha seria possível gerar na safra de 2018/2019 (considerando que todas as usinas fossem dotadas de sistemas de cogeração com caldeiras acima de 60 bar) aproximadamente 30.000 MW de potência exportável, o que equivale a mais de duas vezes a potência da usina hidroelétrica de Itaipu.

⁴ De acordo com Nyko *et al* (2010) e Castro *et al* (2010) apesar de existir um potencial hídrico inexplorado no país superior a 150.000 MW, este está principalmente concentrado na região Norte, onde o relevo é predominantemente plano e exige a construção de reservatórios de armazenamento, empreendimentos que vem enfrentando cada vez mais limitações por parte dos órgãos ambientais.

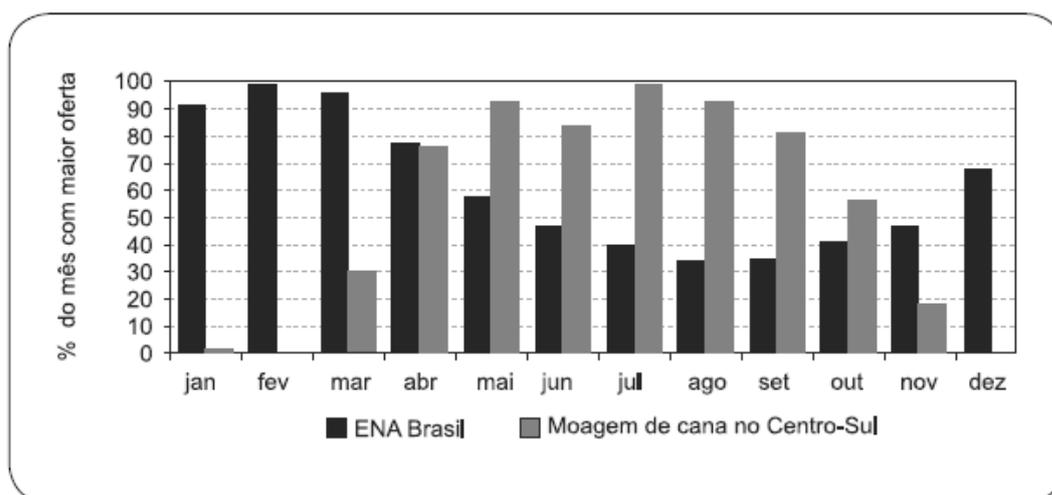


Figura 14: Complementaridade entre o parque hidroelétrico e a safra canavieira.
 Fonte: NYKO *et al.* (2010).

Apesar das condições e oportunidades que favorecem a cogeração a partir do bagaço e palha da cana-de-açúcar, ainda são poucas usinas que fazem uso dessa potencial fonte de receita. No Brasil, de acordo com dados da NOVACANA (2015) 159 usinas sucroalcooleiras comercializam a energia. Isso porque, apesar das oportunidades de se inserir no setor de energia elétrica, os desafios dessa transição são relativamente altos.

O primeiro obstáculo é a necessidade de modernização da planta. Como foi explicado no início da seção 4.1, o setor sucroenergético se desenvolveu propositalmente de forma ineficiente em termos energéticos, com o objetivo de consumir a maior quantidade de resíduos possível. Dessa forma, apesar do grande potencial energético contido no bagaço e palha da cana-de-açúcar, as usinas adquiriram ativos que não são capazes de explorar esse potencial. Para utilizar o excedente comercializável de energia, é necessário investimento em equipamentos como caldeira, turbina e gerador, remunerados exclusivamente com a receita da exportação de energia. Soma-se ainda que muitas dessas unidades não atingiram seu limite de vida útil, dificultando ainda mais a decisão. As condições de financiamento deste investimento também podem ser apontadas como um desafio (NYKO *et al.*, 2010).

A situação já é diferente quando se trata sobre projetos *greenfield*⁵ e de expansão de moagem da cana, onde a modernização desses equipamentos faz parte do

⁵ O termo *greenfield* se refere a novos projetos no setor.

investimento total do empreendimento, sendo remunerados também pelas receitas de açúcar e etanol.

Outro desafio se refere ao investimento no sistema de transferência da energia gerada da usina para a rede. Estes investimentos somam a elevação da tensão necessária para conexão ao sistema de transmissão e no percurso da distância entre a usina e a rede básica, visto que todo o custo recai sobre o grupo empreendedor (NYKO *et al.*, 2010).

A competição com a energia eólica também tem se mostrado um obstáculo para a maior inserção da energia da biomassa na matriz energética brasileira. No leilão A-3/2014 realizado em 6 de junho de 2014, foram contratados 968,6 MW, por meio de 22 empreendimentos de geração de energia elétrica. Desses, 21 correspondem a parques eólicos com a participação de 550,6 MW, ou seja, 56% da energia comercializada. Não houve nesse leilão empreendimentos do setor sucroenergético contratados devido ao preço estabelecido no leilão, no valor médio de R\$ 126,18 por MW. O vigésimo segundo empreendimento corresponde à hidroelétrica de Santo Antônio, em Rondônia com 418 MW comercializados (EPE, 2014).

Outro possível obstáculo é a competição do uso do bagaço e da palha para a produção de etanol de segunda geração. Atualmente, o etanol de segunda geração ainda não está estabelecido no mercado, mas vale uma reflexão sobre quais dos processos apresentam maiores ganhos ao empreendedor. Trabalhos têm mostrado que a cogeração apresentaria um retorno maior ao empreendedor do que a venda do etanol lignocelulósico (SEABRA & MACEDO, 2010; FURLAN *et al.*, 2013). No entanto essa conclusão é muito questionada uma vez que estes estudos comparam tecnologias em níveis de desenvolvimento totalmente diferentes, o que inclusive é mencionado em muitos dos trabalhos (SEABRA & MACEDO, 2010; FURLAN *et al.*, 2013; DANTAS, 2013).

Uma solução para esse obstáculo estaria na queima de produtos não aproveitados na produção do etanol celulósico para a comercialização da bioenergia, como o caso da lignina e da celulose que não reagiu, materiais que aparecem como resíduos nos principais processos de produção de etanol de segunda geração (DIAS *et al.*, 2013).

Tendo analisado o ambiente no qual surge a oportunidade de comercializar a bioeletricidade, a próxima seção fará uma análise sobre as opiniões dos entrevistados

sobre os principais fatores que impulsionam ou inibem essa fonte alternativa de energia.

4.1.3 Opinião dos especialistas sobre a cogeração e a venda da bioeletricidade

Os especialistas do ambiente político apresentaram pouco entusiasmo à possibilidade de complementariedade da matriz energética brasileira com bioeletricidade de cana de forma expandida entre as usinas brasileiras, não por não reconhecerem o potencial, muito ao contrário, como mostrado pelo trabalho de Nyko *et al.* (2010), existe um interesse por parte do governo de implementar essa nova matriz energética. No entanto, como foi discutido na seção anterior e enfatizado nas entrevistas, o investimento em modernização das plantas, instalação de transmissão, mudança na tensão e os baixos preços da energia são desafios demasiadamente grandes para a maior parte dos grupos do setor, principalmente pela incerteza do retorno desse investimento.

O especialista 1 da área de política deixa claro que existem características nos leilões - como a forma como são controladas as entregas de energia elétrica proveniente da biomassa à rede - que são fortes fatores inibidores para o amplo aproveitamento dessa oportunidade.

O leilão sequer leva em consideração a questão de transmissão, porque colocar uma usina eólica em Jericoacoara (CE) e despachar essa energia para São Paulo é tratado da mesma forma que usar bagaço de cana em Ribeirão Preto (SP). Então, se ao menos houvesse uma separação regional no Brasil, dividindo o volume em áreas regionais, para aproximar geração e consumo, você pelo menos minimizaria ou sequer precisaria investir em transmissão. Mas isso não é incorporado nos leilões. Nem a questão de tarifa para quem gerar próximo ao consumidor. Hoje o preço é focado só na geração e ignora a transmissão.

O especialista 2 da área de política também destaca esses problemas e acrescenta que a dificuldade de aproveitar essa oportunidade em geral não parte da geração de energia e sim dos problemas relacionados a sua venda, abordando a questão de existirem usinas com condições tecnológicas para vender essa energia e, por conta da competição com a energia eólica, não vendem.

Por conta dessa dificuldade, tem usina onde sobra bagaço, tem potencial, e não consegue vender energia.

O especialista 1 da área de política enfatiza que o esforço necessário para preparar uma usina para comercializar essa energia excedente é muito grande, uma vez que todo o setor se desenvolveu de forma a não sobrar resíduos, e que a mudança deve ocorrer em várias partes do processo:

Não é só a caldeira que é ineficiente, todo o sistema se desenvolveu ineficiente já que não era para sobrar bagaço. Se você trocar a caldeira, você reduz um problema da eficiência. Então, tem bagaço [para gerar uma grande quantidade de energia], mas desde que se mude o perfil da usina para que se tenha o padrão de energia adequado.

Os especialistas da área da indústria também reconheceram as dificuldades relacionadas aos leilões de energia, apontando até mesmo uma participação do setor em tentar reverter a situação, como foi dito pelo especialista 5 da área da indústria:

As políticas públicas dificultam a venda [da energia]. Existe uma solicitação para fazer separado [das outras fontes renováveis como a eólica], mas encontra-se muita dificuldade de mudar essa questão com eles.

Os especialistas da área de indústria também enfatizaram ainda mais a importância de um sistema de leilão adequado através das desvantagens existentes na venda da energia pelo mercado *spot*, que não seria seguro o suficiente para justificar um investimento. De acordo com a especialista 1 da área de indústria:

Não tem como planejar pensando nesse mercado *spot*, tem que planejar pensando num preço de contrato onde você tem garantia de poder ter um projeto atraente e, claro, aproveitar as oportunidades do mercado *spot* para melhorar a remuneração.

O especialista 2 da área de indústria mostrou uma opinião parecida:

Os preços de energia delas (das usinas de cana-de-açúcar) no mercado *spot* no passado eram baixos e não mudou muito. Então para pagar um investimento de cogeração, o natural é elas irem no leilão e venderem essa energia.

No entanto, apesar do reconhecimento dessas dificuldades os especialistas da área da indústria se mostraram mais otimistas em relação ao aproveitamento dessa oportunidade no longo prazo comparativamente aos da área de política, como deixou claro o especialista 1 da área da indústria:

Acho que é uma evolução natural das usinas, que no futuro todas elas vão comprar caldeiras de alta pressão e exportar essa energia sim!

Os especialistas da área de pesquisa foram os que se posicionaram de forma mais otimista. Apesar de concordarem com os desafios dos investimentos, tiveram uma opinião semelhante à mostrada anteriormente pelo especialista 1 da indústria, onde esse aproveitamento vai ser uma evolução natural das usinas no futuro.

Sob o ponto de vista da competição com o etanol de segunda geração, esses especialistas foram enfáticos em destacar o papel da lignina como substituto na queima do bagaço. Seguem os comentários dos especialistas 1 e 2 da área de pesquisa, respectivamente:

[Muitas pessoas do setor] não tem noção da importância dessas valiosas moléculas (...). Por que vai pegar açúcares e queimar? Por que eu não queimo a lignina? Na indústria de celulose e papel, tem empresa que se autossustenta energeticamente queimando lignina. O potencial calorífero da lignina é maior que o do bagaço e eu também posso queimar a palha no lugar do bagaço. A lignina atrapalha minha fermentação, e eu tenho que tirá-la.

Algumas pessoas pensam assim, ou o bagaço serve para a queima ou o bagaço serve para etanol 2G. Quando você pega a biomassa e remove aqueles polissacarídeos, você fica com a lignina, que tem um potencial calorífico específico 3 vezes superior ao bagaço. Então quando você queima bagaço você está queimando lignina. Então o etanol 2G não retira o bagaço da cogeração.

Em relação a projetos *greenfield*, a sintonia entre as três áreas pareceu ser mais consistente, pois todas concordaram que o setor enxerga e aproveita a oportunidade de vender a energia da cogeração. A possibilidade de adicionar um produto na receita da usina estimula os investimentos em equipamentos mais eficientes, eliminando o desafio de promover a troca de equipamento dentro do prazo de vida útil.

O fato do setor não ter experiência na comercialização de energia não foi entendido como um obstáculo para o aproveitamento dessa oportunidade. Essa conclusão está em coerência com a encontrada pelo trabalho desenvolvido por Nyko *et al.* (2010).

4.1.4 Fatores impulsionadores e inibidores para a cogeração e venda da bioeletricidade

Com base nas características descritas nas seções anteriores sobre a bioeletricidade da cana-de-açúcar e, principalmente, nas opiniões que foram levantadas nas entrevistas com os especialistas, foi possível resumir na Tabela 4 os fatores que mais influenciam para impulsionar ou inibir o aproveitamento dessa oportunidade.

Como foi descrito na seção de metodologia, cada um desses fatores foi classificado como: custo, externo, ambiental, político, organizacional e tecnológico. Vale lembrar que esta classificação simplifica esses fatores de forma a auxiliar no estudo da oportunidade de inovação. Alguns desses aspectos levantados poderiam receber mais de uma classificação, no entanto, a escolha da categoria foi baseada na forma como os tópicos foram abordados pelos entrevistados.

Tabela 4: Fatores Impulsionadores e Fatores Inibidores para a Cogeração e Venda da Bioeletricidade.

Fatores Impulsionadores	Categoria	Fatores Inibidores	Categoria
Oferta de Biomassa	Custo	Investimentos em equipamentos mais eficientes.	Custo
Aumento da demanda energética no país.	Externo	Investimento na conexão à rede	Custo
Irregularidades do sistema de hidroelétricas	Externo	Preços controlados que competem com a energia eólica	Político
Complementaridade das sazonalidades	Externo	Competição com o etanol de segunda geração.	Organizacional
Fonte Renovável	Ambiental		
Desvantagens das usinas termoeletricas flexíveis.	Externo		
Produção de forma distribuída e próxima aos centros consumidores (região centro-sul)	Externo		

Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Aumento a receita do setor sucroenergético	Custo			

A Figura 15 e a Figura 16 mostram como esses fatores se distribuem entre as categorias. Na Figura 15 observa-se que os fatores impulsionadores são principalmente de caráter externo, de custo e ambiental. Os fatores externos são importantes uma vez que são forças de fora do setor que o impulsiona na direção da inovação. O aumento da demanda por eletricidade, a irregularidade do sistema de hidroelétrica, as dificuldades associadas às termoelétricas flexíveis e a possibilidade de produzir energia próxima ao principal centro consumidor do país, são fatores que não dependem de ações do setor sucroenergético e que, no entanto, o direcionam a possibilidade de inovar.

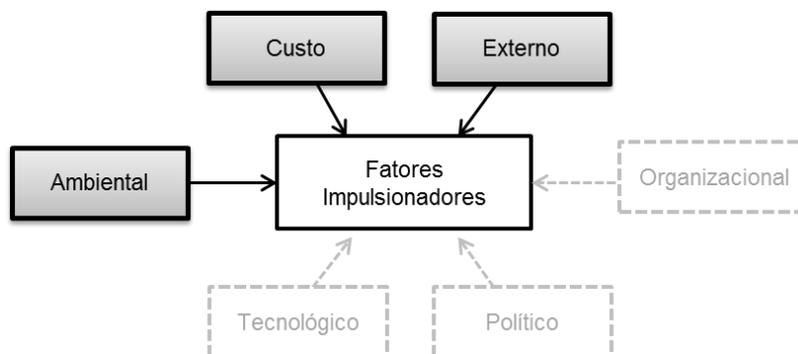


Figura 15: Classificação dos fatores impulsionadores para a cogeração e venda da bioeletricidade.

Um dos conceitos mais utilizados de desenvolvimento sustentável foi definido pelo Relatório Brundtland (1987) como “o desenvolvimento deve atender as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazerem as suas próprias necessidades”. Dessa forma, os fatores impulsionadores relacionados a custo e ambiente tornam essa oportunidade um escolha coerente com o conceito de desenvolvimento sustentável uma vez que facilitam o desenvolvimento por um negócio rentável e que não compromete o meio ambiente.

Esse conjunto de características a princípio torna a venda da bioeletricidade aparentemente interessante, no entanto, para uma análise mais completa é necessário também avaliar os fatores inibidores dessa tecnologia.

A Figura 16 mostra os resultados referentes à categorização dos fatores inibidores para a cogeração e venda da bioeletricidade. Observa-se que os fatores são de custo,

organizacional e político. A questão política se refere ao formato do sistema de leilões de energia, um fator que é difícil de ser modificado por ações das empresas do setor, portanto, a princípio, não é algo que possa ser revertido por elas.

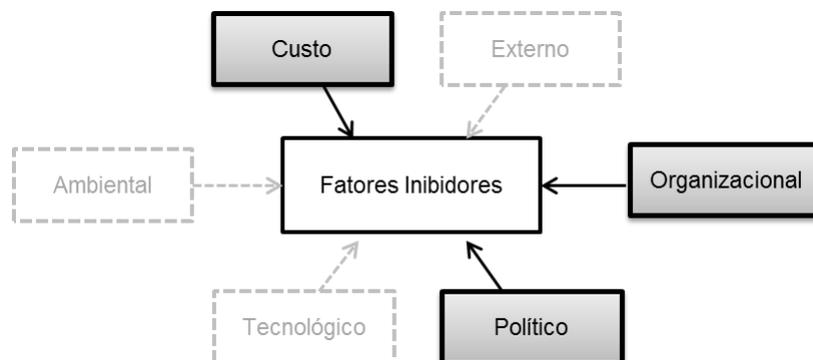


Figura 16: Distribuição das categorias dos fatores inibidores a cogeração e venda da bioeletricidade.

O aspecto organizacional se refere a uma dificuldade estratégica de lidar com a biomassa como matéria-prima que pode ser para eletricidade ou para etanol. Neste ponto, tem-se a discussão sobre uma possível flexibilidade da usina em decidir se o bagaço é direcionado para a cogeração ou para a produção do etanol de segunda geração. Neste contexto soma-se ainda a possibilidade de utilização da lignina como substituta do bagaço para a queima, mesmo que em menor quantidade.

E por fim tem-se o fator de custo, que aparece tanto como fator inibidor quanto impulsionador, então o que prevalece é se o investimento na cogeração vai ser vantajoso ou não, e isso remete novamente à característica política associada aos leilões, que seria onde as empresas do setor poderiam adquirir alguma segurança para o investimento. Em resumo, o investimento para otimizar energeticamente uma planta de forma que haja energia excedente suficiente para ser comercializada, depende imensamente dos leilões de energia organizados pelo governo. Essa dificuldade, que não é controlada pelo setor, é suficiente para superar os fatores impulsionadores e impedir que essa oportunidade seja aproveitada por muitas empresas.

Em resumo, o fator decisivo encontrado neste estudo para a ampla comercialização da bioeletricidade da cana-de-açúcar é a segurança para realização dos investimentos, que está relacionada principalmente com o formato dos leilões de energia.

4.2 Etanol de segunda geração

A grande demanda por novas fontes de energia limpa está entre as principais motivações para a utilização de resíduos lignocelulósicos como matéria-prima. Como foi visto na seção anterior, a combustão do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para a geração de energia, é uma dessas utilizações. Outra opção, que tem sido tópico de debate em todo o mundo, é a utilização de resíduos agrícolas para a produção os combustíveis de segunda geração. No caso específico da indústria de etanol, o bagaço e a palha da cana se apresentam como materiais lignocelulósicos de interesse para a produção de etanol de segunda geração (2G), também chamado de etanol lignocelulósico.

Esforços e recursos substanciais têm sido empregados no desenvolvimento de tecnologias de produção de etanol de segunda geração em todo o mundo, a fim de alcançar uma produção sustentável de biocombustíveis, sem comprometer a segurança alimentar. Um dos principais desafios é a necessidade de extrair do material lignocelulósico os açúcares fermentáveis (DANTAS, 2013).

Diante dos elevados níveis de emissão de GEE em todo o mundo, o aumento da produção de biocombustíveis é um assunto de discussão frequente. De acordo com dados do IEA (2011), a utilização de biocombustíveis para transporte representa apenas 2% do total consumido no mundo. No entanto, com esforços conjuntos do G8⁶, o IEA vislumbra um aumento de 27% até 2050.

Uma das principais vantagens do etanol de segunda geração é o aumento da produção do biocombustível sem o aumento da área plantada. Estima-se um aumento em torno de 50-60% de produção, demandando menor ocupação do solo. Soccol *et al.* (2010) avaliam a produtividade do etanol em 6.000L/hectare plantado e afirmam que com a utilização de 50% do bagaço gerado, essa produtividade pode aumentar para 10.000L/hectare. Soma-se ainda o fato do etanol produzido a partir de materiais lignocelulósicos apresentar pequenas emissões de CO₂ e não competir com a produção de alimentos (NAIK *et al.*, 2009).

A disponibilidade de biomassa é uma das grandes oportunidades do setor de etanol. De acordo com Canilha *et al.*, (2012) cada tonelada de cana processada gera

⁶ G8 corresponde aos EUA, Japão, Alemanha, Canadá, França, Itália, Reino Unido e Rússia.

aproximadamente 270-280kg de bagaço e 140 kg de palha que estão, a princípio⁷, disponíveis para a produção do etanol 2G. No caso do bagaço a oportunidade é clara uma vez que essa matéria-prima fica disponível na usina e pode ser facilmente utilizada para a produção do biocombustível.

Outra vantagem em relação ao bagaço é que este já está incluído na compra da cana, o que não ocorre, por exemplo, para o etanol produzido do milho. No entanto, quando se considera a utilização da palha e pontas da cana-de-açúcar a situação já é diferente uma vez que ainda existem grandes desafios relacionados à coleta e transporte desse material (FURLAN *et al.*, 2013).

Soma-se ainda a necessidade do período de entressafra, onde a usina não produz açúcar ou etanol. Entretanto esta dispõe de utilidades e equipamentos que podem ser utilizados na produção do etanol lignocelulósico. Apesar dessa oportunidade, a inserção de uma planta de etanol 2G numa já existente de etanol 1G não é algo simples, não só pela adaptação necessária, mas também pela decisão da aplicação do material lignocelulósico. Como mencionado anteriormente, as usinas utilizam a combustão do bagaço para gerar energia para o processo, uma tomada de decisão simples uma vez que o bagaço estava disponível. Abre-se espaço então para o questionamento sobre a melhor forma de conduzir essa inserção e como lidar com a escolha entre a venda da bioeletricidade e a produção do etanol 2G. Diversos autores têm dedicado seus estudos de forma a gerar mais informações e ajudar nessa escolha (FURLAN *et al.*, 2013; DIAS *et al.*, 2013; SEABRA & MACEDO, 2010; DANTAS, 2013).

Os grandes desafios associados ao etanol de segunda geração estão relacionados principalmente à inserção das etapas de pré-tratamento, hidrólise e fermentação da corrente C5 (pentoses). A primeira é principalmente para remoção da lignina, a segunda promove a quebra da celulose e hemicelulose (que pode ter ocorrido na etapa anterior, dependendo do pré-tratamento) em açúcares fermentáveis. A terceira se refere à fermentação (em conjunto ou separado da corrente de C6) da corrente C5, açúcares que no processo tradicional de etanol, não são fermentadas. Além dessas

⁷ Existe um custo de oportunidade associado ao bagaço uma vez que hoje ele é utilizado na cogeração. Sabe-se também que parte da palha produzida deve ser deixada no campo para promover uma proteção ao solo (Furlan *et al.*, 2013).

três etapas principais há outras como: a redução do tamanho do material lignocelulósico (dependendo do pré-tratamento), a remoção da lignina, produção das enzimas, entre outras (DANTAS, 2013; DIAS *et al.*, 2013).

Outro obstáculo para a produção do etanol 2G, devido principalmente à inserção dessas novas etapas, é a definição do processo produtivo. A diversidade de métodos de pré-tratamento, hidrólise e fermentação é bem ampla. A Figura 17 ilustra as etapas para a produção do etanol de segunda geração através da hidrólise enzimática.

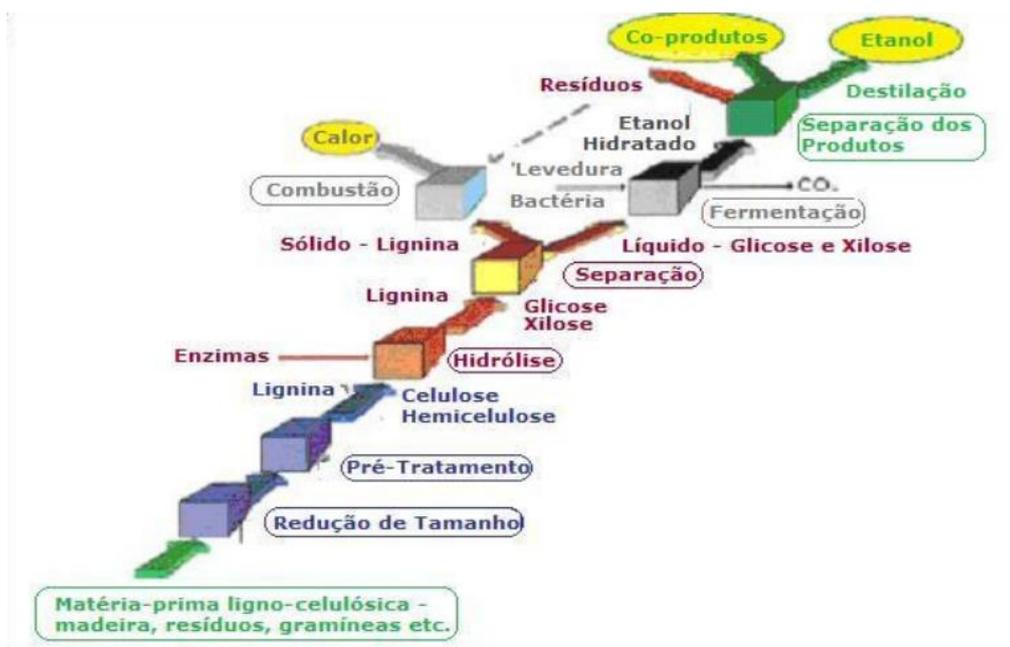


Figura 17: Etapas de produção do etanol de segunda geração via hidrólise enzimática. Fonte: Dantas (2013).

De acordo com Dantas (2013), o processo de produção do etanol lignocelulósico torna-se complexo por conta de três razões:

- A necessidade de pré-tratamento para a remoção da lignina;
- O fato de as enzimas convencionais não serem capazes de hidrolisar a celulose;
- A grande dificuldade de fermentar as pentoses oriundas da hidrólise da hemicelulose.

Por conta dos desafios associados às etapas do processo de etanol 2G, as seções seguintes discutirão brevemente às principais dificuldades em cada parte do processo.

4.2.1 Desafios dos pré-tratamentos

Um dos principais tópicos de pesquisa do etanol de segunda geração é a escolha do pré-tratamento. O objetivo do pré-tratamento é desorganizar o complexo lignocelulósico removendo a proteção de lignina e liberando a celulose e hemicelulose. Alguns pré-tratamentos também podem incluir a hidrólise da hemicelulose em açúcares fermentáveis, principalmente a xilose (CANILHA *et al.*, 2012).

Canilha *et al.* (2012) e Dantas (2013) destacam algumas características que um pré-tratamento ideal devem possuir:

- Aumentar a área de superfície acessível e descristalizar a celulose;
- Solubilizar hemicelulose e/ou lignina;
- Facilitar a recuperação da lignina para posterior combustão;
- Minimizar a produção de agentes que atuam como inibidores das fases seguintes do processo produtivo;
- Minimizar as perdas de açúcares;
- Minimizar o capital e custos de operação;
- Ser favorável ambientalmente.

A utilização de um pré-tratamento adequado influencia diretamente na produtividade de etanol. De acordo com Hamelinck *et al.* (2005), uma hidrólise sem ser precedida de pré-tratamento apresenta rendimento inferior a 20%, enquanto quando utilizado um pré-tratamento adequado esse parâmetro assume valores acima de 90%.

Os pré-tratamentos podem ser divididos em quatro tipos: físicos (ou mecânicos), físico-químicos, químicos e biológicos. Os pré-tratamentos físicos funcionam de forma a aumentar a área de superfície através da redução do tamanho das partículas de bagaço e palha, são eles: a moagem e a utilização das micro-ondas. Os pré-tratamentos do tipo físico-químicos geralmente precisam de elevado controle das condições de operação uma vez que utilizam elevadas temperaturas e pressões, são exemplos: a explosão de vapor, o *Ammonia Fiber Explosion* - AFEX, Explosão de CO₂ e o LHW - *Liquid Hot Water*. Os métodos químicos geralmente removem a lignina e/ou degradam a hemicelulose, são exemplos: o ácido diluído, o ácido concentrado e o alcalino. Por fim, os métodos biológicos também removem a lignina, no entanto, demandam mais tempo e estão associados a perdas de uma quantidade considerável de carboidratos (CANILHA *et al.*, 2012).

No estudo de revisão realizado por Canilha *et al.* (2012) foram analisado os principais pré-tratamentos que têm sido pesquisados. Juntamente com os estudos de Seabra (2008), Hamelinck *et al.* (2005) e da Agência Internacional de Energia (IEA, 2008) foi possível construir a tabela que consta no Anexo 1.

O grande número de possibilidades de pré-tratamentos e a grande quantidade de características que devem ser consideradas, tornam a escolha do pré-tratamento um verdadeiro desafio tecnológico para a comercialização do etanol de segunda geração.

4.2.2 *Desafios da hidrólise*

Uma vez que se tem o material pré-tratado, isto é, separa-se a matriz de lignina e reduz-se a cristalinidade da celulose, parte-se para a etapa de hidrólise, a qual tem o objetivo de quebrar a celulose em açúcares fermentáveis.

O termo “hidrólise” é utilizado para definir uma reação química espontânea de quebra de ligações pela água. No caso da celulose, a hidrólise ocorre espontaneamente simplesmente pela adição de água, no entanto essa reação ocorre de maneira extremamente lenta. Dessa forma, a utilização de ácidos ou celulases catalisa a reação da água com moléculas glucanas liberando mono, di e/ou trissacarídeos (OGEDA & PETRI, 2010).

Existem dois tipos de hidrólise que mais têm sido citados para a produção do etanol 2G, a hidrólise ácida e a hidrólise enzimática. No entanto, para ambas, existem várias opções de operação, sendo assim, a escolha deve ser baseada em algumas considerações, tais como: a matéria-prima a ser utilizada, o organismo utilizado para a fermentação, custo do processo e impactos ambientais (OGEDA & PETRI, 2010).

A hidrólise ácida pode ser realizada para a obtenção de hexoses de forma direta ou como pré-tratamento, o que acarreta na necessidade de uma posterior hidrólise enzimática. Esta rota pode ocorrer de forma concentrada ou diluída, sendo a hidrólise com ácido diluído a tecnologia mais antiga de conversão de biomassa em etanol. No processo com ácido concentrado são utilizadas baixas temperaturas (cerca de 30°C) e resulta em rendimentos altos tanto de hexoses quanto de pentoses (85-90% da teoria), causando apenas uma limitada quantidade de produtos de degradação de açúcares (OGEDA & PETRI, 2010).

As rotas utilizando ácidos, apesar de apresentar um bom rendimento, geram problemas principalmente relacionados à corrosão e recuperação eficiente dos ácidos

(processo que demanda energia e é caro). Além disso, produtos de degradação, como fragmentos de furfural e lignina, e compostos de biomassa solubilizada, como ácido acético, devem ser removidos por serem inibitórios para fermentação microbiana (DANTAS, 2013; OGEDA & PETRI, 2010).

A hidrólise enzimática se apresenta como uma boa alternativa à hidrólise ácida uma vez que promove a degradação da celulose em açúcares em condições brandas (pH entre 4,8-5 e temperatura entre 45-50°C), não apresenta problemas de corrosão e resulta em baixa formação de sub-produtos inibidores e altos rendimentos de açúcares (CANILHA *et al.*, 2012). No entanto, além de depender de controle rígido sobre as condições de otimização para a obtenção da eficiência máxima (temperatura de hidrólise, tempo, pH, carregamento de enzima e concentração de substrato) a hidrólise enzimática ainda sofre de inibição pelo produto final. Uma alternativa para contornar esse problema, e simultaneamente reduzir o tempo, é a realização combinada da sacarificação e da fermentação chamada de SSF (*Simultaneous Saccharification and Fermentation*) ou SSCF (*simultaneous saccharification and cofermentation*) (CANILHA *et al.*, 2012).

Segundo Hamelinck *et al.* (2005), a celulase pode ser comprada de um fornecedor ou fabricada na própria planta em um outro reator. Contudo, o autor vislumbra que no longo prazo estas enzimas poderão ser produzidas no mesmo reator em que ocorre a hidrólise e a fermentação.

As principais preocupações do tratamento de materiais lignocelulósicos estão relacionadas a minimizar a degradação do açúcar e, subsequentemente, minimizar a formação de compostos inibidores de metabolismo microbiano, limitar o consumo de produtos químicos, de energia e de água, e à geração de resíduos. De acordo com Palmqvist & Hahn-Hägerdal (2000) os compostos inibidores podem ser divididos em quatro grupos:

- Substâncias liberadas da estrutura da hemicelulose como o ácido acético;
- Compostos fenólicos e aromáticos derivados da quebra parcial da lignina;
- Derivados de furanos, furfural, e 5-hidroximetilfurfural originados da degradação de pentoses e hexoses;
- Metais como cromo, cobre, ferro e níquel proveniente dos equipamentos.

Vários métodos têm sido investigados para remoção desses compostos inibidores, tais como: evaporação, neutralização, utilização de membranas, utilização de resinas de troca iônica e carvão ativado (CANILHA *et al.*, 2012).

4.2.3 Desafios da Fermentação

A fermentação é o processo biológico no qual frações de açúcares são convertidas em etanol e CO₂. Na produção de etanol a partir do caldo de cana-de-açúcar o micro-organismo utilizado para esse processo são as leveduras, mais especificamente a *Saccharomyces cerevisiae*. Elas possuem alta resistência ao etanol, consomem quantidades significativas de substrato em condições adversas, e apresentam uma elevada resistência a inibidores presentes no meio (CANILHA *et al.*, 2012).

A etapa de fermentação já faz parte da rotina de produção do etanol de primeira geração, sendo fermentadas as glicoses e sacaroses. No entanto, para que a produção de etanol 2G seja mais facilmente viabilizada, faz-se necessário a conversão de todas as frações de açúcares, incluindo as pentoses no processo de fermentação. O desafio está no metabolismo das xiloses pela *Saccharomyces cerevisiae* devido à ausência de genes necessários para a assimilação dessa molécula (HECTOR *et al.*, 2011).

Entretanto, os desafios relacionados à fermentação não se limitam à metabolização das pentoses. Existe ainda um desafio relacionado às concepções tecnológicas de como se darão essas etapas. Quatro concepções têm sido discutidas, a primeira é a *separate* (ou *sequential*) *hydrolysis and fermentation* (SHF), isto é, hidrólise e fermentação separadas (ou em sequência), nesta concepção todas as etapas dos processos são separadas: pré-tratamento, produção de celulases, hidrólise da celulose, fermentação da glicose, fermentação das xiloses e destilação. Uma segunda concepção vislumbra a hidrólise ocorrendo juntamente com a fermentação, que pode ser só da glicose (*simultaneous saccharification and fermentation* – SSF) ou da glicose e xilose (*simultaneous saccharification and cofermentation* - SSCF). Existe ainda uma concepção mais inovadora da possibilidade de se incluir a produção das celulases juntamente com as outras etapas chamada *Consolidated Bio Processing* - CBP (HAMELINCK *et al.*, 2005).

Apesar dos desafios citados, o potencial do etanol 2G pode ser verificado pela movimentação tanto de empresas novas no setor, como a GranBio, quanto pelos investimentos das empresas já estabelecidas no setor, como Raízen e Petrobras.

A GranBio é uma empresa brasileira de biotecnologia criada em 2011 que integra tecnologias próprias e de parceiros para atuar em todas as etapas da produção do etanol 2G, partindo do desenvolvimento de uma matéria-prima específica até a comercialização do produto final. A planta Bioflex 1, única em operação no momento, pretende atingir em 2015 a produção de 82 milhões de litros de etanol por ano (GRANBIO, 2014; NOVACANA, 2014).

A Raízen e a Petrobras são empresas já atuantes no setor de etanol que pretendem expandir sua produção utilizando a tecnologia do etanol 2G. No final de 2013, a Raízen deu início à construção de sua primeira planta industrial para a produção do biocombustível em escala comercial, localizada na unidade Costa Pinto, em Piracicaba (SP), sua operação está prevista para o final do ano-safra 2014/2015 (RAÍZEN, 2014).

4.2.4 Opinião dos Especialistas sobre o Etanol de Segunda Geração

A produção do etanol de segunda geração é sem dúvida a oportunidade de inovação mais discutida entre os agentes do setor. Ela é enxergada como uma inovação com grande potencial de transformação, e por isso, apesar dos inúmeros desafios, foi enxergada por todos os entrevistados como a oportunidade que realmente deve se concretizar em inovação.

As vantagens em relação ao etanol de segunda geração foram levantadas por quase todos os especialistas. Com intuito de exemplificar a opinião geral, segue o comentário do especialista 1 da política:

A segunda geração traz retornos espetaculares, então vale a pena arriscar. É um ganho muito grande, a gente está falando em mais de 50% de aumento de produtividade. E isso com um pacote tecnológico. Hoje você viabiliza uma usina de cana com 25 km de raio, se você usar toda a biomassa você vai viabilizar com menos ainda, talvez 10, 12 [km de raio].

Entretanto, apesar do otimismo e as vantagens apresentadas inicialmente, foram os desafios associados ao etanol 2G que permearam a maior parte das entrevistas. Por conta da abrangência do tema, os comentários dos especialistas sobre os desafios para o etanol 2G foram divididos em subseções.

4.2.4.1 *Desafios Tecnológicos*

Como já foi mencionado, o potencial do etanol de segunda geração é enorme. No entanto, a tecnologia para produzi-lo ainda não está madura. Dessa forma, quando questionados sobre os desafios para o etanol 2G, grande parte dos entrevistados citavam as etapas extras necessárias para se inserir no processo, como foi o caso do especialista 2 da pesquisa:

A principal dificuldade é diminuir os custos dos processos adicionais que não existem para o álcool de primeira geração.

Dentre as etapas mais complexas tem-se o pré-tratamento, a hidrólise e a fermentação da corrente C5. Para cada uma delas, os especialistas da pesquisa expuseram seus principais desafios.

Em relação ao pré-tratamento, o especialista 1 da área de pesquisa deixa claro que a diversidade de opções é um fator complicador na hora de construir um pacote tecnológico. Outro fator é a demanda energética associada a esta etapa.

Não tem pré-tratamento universal. As possibilidades são inúmeras. O pré-tratamento vai ser função do que você quer fazer com a sua biomassa e da composição da sua biomassa. Tem grupos que só querem atacar a fração celulósica, não estão olhando para as pentoses (...) então varia bastante, vai depender do que você quer.

Ela (a etapa de pré-tratamento) é uma etapa importante, principalmente porque é intensiva em energia. É uma etapa desafiadora, independente do pré-tratamento que você escolha. O problema é mais escolher [o pré-tratamento] do que [ele] existir.

Abordando a etapa da hidrólise, os especialistas da pesquisa deixaram claro que a rota enzimática prevalece sobre a ácida sobre vários aspectos. E, considerando os especialistas entrevistados, será a rota dominante. Os 2 comentários do especialista 1 e o comentário seguinte do especialista 2 da área da pesquisa, respectivamente, corroboram essa conclusão:

Você pode fazer [o etanol 2G] com hidrólise enzimática, isso hoje é uma condição obrigatória, falar em etanol de segunda geração é hidrólise enzimática. A [hidrólise] ácida tem sido abandonada.

[A hidrólise ácida] foi um ponto que investimos no passado e as condições eram condições muito drásticas, que deixavam os hidrolisados com substâncias tóxicas, não fermentáveis. Então nós abandonamos e hoje se fala em hidrólise enzimática, que se dá em condições de temperatura e pressão moderadas, não produz tantos dos temíveis inibidores, então hoje, para falar de etanol de segunda geração, está embutida a hidrólise enzimática.

A hidrólise ácida é um processo rápido, de 2 a 3 horas, mas ela é um processo complicado, você pode degradar os açúcares, você tem corrosão dos equipamentos, você forma bolsões de ácidos no reator (...). Então como a hidrólise ácida não é mais uma opção, você tem que fazer hidrólise enzimática e aí você tem que ter capacidade de produzir enzimas.

Em relação à etapa de fermentação, os especialistas deixaram claro que o grande problema é a fermentação da corrente C5, ou pentoses, uma vez que a corrente C6, hexoses, já costuma ser fermentada no processo de primeira geração. Para ilustrar esse desafio, segue o comentário do especialista 1 da pesquisa:

A levedura que fermenta bem C6 não fermenta C5, mas existem leveduras que fermentam C5 na natureza? – existem, mas essas que fermentam C5 na natureza têm baixa tolerância. Aí está a inovação, você construir um micro-organismo que fermente bem tanto C5 quanto C6. Essa é uma concepção que precisa de biologia molecular.

Esse especialista ainda acrescenta os desafios relacionados com a questão da concepção tecnológica da produção do etanol 2G:

Então eu posso fazer sacarificação separada da fermentação, eu posso fazer sacarificação simultânea à fermentação, sacarificação simultânea à co-fermentação – co-fermentação é porque eu vou fermentar C5 e C6 – eu posso fazer uma nova concepção, que é a hidrólise separada da co-fermentação, que é uma configuração que nós não vislumbrávamos na década passada (...) e tem essa concepção mais avançada, que é o processo bioconsolidado, que você integra e tem o mesmo agente biológico que vai produzir as enzimas que vão hidrolisar celulose e hemicelulose e que vai fermentar C6 e C5.

Do ponto de vista do especialista 3 da indústria, a concepção segregada parece a viável no momento.

No nosso modelo de negócio a gente prevê fazer as etapas separadas, então você tem a etapa do pré-tratamento, depois hidrólise e depois fermentação. A gente identificou que para o nosso modelo, essa é a melhor solução.

Ainda do ponto de vista da indústria, o especialista 5 deixa claro que a principal limitação está associada aos rendimentos, e defende que a rota que visa fermentação apenas de C6 não deverá se mostrar viável:

Eu acredito no etanol 2G só se houver a conversão da fração C5, acho que só assim se tornará viável.

Dois especialistas da pesquisa apontam ainda outra questão, a interdependência entre os processos. Eles destacam que trabalhos que estudavam cada etapa separadamente e depois tentavam junta-las, não eram tão eficientes quanto estudos que eram desenvolvidos com as etapas integradas. De forma geral, a rota com as três etapas otimizadas não necessariamente determina que a rota ótima foi encontrada, essa rota ideal deve ser obtida através de estudos integrados. Seguem os comentários dos especialistas 6 e 7 da pesquisa, respectivamente:

No começo da pesquisa de etanol de segunda geração se tinha a ideia de que seria possível você desenvolver a parte da produção, tratamento, enzimas e hidrólise ao máximo, paralelo a outros profissionais, e no final você tinha um casamento perfeito já que todas as etapas estavam otimizadas. O que a gente vem descobrindo nesses últimos 2 anos é que não é bem por aí, que a gente deve estudar a rota tecnológica como um todo. Porque, por exemplo, o pré-tratamento pode alterar as características esperadas para o coquetel enzimático. Então os desafios não são só pré-tratar, conseguir baixar o custo da enzima e ter uma fermentação de C5 e C6. Você tem que pensar na construção da sua rota, os custos, os inibidores, e quanto que um processo interfere na etapa seguinte.

Eu não acredito que trabalhando com diferentes pré-tratamentos e com diferentes biomassas que apenas um coquetel enzimático vá resolver todos os problemas. Precisa haver integração entre as etapas.

Voltando à área da indústria, o especialista 1 destaca que uma das dificuldades está no custo ainda elevado do etanol 2G comparado ao seu rendimento, mas também na dificuldade de fazer uma análise de viabilidade principalmente pela forma de precificar a biomassa, que dependendo do seu uso (bagaço disponível na planta, bagaço para cogeração, palha disponível no campo) pode ter valores diferentes.

A questão do etanol celulósico são alguns custos que não tem como aciona-los, como o custo da biomassa e outros custos que estão relacionados ainda aos processos. Então você tem rendimento global na faixa de 65%, se você chegar na faixa de 80% a competitividade do produto seria muito maior. Então o investimento de capital é alto e a escala das plantas é pequena isto é, o custo fixo acaba sendo bastante elevado. A questão dele (do etanol 2G) é ganhar maturidade para ser mais competitivo.

Ainda na área da indústria, outro especialista destaca a questão da entressafra como uma oportunidade que tem que ser aproveitada, e enxerga o processo do etanol 2G como uma alternativa para valorizar esse tempo parado. Segue o comentário do especialista 2 da indústria:

A primeira coisa que a gente se depara é com a duração da safra das usinas. Essa análise é difícil de ver alguém no setor fazendo, para eles é tão natural que tenham que parar, porque a vida toda fizeram isso. Quando vem alguém de outra indústria como celulose e papel, petroquímica, onde a nossa briga é parar o mínimo que a legislação permite para inspecionar equipamento, enquanto o resto tem que estar rodando, a gente enxerga isso. Você começa a olhar para esse tempo parado e vê que isso é um capital parado e essa conta não vai fechar. Então se eu faço uma planta para produzir etanol celulósico a nossa intenção é que essa planta rode 365 dias por ano, ou em torno disso.

Para finalizar a parte de desafios tecnológicos, dois especialistas da pesquisa apontaram a dificuldade relacionada com os equipamentos para essa nova rota. Além de ter que processar sólidos, esses equipamentos devem ser grandes e esterilizados para não haver perda de açúcar. Isso acarreta em um custo fixo elevado. Seguem, então os comentários dos especialistas 6 e 1 da pesquisa, respectivamente:

Eu destaco também o volume dos equipamentos que devem ser grandes. Para o processamento do bagaço é necessário um grande

volume dos equipamentos. Desde o início, já são necessários reatores de grande porte por conta da densidade do bagaço. Um outro problema que eu aponto, é a questão da esterilização dos equipamentos, por conta também dos seus grandes volumes. É importante que não haja perda de açúcar no processo para que não reduza o rendimento de etanol.

Sob o ponto de vista de engenharia não tem só a questão da transferência dos sólidos, mas também dos equipamentos, equipamentos estes que trabalham com altas cargas de sólidos vão ter que ter configurações, desenhos, particulares.

4.2.4.2 Integração

Outro ponto que foi bastante discutido entre os entrevistados foi a forma como esse processo deve ser alocado, se separado da produção de 1G (*stand alone*) ou integrado com a produção 1G. A configuração *stand alone* poderia indicar que outra indústria, processadora de material lignocelulósico, surgisse, tendo como fornecedor de matéria-prima o setor sucroenergético.

Dentre os entrevistados a opinião foi bastante similar em todas as áreas do setor, indicando que a integração sempre apresentaria vantagens diante da *stand alone*. Mesmo considerando questões gerenciais, como uma possível dificuldade do setor em assimilar essa nova tecnologia, os entrevistados foram enfáticos sobre a preferência da integração sobre o *stand alone*, se fossem consideradas as grandes empresas do setor sucroenergético. Alguns comentários destacam essa opinião:

Não tem discurso que faça com que as coisas tenham que ser separadas (...) eu vou compartilhar equipamentos, eu vou compartilhar utilidades, eu não posso fixar e fazer uma concepção isolada, o nosso principal resíduo de composição lignocelulósico no Brasil, o bagaço, e agora a palha que está sendo recolhida e está sendo trazida para o centro de processamento, são geradas no próprio centro, não são resíduos agrícolas, são resíduos agroindustriais (Especialista 1 da pesquisa).

Os resultados que a gente obteve mostram que é mais eficiente a produção integrada. Até mesmo a produção enzimática *insite*, também utilizando o que já estaria disponível na usina (Especialista 7 da pesquisa).

Além de toda essa questão, ainda tem a questão de transporte da biomassa. Se for usar o bagaço, ele já estaria disponível na planta e não precisaria ser transportado (Especialista 6 da pesquisa).

Para viabilizar o ideal é fazer integrado. Na *stand alone*, o custo de investimento e de operações são bem maiores com o *mix* de produtos bem menor (Especialista 6 da indústria).

Vale acrescentar que essas opiniões foram expressas considerando grandes grupos do setor. A heterogeneidade do setor foi algo muitas vezes enfatizado nas entrevistas, principalmente quando se tratou do etanol de segunda geração. Ao dar suas opiniões sobre o futuro do setor, os entrevistados em geral, citavam exemplos de empresas que se encaixariam no grupo que poderiam agregar essas inovações em seus negócios. Para exemplificar essa opinião, segue o comentário do especialista 5 da indústria:

Eu vejo a integração como a melhor opção, mas não desclassifico o modelo de negócio de fazer separado, o setor é muito heterogêneo, isso pode acabar se desenvolvendo.

Mesmo considerando as grandes empresas, algumas dificuldades foram sinalizadas pelas entrevistas a respeito da integração. Como foi o caso do especialista 7 da pesquisa e do especialista 1 da indústria, respectivamente:

Querendo ou não, quando você trabalha com a integração do 1G com 2G você tem uma complexidade maior, você fazer esse casamento de algo que está ali há 10 anos com algo completamente novo, que vai mexer em toda rotina e acrescentar mais severidade dos processos.

São operações bastante distintas, você fazer na primeira geração e na segunda geração. Por enquanto o que a gente enxerga como oportunidade de sinergia é basicamente na parte de integração de utilidades e energia. Além do que, ela necessariamente tem que ficar perto de uma usina de primeira geração em função do custo logístico de transporte do bagaço. É inviável pensar em transportar bagaço ou palha por distâncias longas.

4.2.4.3 Flexibilidade

Considerando a integração do processo 1G com 2G como a melhor alternativa para o etanol 2G, cabe uma discussão sobre a escolha do uso da biomassa, principalmente do bagaço, se para cogeração ou para a produção de etanol, mostrando que essa

escolha dificulta a decisão para o investimento no etanol 2G. Segundo o especialista 1 da indústria:

O mercado para etanol 2G é muito simples, é o mesmo mercado demandante do etanol 1G. Então a parte de mercado é bastante simples. A parte difícil é a questão da competitividade dele. Tem-se visto que o investimento em capital é bastante elevado, fala-se muito do custo de enzimas que é relativamente alto, mas hoje, uma dificuldade enorme é o custo de biomassa, quando você compara o custo de oportunidade da biomassa quando você vai gerar energia e quando vai fazer etanol, com os preços atuais, isso não tem nem o que pensar, vai gerar energia. Mas também tem estudos que mostram que esse preço de energia não se sustenta a longo prazo. A tendência a partir de 2017 é que esse preço já chegue num patamar bem mais baixo, e aí já chega num nível de preço que o etanol passa a ser uma utilização mais competitiva para a biomassa.

Diante dessa dúvida, foram comentadas em algumas entrevistas a possibilidade de uma flexibilidade na usina de forma a ora produzir energia ora etanol 2G. Uma flexibilidade que até certo ponto já é conhecida pelo setor, que durante anos tem escolhido se produz mais açúcar ou mais etanol. Os especialistas 7 e 2 da pesquisa, respectivamente, apoiaram a ideia da flexibilidade.

Aqui (instituição em que trabalha) já tem um grupo focado só em pesquisar isso (...). No primeiro momento, vão ter vários desafios tecnológicos, mas que uma vez superados, ter essa flexibilidade é um ponto muito interessante do ponto de vista de negócio.

Eu tenho a impressão que as usinas de ponta elas já estão se preparando para ter essa flexibilidade, porque a tecnologia da venda da eletricidade já está estabelecida e já se provou rentável. Essas empresas estão se preparando para acionar uma área ou outra para dependendo da demanda (...). A biomassa não vai estar sempre abundante, vai ter que ter um gerenciamento de uso de biomassa.

4.2.4.4 Diferenciação de etanol 1G para etanol 2G e incentivo para desenvolvimento da curva de aprendizado

Outra discussão que frequentemente aparecia nas entrevistas era a necessidade de um incentivo que auxiliasse no desenvolvimento da curva de aprendizado dessa nova tecnologia. Neste contexto surgiu o questionamento se existiria alguma diferença,

como produto, entre o etanol de primeira e segunda geração que permitisse justificar esse incentivo. As opiniões dos especialistas 6 e 7 da pesquisa, respectivamente, ilustram bem o contexto dessas discussões.

A diferenciação é só sobre o aspecto de sustentabilidade. Mas a gente não vê uma diferenciação de negócio que vá além do aspecto ambiental. Isso porque o produto final é exatamente o mesmo, só que com um processo diferente. O consumidor não tem um ganho de performance e não tem um produto mais barato.

Tem a questão que aqui no Brasil a produção do 1G é muito simples, e ele também é verde. É difícil pensar em colocar um selo verde no 2G se o 1G também parte de cana-de-açúcar, num processo bem mais simples e mais barato.

A origem desses questionamentos se deve principalmente ao prêmio oferecido por alguns estados americanos, como a Califórnia, para o etanol de segunda geração (UDOP, 2014). Com a possibilidade de ter um incentivo para o etanol 2G, vale um estudo sobre a possibilidade de esses dois produtos serem diferenciados.

No entanto, pensar em diferenciar o etanol 1G do 2G significa ter processamento, armazenamento e transporte separados. Fatores relevantes o suficientes para se questionar as vantagens de lidar com esses produtos separadamente. Os comentários do especialista 2 da indústria discorrem sobre esse tema e apresentam uma solução mais compatível com a realidade do país.

Quanto mais integrado com primeira geração, melhor. Só que existem aí dificuldades adicionais. Uma delas é o mercado, no Brasil não tem nenhuma diferenciação do etanol celulósico para o etanol convencional, porém se esse etanol for exportado para mercados que tenham diferenciação, como o mercado americano, tem um prêmio em relação ao etanol celulósico. Mas aí eu não posso misturar as moléculas. Isso causa um problema logístico e conceitual de plantas muito grande.

Faria muito mais sentido certificar sua linha de produção de etanol celulósico e comercializar a molécula igual. Essa diferenciação seria uma grande dificuldade da integração 1G + 2G (...). Se tivesse um incentivo, como um prêmio, e esse prêmio é decrescente com o tempo à medida que a tecnologia se consolida e amadurece, aí você

tem pressa para pegar esse prêmio, nas curvas de custo do etanol celulósico todos os custos são decrescentes. Aí seria interessante.

O especialista 1 da indústria apresenta o mesmo raciocínio, e destaca as desvantagens de tentar depender do mercado americano.

E tem uma curva de aprendizado aí que precisa ser traçada, então talvez você tenha que pleitear algum tipo de apoio governamental exatamente para você conseguir fazer uma implantação inicial e traçar esse período de curva de aprendizado sem muito sofrimento, porque hoje eu não o vejo como um combustível que consiga um custo competitivo com o de primeira geração.

Para manter esse produto segregado e levar ele até os EUA, esse transporte você não vai fazer por duto, vai fazer por caminhão, então tem toda uma questão de custo logístico e custo de carbono também, teria que ser um incentivo muito alto. E também do ponto de vista social aí já não faz sentido, pagar mais por um produto que acaba tendo as mesmas características de um mais barato.

Eu acredito que o melhor seria pensar num mercado mais doméstico mesmo, mas sabendo que hoje não tem nenhum tipo de benefício por estar produzindo um etanol com menor pegada de carbono.

4.2.4.5 *A palha*

Em geral, o bagaço é a matéria-prima mais cogitada para a produção do etanol de segunda geração, principalmente por já estar disponível na planta. No entanto, com a oportunidade de aumentar a produtividade de etanol com o processo 2G e com a competitividade do bagaço para a cogeração, a palha da cana-de-açúcar deixada no campo ficou cada vez mais atrativa.

O especialista 2 da área da política destacou a importância desse material, mas indica em seu comentário que ainda existem dificuldades de adquiri-lo:

Trazer palha é uma coisa que tem que fazer, a gente sabe que tem um terço de energia na palha, mas até agora não se mostrou uma maneira de pegar esse um terço de energia e aproveitar.

Especialistas da indústria e da pesquisa destacam algumas das principais dificuldades em aproveitar o potencial contido na palha. São elas: o custo e a dificuldade técnica da coleta, a falta de informação sobre a quantidade que deve permanecer no solo para

protegê-lo e as mudanças que devem ser feitas no processo para ter um rendimento viável tanto com a palha quanto com o bagaço. Seguem os comentários dos especialistas:

Outro ponto é que o bagaço não é suficiente, tem que trazer palha, a palha vai ter um custo, vai ter o custo de recolher até a usina e o custo de oportunidade de transformar ela em eletricidade (Especialista 2 da indústria).

A questão da palha tem uma coisa interessante. Hoje o bagaço já está 100% na indústria. Ele já tem um determinado uso, embora não seja o uso com maior valor agregado possível, mas ele já se encontra na usina, o que torna mais fácil trabalhar com ele na segunda geração. Já na palha, que tem muita gente com interesse, você tem que lidar com os gargalos industriais da conversão, mais ainda as questões no manejo agrícola, que além de coletar você tem que deixar uma parte lá por questões de proteção do solo (Especialista 7 da pesquisa).

Ainda não existem estudos agronômicos que dizem quanto da palha que você poderia tirar e trazer para indústria sem impactar a produtividade da próxima safra. O uso da palha é interessante, mas ela vem com mais gargalos que o bagaço (Especialista 7 da pesquisa).

Os processos e equipamentos são os mesmos. Mas as condições de processos que vão ter que ser bem diferentes de forma a otimizar as condições para a palha no lugar do bagaço (Especialista 6 da pesquisa).

Apontada a questão da palha, esses foram os principais tópicos abordados para a produção do etanol de segunda geração. A próxima seção se dedicará a analisar os fatores impulsionadores e inibidores para a produção do etanol 2G.

4.2.5 Fatores Impulsionadores e Inibidores para o Etanol de Segunda Geração

Como foi visto na seção anterior, diversos desafios foram associados à produção do etanol de segunda geração. A princípio esse resultado pode parecer desfavorável para essa oportunidade de inovação, no entanto, a conclusão que pode ser tirada é a oposta. Tamanho é o interesse no etanol lignocelulósico que os esforços para produzi-

lo já tiveram vários resultados sobre as barreiras que devem ser superadas. Por conta disso, é grande a quantidade de informações e tópicos de discussão sobre essa tecnologia.

Durante as entrevistas esses vários desafios eram colocados claramente como pontos que estão sendo estudados para serem resolvidos, e não como desvantagens da tecnologia. Essa diferença mostra que esse elevado número de possíveis fatores inibidores, na verdade, são resultados de um esforço para aproveitar essa oportunidade.

No entanto, independente da forma como esses fatores inibidores foram abordados nas entrevistas, eles ainda são desafios que dificultam a implantação dessa oportunidade. Na Tabela 5 é possível visualizar um resumo dos principais fatores impulsionadores e inibidores para a tecnologia de segunda geração.

Tabela 5: Fatores impulsionadores e inibidores da produção do etanol 2G.

Fatores Impulsionadores	Categoria	Fatores Inibidores	Categoria
Aumento da demanda por combustíveis.	Externo	Desafios para o pré-tratamento.	Tecnológico
Aumento da demanda por biocombustíveis.	Externo	Desafios para a hidrólise.	Tecnológico
Matéria-Prima Renovável.	Ambiental	Desafios da fermentação.	Tecnológico
Matéria-Prima Abundante.	Custo	Concepção tecnológica para produção do etanol 2G.	Tecnológico
Aumento da Produção de Etanol.	Custo	Logística e transporte da palha.	Tecnológico
Não compete com a produção de alimentos.	Externo	Necessidade de grandes equipamentos esterilizados para processamento de sólidos.	Custo
Redução das emissões.	Ambiental	Nível de integração e flexibilidade.	Organizacional
O bagaço está inserido na compra da cana.	Custo	Falta de incentivos para traçar curva de aprendizado.	Político
Entressafra facilita a introdução de uma planta 2G.	Custo	Dificuldade de colocar um preço na biomassa.	Organizacional

Novo processo, mas mesmo produto.	Organizacional		
Interesse de mercados externos.	Organizacional		
Prêmio oferecido por mercados externos.	Custo		
Criação do PAISS	Político		

Analisando as categorias de cada fator impulsionador e inibidor foi possível construir a Figura 18 e a Figura 19. Na Figura 18, observa-se que os fatores impulsionadores são relacionados à diferentes aspectos. Como foi visto na seção anterior, os fatores de custo e ambiental estão em sintonia com o conceito de desenvolvimento sustentável. Os fatores externos, políticos e organizacionais impulsionam a inovação tanto do ambiente externo para interno, quanto dentro da própria empresa.

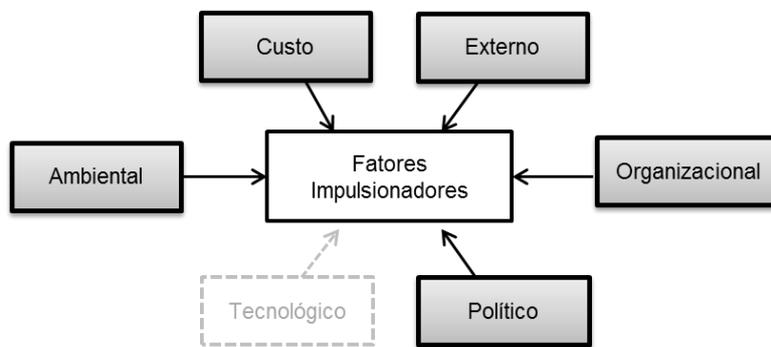


Figura 18: Fatores impulsionadores para o etanol 2G.

Na Figura 19, é possível observar que os fatores inibidores também são relacionados a vários aspectos. Os fatores inibidores tecnológicos, apesar de serem muitos, estão caminhando para serem superados. Instituições de pesquisas em várias partes do país, juntamente com o interesse de empresas do setor, estão reunindo esforços para viabilizar a tecnologia.

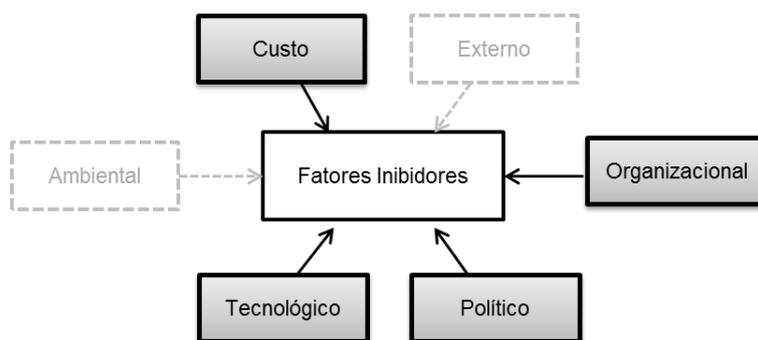


Figura 19: Fatores inibidores para o etanol 2G.

O fator de custo vai depender imensamente da viabilização da tecnologia. Se a tecnologia amadurecer o processo tem grande chance de se tornar mais competitivo. A questão organizacional é um fator inibidor que vai demandar um esforço particular da empresa, isto é, para algumas empresas ele pode ser grande o suficiente para inibir o etanol 2G, e para outras, um fator mais simples de ser superado.

Porém, analisando o cenário brasileiro e os tópicos gerais das entrevistas, os fatores inibidores *tecnológicos* e *político* parecem ser os mais influentes para a inibição dessa oportunidade. Esses fatores estão fortemente interligados, já que um incentivo político seria uma importante ferramenta para superar as dificuldades tecnológicas.

Concluindo, pode-se dizer que a intensidade de análises que foram feitas sobre o etanol de segunda geração durante as entrevistas retratam um grande interesse, não só da pesquisa, mas também de diversas empresas, em aproveitar essa oportunidade. A partir desse estudo, pode-se destacar a ausência de incentivos políticos focados na comercialização do etanol 2G como um dos principais fatores que inibem o interesse das empresas no processo de segunda geração.

4.3 Aproveitamento da Vinhaça

A vinhaça, ou vinhoto, é um dos principais subprodutos da indústria sucroenergética. Esse subproduto é gerado na etapa de destilação do etanol, logo após a etapa de fermentação, e sua disposição apresenta sérias complicações uma vez que é produzido em grandes quantidades, cerca de 10-15L por litro de etanol, e apresenta elevado grau poluidor principalmente por sua elevada carga orgânica (MORAES *et al.*, 2013). Na Figura 20 são mostradas algumas etapas do processo produtivo do etanol e as condições em que é gerada a vinhaça.

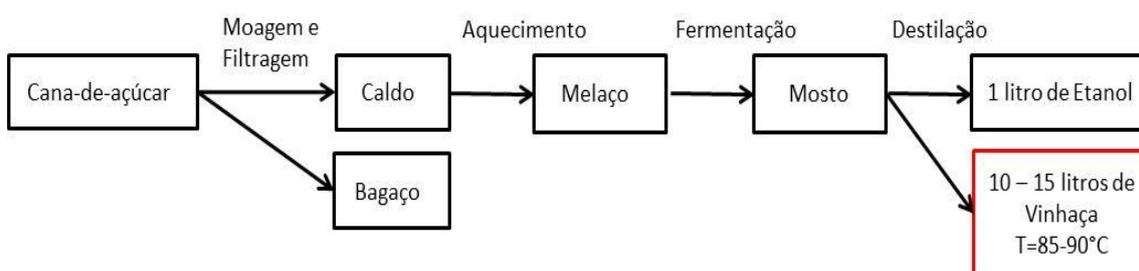


Figura 20: Etapas do processo produtivo de etanol e geração da vinhaça.

Fonte: Traduzido de CHRISTOFOLETTI *et al.* (2013) com informações de MORAES *et al.* (2013).

A constituição da vinhaça varia de acordo com a matéria-prima e com o processo utilizado em cada usina. No entanto, pode-se dizer que a vinhaça proveniente da produção de etanol pela cana-de-açúcar é um efluente de cor escura que consiste basicamente em água (93%) e sólidos orgânicos e minerais (7%). É também rica em potássio, cálcio e enxofre, apresenta elevado teor de matéria orgânica com demanda química de oxigênio (DQO) entre 20.000 a 35.000 mg/L, possui pH entre 3,5 – 5 e deixa o processo a uma temperatura entre 85-90°C (SZYMANSKI *et al.*, 2010; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

Dessa forma, dois fatores tornam a utilização da vinhaça uma oportunidade de inovação: o grande volume gerado e a composição química rica em matéria orgânica. Essas características geram diversas oportunidades de utilização e destinação desse material.

No estudo realizado por Christofolletti *et al.* (2013), os autores realizaram um levantamento das melhores oportunidades de destinação da vinhaça no Brasil. O trabalho destacou: fertirrigação, concentração por evaporação, produção de biogás e produção de levedura. Nas próximas seções essas oportunidades serão discutidas com maiores detalhes, enfatizando principalmente a produção do biogás, uma vez que

esta foi a oportunidade mais discutida entre os especialistas entrevistados quando se tratava do potencial de utilização da vinhaça.

4.3.1 Fertirrigação

Dentre as opções de utilização da vinhaça, a fertirrigação é sem dúvida a que encontra atualmente maior aplicação. A utilização como fertilizante teve início no setor sucroenergético no começo dos anos 80 e hoje faz parte do processo de muitas usinas no Brasil. A fertirrigação consiste na infiltração da vinhaça crua no solo pela irrigação das lavouras de cana. Quando aplicada *in natura* no solo, a vinhaça, além da irrigação, fertiliza o cultivo, baixando os custos com fertilizantes químicos (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

Do ponto de vista econômico, a fertirrigação apresenta a solução mais barata e simples para a descarga de grandes volumes desse efluente se considerada a legislação ambiental brasileira. No entanto, não está claro se é possível assegurar que esta ação não irá resultar em impactos ambientais mesmo que permitido por lei. A regulamentação brasileira só prevê impactos causados pela vinhaça no solo, nas águas superficiais, e nas águas subterrâneas, se baseando principalmente em teor de potássio, mas negligenciando matéria orgânica e impactos atmosféricos devido às emissões gasosas (MORAES *et al.*, 2013).

A utilização da vinhaça como fertilizante tornou-se uma solução para diversos casos enfrentados no país de despejo desse material em recursos hídricos. Por ter um investimento inicial baixo (tubos, bombas, caminhões e tanques de decantação), baixo custo de manutenção, aplicação rápida, não requerer tecnologias complexas, e aumentar a produtividade da cultura, essa tecnologia foi a que mais se difundiu dentre as alternativas de destinação da vinhaça (CAMARGO *et al.*, 2009).

Apesar dessas vantagens, vários estudos têm mostrado que a aplicação da vinhaça no solo pode trazer diversas consequências agressivas ao meio ambiente, como salinização do solo, lixiviação de metais presentes no solo para as águas subterrâneas, alterações na qualidade do solo devido ao desequilíbrio de nutrientes, principalmente de manganês, redução de alcalinidade, perda de colheitas, aumento de fitotoxicidade e odor desagradável (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

No entanto, ainda faltam especificações nas legislações ambientais para realizar o controle dessas possíveis agressões, tais como: tipo do solo, distância em relação aos corpos hídricos, capacidade de campo do solo (retenção de água) e porcentagem de

sais no solo. As características da vinhaça produzida também devem ser analisadas para a avaliação ambiental da fertirrigação (MORAES *et al.*, 2013). Essa dupla dependência – características do solo e características da vinhaça – é um grande desafio para os órgãos ambientais tomarem medidas sobre as consequências da fertirrigação.

4.3.2 *Concentração por evaporação*

A utilização da vinhaça para fertirrigação muitas vezes não é suficiente para promover a total disposição desse resíduo. Como alternativa, surge a concentração por evaporação que é simplesmente a retirada de grande quantidade de água da vinhaça para redução do seu volume. Essa tecnologia gera dois produtos, o primeiro é a vinhaça concentrada que pode ser usada na produção de alimentos para o gado e para melhorar a qualidade da vinhaça como fertilizante (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013), e o segundo é a água que pode ser tratada e reutilizada na usina.

Uma das grandes vantagens desse método é a capacidade de reduzir os custos com o transporte em caminhões-tanque, aumentando o raio de aplicação de vinhaça, onde fertirrigação em dutos é inviável. A desvantagem dessa alternativa está na elevada demanda energética do processo (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013), nos problemas de rápida incrustação nos evaporadores e cristalização espontânea conforme aumenta-se a concentração de sólidos (RODRIGUES, 2008).

Caso a vinhaça concentrada não venha a ser utilizada como fertilizante, ela pode ser utilizada na produção de alimentos para animais, devido aos seus elevados níveis de nutrientes, servindo como uma nova fonte de receita. O resíduo tem que ter um nível de potássio reduzido, e pode ser utilizado como alimento para gado, porcos e aves. A alimentação produzida não interfere no sabor ou odor de leite ou produtos lácteos, é bem aceito pelos animais (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

4.3.3 *Produção de biogás*

Uma alternativa que vem se tornando cada vez mais atrativa para a destinação da vinhaça é a produção do biogás através de um processo de biodigestão anaeróbia. Esse processo consiste na biodegradação da parte orgânica da vinhaça para a produção de biogás, composto principalmente de metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), e vinhaça biodigerida.

O processo anaeróbico da biodigestão ocorre em duas etapas: a fase acidogênica e a fase metanogênica.

- Fase acidogênica: Nesta fase, compostos orgânicos de cadeia complexa como lipídios, carboidratos e proteínas são hidrolisados até a formação de componentes com cadeias carbônicas menores que são oxidadas biologicamente por bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias em ácidos voláteis, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio molecular e amônia. Nesta fase a cinética é rápida e a assimilação da matéria em biomassa microbiana é grande (CORTEZ *et al.*, 2007; PINTO, 1999).
- Fase metanogênica: Nesta fase, os ácidos são convertidos em metano, dióxido de carbono e ácidos orgânicos, ou o dióxido de carbono é reduzido até que a formação de metano por microrganismos anaeróbios. Esta é a fase mais lenta do processo e controla as taxas de conversão (CORTEZ *et al.*, 2007).

A vinhaça biodigerida proveniente deste processo, apesar da remoção de grande parte da matéria orgânica, ainda mantém seu potencial fertilizante e pode ser utilizada no cultivo da cana (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Em relação ao biogás, várias oportunidades estão associadas a sua utilização dentro das usinas sucroenergéticas, tais como, queima na caldeira para geração de vapor e acionamento da moagem, utilização como combustível veicular para os equipamentos de colheita da cana, acionamento de turbinas a gás conjugada com um gerador elétrico e tem-se ainda a possibilidade de venda de créditos de carbono. (CORTEZ *et al.*, 2007; SZYMANSKI *et al.*, 2010).

Para promover a biodigestão, um equipamento que tem se destacado é biodigestor UASB (do inglês *upflow anaerobic sludge blanket digestion*) indicado para o tratamento de efluentes com teor de sólidos de até 2% (CORTEZ *et al.*, 2007). Os reatores UASB são sistemas muito compactos, necessitando de pouco volume devido à sua elevada concentração de biomassa. No entanto, esse reator ainda tem apresentado alguns desafios, como tempo de retenção muito longo e produção de gases corrosivos e de odor desagradável (SZYMANSKI *et al.*, 2010).

O potencial dessa oportunidade pode ser verificado pela presença de empresas se instalando no setor com o objetivo de produzir o biogás. Um exemplo é a GEO Energética, uma empresa brasileira criada em 2008 com forte base tecnológica. Após passar por uma terceira planta piloto a empresa construiu sua planta em escala

industrial e começou as operações em 2011 gerando uma potência de 4MW a partir do biogás (GEO Energética, 2014).

A GEO Energética tem um contrato de parceria de longo prazo com uma usina no município de Paraíso do Norte (PR), na qual ela recebe os insumos necessários e fornece de volta adubos orgânicos. Esta planta produz 4 MW de energia despachada para a Copel (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) (GEO Energética, 2014).

Ainda em 2014 foram divulgadas notícias sobre o aumento da capacidade dessa unidade até 12 MW, o que significa triplicar a produção atual (Jornal da Energia, 2014; Valor, 2014).

Outra alternativa para a destinação da vinhaça é a produção de leveduras, que também é uma tecnologia alternativa que pode reduzir a descarga deste resíduo. No entanto, dois fatores contribuem para o aumento dos custos desta alternativa: o fato de ser necessário adicionar sais de amônio e magnésio na vinhaça, e o consumo elevado de energia para a evaporação da água da vinhaça exigido neste processo (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

4.3.4 Opinião dos especialistas sobre o aproveitamento da vinhaça

Devido às diferentes formas de dar uma destinação para a vinhaça, as opiniões dos especialistas foram bem diversas. No entanto, a produção do biogás foi a destinação mais discutida entre os especialistas por conta do seu potencial energético.

Dentre os especialistas da indústria a oportunidade de aproveitamento da vinhaça para produção de biogás baseia-se em três principais fatores: potencial energético do biogás, implicações ambientais devido ao uso excessivo da fertirrigação e desenvolvimento de tecnologias para o gás de xisto, ou gás não-convencional, nos EUA que podem ser aproveitadas para produtos do biogás. Os comentários dos especialistas 2, 5 e 7 da indústria, respectivamente, exemplificam essa conclusão.

Vinhaça, uma ótima oportunidade aí, o potencial de geração de energia aí é fantástico. Um ponto que eu acho que seria fantástico seria pegar esse biogás e rodar a frota, o diesel é um fator de consumo muito sério, poderia rodar os caminhões a biogás, fazer o processo para tirar CO₂, tira H₂S, talvez liquefazer e levar para trator. Nos EUA tem o *shale gas* (gás de xisto) que o pessoal tá estudando

em motores pesados. Tem uma área grande aí de adaptar esses motores que as usinas não estão sabendo aproveitar.

A vinhaça na fertirrigação é uma bomba-relógio. Existem os problemas de saturação de potássio, odor, atrai moscas, enfim, isso vai ter que mudar e vai mudar, e o setor vai ter que encontrar outra solução para a vinhaça. Já tem gente trabalhando com concentração, mas a melhor alternativa é o biogás como combustível para os motores pesados. E isso vai ser uma realidade devido aos desenvolvimentos que estão sendo feitos com o gás de xisto nos EUA.

Esse problema vai vir (implicações ambientais devido ao uso excessivo da vinhaça na fertirrigação). Alguns estados como São Paulo, Minas e Mato Grosso, já controlam bem a quantidade de vinhaça que você pode usar por hectare. A legislação deve se tornar mais rígida.

Apesar do otimismo em relação à produção de biogás, alguns especialistas da indústria deixaram claro que a fertirrigação ainda é uma solução prática, barata e necessária para a destinação da vinhaça. Segue abaixo os comentários dos especialistas 6 e 7 da indústria.

A fertirrigação só causa problemas se for mal distribuída, se houver um planejamento sobre o tipo da vinhaça e onde distribuir, então não traz implicações.

Não vale a pena você tirar tudo do campo. Existe uma quantidade ótima para usar no campo e uma quantidade ótima para você usar em outro lugar.

Mesmo com as claras vantagens da fertirrigação e com o controle sobre o planejamento das áreas que serão irrigadas, de modo a não causar implicações ambientais, alguns fatores ainda podem exigir outra forma de destinação da vinhaça. Se for analisado, por exemplo, o caso da produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço e palha da cana-de-açúcar, é possível que a vinhaça seja gerada em períodos úmidos, sem a necessidade da fertirrigação. O especialista 2 da indústria

discorre sobre a possibilidade de rodar uma usina o ano todo com a cana energia⁸, o que acarretaria em produção de vinhaça o ano todo, inclusive nos períodos de chuva.

Se eu quiser rodar uma planta de etanol 2G com cana energia o ano inteiro, eu vou ter vinhaça o ano inteiro, e eu vou ter vinhaça nos períodos de chuvas, para quê a fertirrigação no período de chuvas? Então eu preciso pensar em como lidar com a vinhaça o ano todo e quais são as soluções.

Ainda considerando uma produção de etanol 2G, o especialista discute sobre a quantidade de diesel que a coleta de palha no campo vai demandar que poderia ser substituída por biometano.

O mais pesado numa planta 2G, que piora o ciclo de vida da 2G, é o processo de trazer a biomassa, vai ter que enfardar, vai ter que recolher, e isso é diesel. Agora, usando o biometano da minha própria vinhaça eu consigo fazer um produto melhor, utilizando esse coproduto.

Os dois últimos comentários exaltam a relação que existe entre as oportunidades do biogás com o etanol de segunda geração, e como o aproveitamento de ambas as oportunidades podem trazer novas vantagens para os dois processos.

O especialista 3 da indústria argumenta que mesmo que a vinhaça seja produzida em proporções bem maiores que o etanol, ainda é importante que a usina produza uma quantidade mínima de etanol para que essa tecnologia possa ser considerada, isto é, em usinas com pequenas capacidades a viabilização para a produção do biogás se torna mais difícil.

Hoje nós não temos um projeto para isso (produção de biogás a partir da vinhaça), a gente fez alguns estudos econômicos sobre isso, mas a vinhaça, para produção de biogás, precisa de um volume muito grande para se tornar viável, então para gente hoje não é viável produzir esse biogás da vinhaça, mas se você pensar no futuro, uma unidade grande, aí essa quantidade pode valer a pena para você gerar o biogás e agregar valor nessa vinhaça.

⁸ A cana-energia é uma variedade desenvolvida a partir do cruzamento genético de tipos ancestrais e híbridos comerciais de cana-de-açúcar. O resultado é uma cana mais robusta, com maior teor de fibra e potencial produtivo, ideal para fabricação de biocombustíveis e bioquímicos de segunda geração.

Em relação aos especialistas da área da política, a questão da vinhaça foi abordada pelas implicações ambientais que, de acordo com eles, deve atrair a atenção dos órgãos legislativos em breve. O especialista 1 da área da política comentou:

Todo o potássio que a usina comprou e colocou em 100% da área volta para a usina na cana (...) depois todo esse potássio é destinado em 20% da área. Depois de toda essa questão voltada para as queimadas, acredito que a vinhaça será o próximo foco.

Nenhum dos especialistas mostrou grande interesse na concentração da vinhaça e na produção de leveduras. Ao contrário, dentre as três áreas do setor analisadas, uma mesma opinião se destacou sobre o processo de concentração: que melhor do que a concentração seriam as alternativas de mudanças no processo, como a reciclagem da vinhaça, onde no lugar de destinar uma grande quantidade de subproduto, se alteraria o processo para aumentar a produção de etanol reduzindo a produção de vinhaça. Os comentários dos especialistas 1 da pesquisa, 3 da política e 7 da indústria abordam essa questão:

Duas alternativas para a vinhaça: primeiro reciclar, projetos em desenvolvimento mostraram que saímos de 1-15 para 1-4. Aí você reduziu a produção, mas o que fazer com esse vinhoto que está mais concentrado? Ele fica melhor para a produção de metano já que esses processos anaeróbios são indicados para materiais com carga orgânica mais elevada. Então, reciclando o vinhoto, eu consigo aumentar a carga orgânica e, portanto a tratabilidade ou o uso, como matéria-prima para produção de biogás. A concentração é semelhante ao processo de concentração do caldo, mas é uma demanda energética muito alta. Para produção de biogás, melhor o reciclo.

Tem muita gente voltando a atenção para reduzir drasticamente o volume de vinhaça produzido, não só dar uma destinação.

Tem muita empresa pensando “em vez dar destinação para vinhaça, vamos mexer no processo para produzir menos”.

Os especialistas da pesquisa tiveram opiniões bem similares aos da indústria, isto é, observaram as oportunidades da vinhaça focando principalmente nos problemas associados à fertirrigação e o potencial energético do biogás.

Analisando as opiniões de todas as áreas do setor, pesquisa, política e indústria, o principal fator motivador para inovações envolvendo a vinhaça é a necessidade atual e – ainda maior – futura de administrar esse subproduto sem agredir o meio ambiente. O potencial energético associado ao biogás pode ser considerado como segundo fator mais influenciador.

4.3.5 Fatores Impulsionadores e Inibidores para Aproveitamento da Vinhaça

Na Tabela 6 estão reunidas as informações sobre os fatores que influenciam e inibem o desenvolvimento das oportunidades de aproveitamento da vinhaça. Para a fertirrigação, os fatores impulsionadores tem se mostrado superiores aos inibidores uma vez que é a prática mais adotada nas usinas sucroenergéticas e com sucesso. No entanto, no médio prazo, dois fatores inibidores podem se tornar tão significativos a ponto de confrontar as vantagens da técnica. Um deles é um esperado rigor a ser acrescentado nas legislações ambientais sobre a disposição da vinhaça. O outro é o aumento significativo da produção de etanol se a tecnologia de segunda geração se propagar, aumentando também a quantidade de vinhaça gerada. Por esses motivos é interessante analisar outras possibilidades de disposição da vinhaça, mesmo que hoje a prática seja vantajosa.

Em relação à técnica de concentração, a elevada demanda energética, aparece como o principal fator inibidor para impedir a ampla aplicação desse processo. Dentre os especialistas entrevistados, nenhum deles se mostrou otimista sobre a possibilidade de concentrar a vinhaça.

A produção de biogás foi a técnica de aproveitamento de vinhaça que mais foi discutida e incentivada pelos entrevistados. Apesar dos vários fatores inibidores de custo relacionados à produção de biogás, o potencial de substituir o diesel em motores pesados parece ser um fator impulsionador elevado o suficiente para que esse processo seja estimulado. As pesquisas relacionadas ao uso do gás de xisto em motores pesados também parece ser um fator impulsionador bastante significativo uma que vez auxilia na construção de uma curva de aprendizado.

A produção de leveduras foi a técnica menos citada pelos entrevistados e não apareceu como uma potencial solução para a destinação completa da vinhaça.

Tabela 6: Fatores impulsionadores e inibidores para o aproveitamento da vinhaça.

FERTIRRIGAÇÃO				
Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Destinação para vinhaça	Custo		Efeitos negativos para o solo, recursos hídricos e ar.	Ambiental
Diminui custo com fertilizante	Custo		Muitas vezes não utiliza toda a vinhaça produzida (necessita ser tratada antes de descartada)	Custo
Diminui custo com irrigação	Custo		Produção de etanol 2G vai gerar mais vinhaça, possivelmente nos períodos de chuvas (necessita ser tratada antes de descartada)	Custo
CONCENTRAÇÃO POR EVAPORAÇÃO				
Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Reduz volume facilitando transporte	Custo		Elevada demanda energética	Custo
Destina a vinhaça que não foi utilizada na fertirrigação	Custo		Problemas de incrustação e cristalização em equipamentos	Custo
Pode gerar água para usina	Custo			
Pode melhorar a qualidade da vinhaça para fertirrigação	Custo			
Pode ser utilizado na alimentação de gado	Custo			
PRODUÇÃO DE BIOGÁS				
Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Aumento da demanda energética.	Externo		Elevado Investimento	Custo
Aumento da demanda por biocombustíveis.	Externo		Reator tempo de retenção muito longo.	Tecnológico
Fonte Renovável	Ambiental		Produção de gases corrosivos	Custo

Remove elevado teor orgânico da vinhaça	Ambiental		Produção de gases com dor desagradável	Custo
A vinhaça biodigerida permanece com características fertilizantes	Custo		Falta de legislação contra a fertirrigação.	Político
Pode ser utilizado para gerar energia elétrica e vapor	Custo		Necessita de grandes volumes para ser viável	Custo
Pode produzir o biometano	Custo			
São produtos semelhantes aos já produzidos pelas usinas (energia elétrica e combustível)	Organizacional			
Pesquisas com gás de xisto sobre uso em motores pesados	Externo			
PRODUÇÃO DE LEVEDURAS				
Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Nova fonte de renda.	Custo		Necessidade de adição de sais de amônio e magnésio na vinhaça	Custo
			Elevada demanda energética	Custo

Dentre as técnicas de aproveitamento da vinhaça, as duas mais discutidas foram fertirrigação e a produção de biogás. Essas duas oportunidades estão relacionadas por dois fatores principais. O primeiro é a possibilidade de mudanças na legislação ambiental tornando mais rigorosas as leis para aplicação da vinhaça no campo, o que se traduz num fator inibidor para fertirrigação e impulsionador para o biogás. O segundo é a provável utilização da tecnologia de segunda geração para produzir etanol 2G que, não só produziria mais vinhaça, como poderia produzir nos períodos úmidos, onde não há necessidade de fertirrigação. Já quando se vislumbra esse cenário para o biogás, a maior quantidade de vinhaça ajuda na viabilização do processo e surge o interesse de substituir o consumo de diesel pelo biometano, que deverá aumentar devido à coleta de palha no campo.

Diante dessa correlação, e levando em conta que os entrevistados não apontaram a técnica de concentração e produção de leveduras como promissoras, a análise sobre as categorias dos fatores impulsionadores e inibidores será voltada para a produção de biogás tendo como um de seus fatores inibidores o uso da fertirrigação.

Na Figura 21 e na Figura 22 são apresentadas respectivamente as categorias dos fatores impulsionadores e inibidores da produção do biogás.

Na Figura 21 é possível observar que existe uma boa distribuição de categorias que impulsionam a produção de biogás. Os fatores de custo e ambiental aparecem, mais uma vez, em consonância com o conceito de desenvolvimento sustentável. Os fatores externos e organizacionais estimulam a inovação tanto de fora para dentro do setor (externo) como dentro do próprio setor (organizacional), facilitando a assimilação da inovação pelo empreendedor.

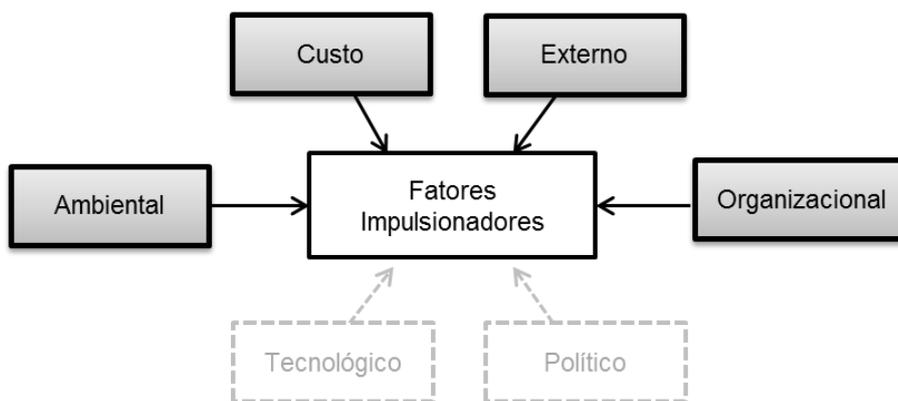


Figura 21: Fatores impulsionadores para a produção de biogás

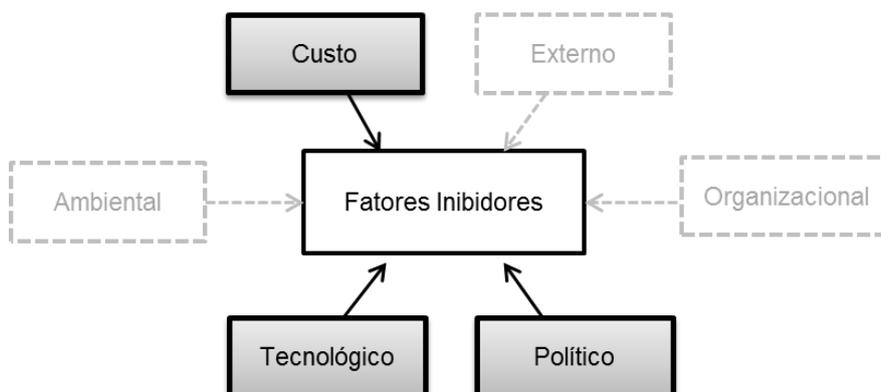


Figura 22: Fatores inibidores para a produção de biogás

Dentre os fatores inibidores, o de custo e o tecnológico estão relacionados, mas podem ser superados, de acordo com as informações de oportunidades de uso do biogás descritas nas entrevistas. O político, referente à legislação ambiental, parece ser o mais decisivo no confronto entre os fatores impulsionadores e inibidores já que, provavelmente, existirá uma resistência muito grande à produção de biogás enquanto a fertirrigação se mostrar satisfatória, lucrativa e sem aparentes danos ao ambiente.

Em resumo, pode-se dizer que as oportunidades relacionadas ao aproveitamento da vinhaça estão mais relacionadas com a necessidade de uma correta disposição desse material do que no potencial enxergado desse subproduto.

4.4 Processo de Produção de Etanol de Primeira Geração

Até aqui foram apresentadas oportunidades que geravam novas fontes de renda para a usina, como a venda da bioeletricidade, o etanol 2G e o biogás. No entanto, vale ressaltar neste estudo a importância de avaliar as oportunidades relacionadas ao processo tradicional de produção do etanol, ou de primeira geração.

Existe discussão sobre o tema uma vez que há uma discordância entre especialistas do setor sobre o potencial relacionado ao processo de primeira geração. A vertente que defende o esgotamento das tecnologias sucroenergéticas se baseia no desempenho alcançado pelas usinas em séculos de desenvolvimento, que quase atingem o máximo teórico. Dos que compartilham essa visão, muitos colocam as expectativas sobre o futuro do setor na tecnologia de segunda geração.

Já a vertente que defende o potencial da primeira geração, se baseia em novas tecnologias, menos radicais e mais incrementais, de processo, que possam não só aumentar a quantidade de açúcar convertido como também diminuir o custo com água, energia e mão-de-obra. Um fator agravante para essa discussão é a heterogeneidade das usinas produtoras de etanol no Brasil, que possuem níveis de tecnologias bastante variados.

Registros do Programa de Controle Mútuo, gerido pelo Centro de Tecnologia Canaveira (CTC), mostrou que 14,14% dos açúcares contidos no caldo da cana (ATR - Açúcar Total Recuperável) são perdidos em diversas partes do processo, como pode ser visto na Tabela 7. Para melhor compreensão das oportunidades no processo de primeira geração, a próxima seção se dedicará a explicar resumidamente o processo mais utilizado para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Tabela 7: Perdas de ART no processo de produção

Natureza das perdas de ART	Valor atual (%)	Contribuição (%)
Perda na lavagem de cana	0,47	3,32
Perda na extração	3,73	26,38
Perda na torta	0,54	3,82
Perda na fermentação	5,17	36,57
Perda na destilação (devido à vinhaça)	0,18	1,27
Perdas indeterminadas	4,05	28,64
Total	14,14	100,00

Fonte: CTC (2009).

4.4.1 Processo de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar

O processo de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar é bem homogêneo, variando principalmente a qualidade dos equipamentos e controles operacionais. A parte industrial de uma usina pode ser dividida nas seguintes unidades: recepção/preparo/moagem, tratamento do caldo, fábrica de açúcar, destilaria de etanol, utilidades, disposição de efluentes e estocagem dos produtos. A Figura 23 ilustra essas unidades.

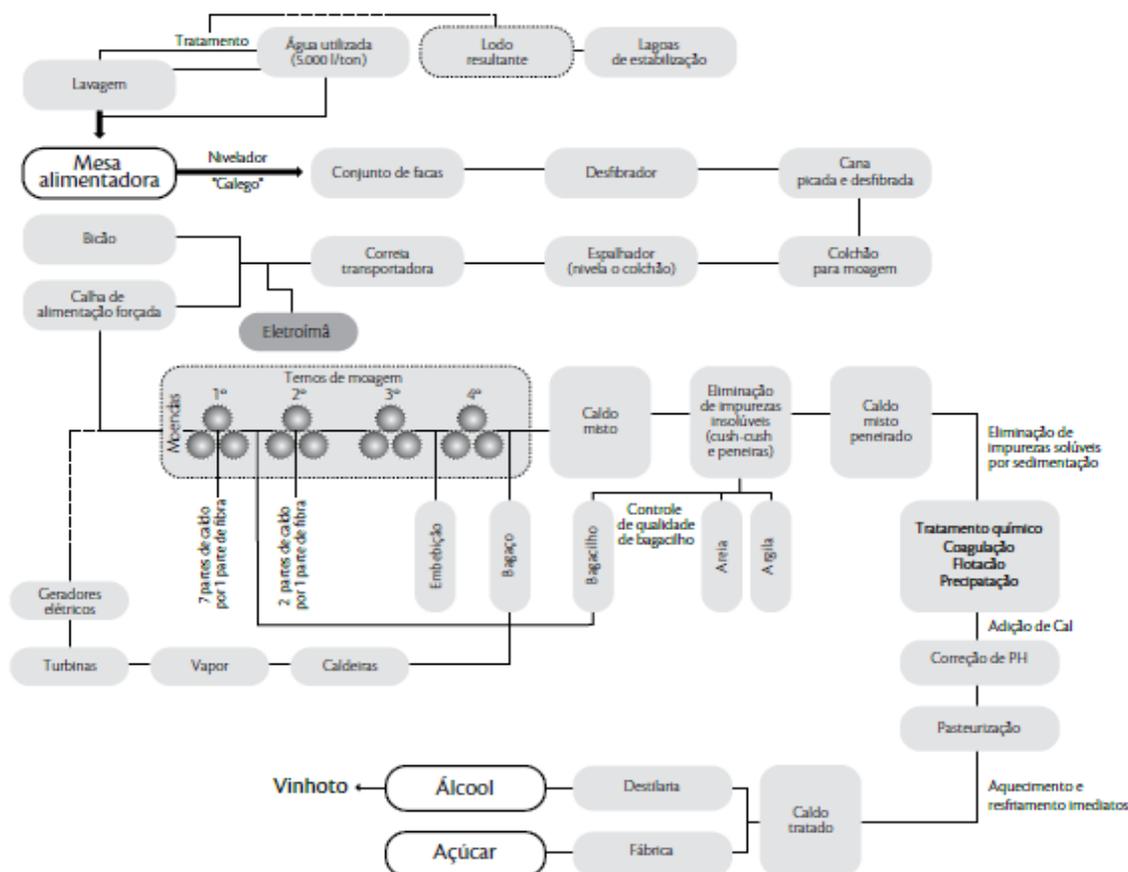


Figura 23: Processamento da cana para a produção conjunta de açúcar e etanol.

Fonte: CGEE (2009).

O processamento começa na seção de recepção/preparo/moagem onde ocorrerá a limpeza e a abertura das células da cana. Nesta seção o objetivo é extrair o máximo de açúcar no caldo bem como reduzir a umidade final do bagaço (Lima & Marcondes, 2002).

A cana entra pela mesa alimentadora e em seguida passa pelo conjunto de facas e um desfibrilador para ser picada e pulverizada, respectivamente. Essa etapa permite a abertura das células da cana onde estão contidos os açúcares. Na saída do

desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada por um equipamento denominado espalhador. Esse colchão então é transportado por uma esteira até o conjunto de moendas (LIMA & MARCONDES, 2002).

De acordo com Lima & Marcondes (2002), os principais objetivos do preparo da cana para moagem são:

- Aumentar a capacidade das moendas pelo aumento da densidade da massa de alimentação, tornando-a compacta e homogênea;
- Romper a estrutura da cana, fazendo com que a extração do caldo pela moagem seja mais fácil e eficiente;
- Produzir um bagaço que, sob a ação da embebição, seja mais eficaz.

Na moenda, a cana passa através de rolos com uma pressão pré-estabelecida onde o caldo é extraído. A moenda é formada geralmente de quatro a sete ternos em série, onde a proporção do caldo em relação à fibra cai de aproximadamente 7 para 2-2,5 (Lima & Marcondes, 2002). Um artifício utilizado para extrair esse caldo remanescente é chamado de embebição, que nada mais é do que a injeção de água entre os últimos dois ternos. Com esse artifício a extração de açúcar varia de 94% a 97,5% e a umidade final do bagaço fica em torno de 50% (CGEE, 2009). A umidade do bagaço deve ser controlada para que permita sua utilização como combustível nas caldeiras.

Depois de extraído o caldo deve ser tratado por conter diversas impurezas que prejudicam tanto o processo de produção de açúcar quanto de etanol. A primeira fase do tratamento é destinada a remover as dispersões grosseiras, ou sólidos insolúveis, como areia, argila e bagacilho. Essas dispersões grosseiras são removidas utilizando um sistema de peneiramento. A segunda fase é o tratamento químico, cujo objetivo é remover as impurezas solúveis e coloidais, como graxas, ceras e proteínas, através de um processo de clarificação (LIMA & MARCONDES, 2002). É necessário ainda fazer correção do pH para evitar inversão e decomposição da sacarose (CGEE, 2009).

O caldo tratado é então levado para a destilaria, onde é aquecido para ser esterilizado. Em seguida sofre pré-resfriamentos por evaporação instantânea em câmaras de expansão, é decantado e filtrado. Antes de ser fermentado, o caldo ainda precisa ser concentrado através de evaporadores de múltiplos efeitos (CGEE, 2009).

Para a fermentação, dois processos estão disponíveis, provados e amplamente difundidos na região Centro-Sul: a fermentação em batelada alimentada com reciclo e reativação de fermento e a fermentação contínua múltiplo estágio com reciclo e

reativação de fermento. No estudo realizado pelo NIPE-UNICAMP para o CGEE (2009), é destacado que a fermentação contínua é a tecnologia mais adequada uma vez que traz vantagens em custo instalado, custos referentes à mão-de-obra e energia envolvidas no processo, e vantagens relacionadas ao controle operacional, instrumentação e automação.

Por fim, o etanol é separado através de um sistema de destilação e retificação. Dependendo se o objetivo é a produção de etanol anidro ou hidratado, inclui-se a etapa de desidratação. A Figura 24 mostra as etapas específicas de uma destilaria.

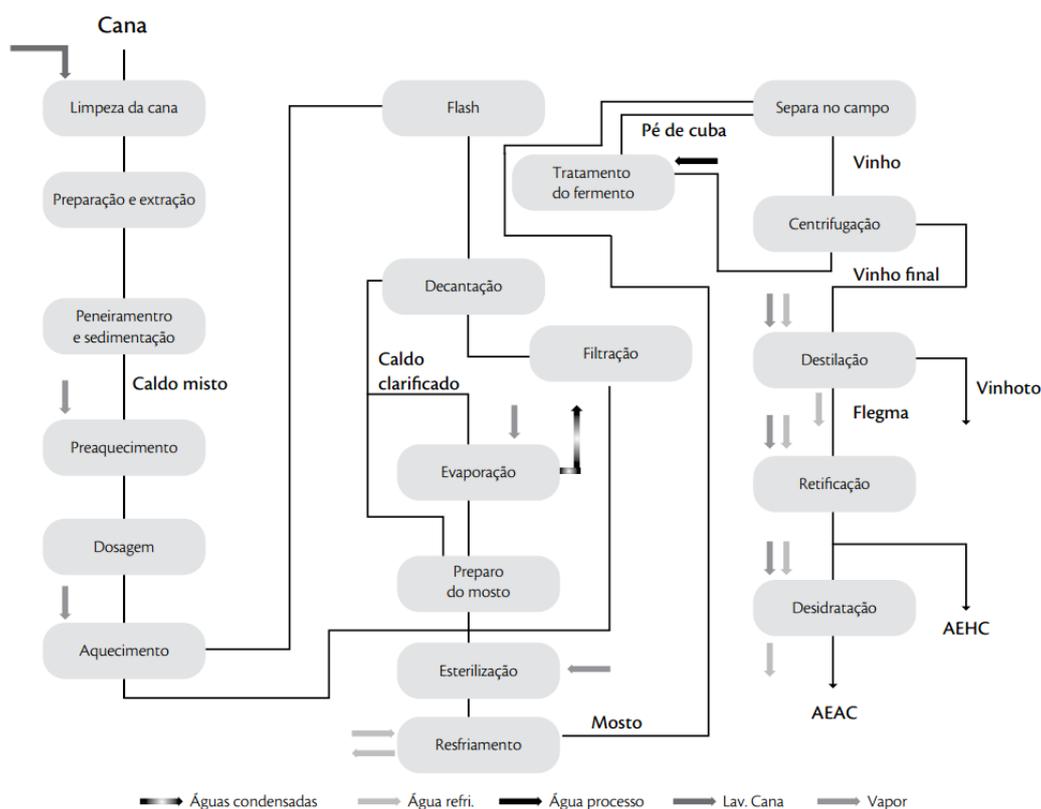


Figura 24: Esquema do processo de uma destilaria autônoma. Fonte: CGEE (2009).

4.4.2 Oportunidades no processo de primeira geração

Fica claro logo de início, como se trata de inovações incrementais de processo, que as oportunidades são principalmente relacionadas à custo, uma vez que melhorias de processo sempre exigem uma análise de até quanto é possível investir na planta para ter pequenos incrementos de produtividade.

Independente da magnitude da oportunidade a ser aproveitada na tecnologia de primeira geração (1G), um estudo sobre esses potenciais é importante uma vez que se espera que esse setor passe a inserir novas tecnologias, como o etanol 2G, biogás, entre outros. Uma motivação sempre presente nessas novas tecnologias é o aproveitamento dos recursos já existentes na usina, como energia, água e equipamentos, para suprir, pelo menos em parte, suas necessidades. O melhoramento dos processos atuais não só favorece a recepção de novas unidades, como evita que certas práticas ineficientes se propaguem para essas inovações.

Observando a Tabela 7, onde constam as informações sobre as perdas de ART, é possível perceber que várias partes do processo têm perdas de açúcares, indicando oportunidades de inovação incremental. Nesta seção serão estudadas possibilidades de melhoria, focando principalmente nas etapas de maiores perdas.

O processo de produção do etanol se inicia na recepção e lavagem da cana. Nesta etapa ocorre uma perda de açúcares que pode ser minimizada se a limpeza da cana for realizada a seco no lugar da lavagem. De acordo com empresas fornecedoras de equipamentos para o setor sucroenergético (SIMISA E ZANINI, 2014), a limpeza a seco oferece diversas vantagens, tais como:

- Economia no uso de água;
- Redução de impurezas minerais na indústria;
- Ganhos na cogeração;
- Redução no consumo de potência dos equipamentos;
- Eficiência de remoção de impurezas de 40-70%;
- *Layout* compacto;
- Baixo custo de manutenção e operação;
- Melhoria na qualidade do caldo clarificado;
- Melhoria no processo fermentativo;
- Melhoria na qualidade do açúcar;

Os processos de preparo e extração são responsáveis por 26,38% do total de açúcar perdido na planta (Tabela 7). Este valor pode ser reduzido com algumas mudanças no processo, como o aprimoramento dos conjuntos de moagem e a introdução de difusores com maior potencial de extração.

O difusor promove a extração através de um processo de osmose, ao passo que na moenda o caldo é extraído por pressão. Essa diferença promove algumas vantagens

para o difusor como: maior rendimento de extração, menor pol (quantidade de sacarose) no bagaço, maior economia de energia, menores custos de investimento, instalação e manutenção, aumento da flexibilidade de operação e menor risco de infecções no caldo (NAZATO *et al.*, 2011; SERMATEC, 2014).

No estudo realizado por Nazato *et al.* (2011), foram feitas análises comparativas entre a utilização do moenda e do difusor, conforme mostrado na Tabela 8:

Tabela 8: Comparação entre moenda e difusor.

ATRIBUTO	DIFUSOR	MOENDA
Extração	Por osmose; Capacidade de extração de 97,5% a 98,5% de caldo; POL% variando entre 0,7% a 1%, não excedendo este limite.	Por pressão; Extração em torno de 96,5% a 97,5%; Variação da POL% girando em torno de 1,6% a 2,3%.
Qualidade da Matéria-Prima	Extração deficiente quando a matéria-prima possui baixo teor de fibra.	Não há dificuldade de extração relacionada à qualidade da matéria-prima.
Índice de Preparo da Matéria-Prima (Desfibramento)	Para eficiência satisfatória é obrigatório um índice de preparo de 90% a 92%.	Este índice não precisa ser alto, podendo variar entre 80% e 92% para o mesmo grau de eficiência.
Caldo	O caldo obtido é mais limpo e parcialmente clarificado, devido às impurezas retidas pelo bagaço.	Há bagacilho contido no caldo. Porém após peneiramento este caldo pode seguir para o setor de fabricação.
Bagaço	O bagaço é ruim para queima, pois contém muitas impurezas e alta umidade.	Bagaço excelente para queima (pouca umidade).
Embebição	Para o mesmo nível de extração, o grau de embebição é o mesmo para ambos.	

ATRIBUTO	DIFUSOR	MOENDA
Balanco Energético	Geração de 60MW e consumo de 12MW. Saldo = 48MW.	Geração de 40MW e consumo de 40MW. Saldo = 0MW.
Custo Inicial	Possui custo inicial maior.	Há a possibilidade de expansão dos ternos conforme a necessidade /desejo.
Manutenção	Manutenção fácil e de baixo custo	Manutenção difícil e de alto custo.
Flexibilidade Operacional	Dependente da aceleração gravitacional, obrigando uma velocidade fixa de operação; Processo contínuo e automático, onde interrupções frequentes não são interessantes; Não necessita de funcionários especializados.	Não apresenta problemas com interrupções; Exige funcionários especializados em tal processo.
Espaço Físico	Exige maior espaço horizontal, podendo ser instalado ao ar livre.	Exige estrutura predial.
Mercado Consumidor	Modelo pouco utilizado no Brasil, porém em ascendência.	Modelo ainda priorizado nas usinas brasileiras.

Fonte: NAZATO *et al.* (2011).

A etapa da fermentação, como pode ser visto na Tabela 7, é a parte com maior perda de açúcares da cana, 5,17%, o que corresponde a uma contribuição de 36,57% no total perdido. Para reverter esse quadro, o estudo realizado pelo NIPE-UNICAMP para o CGEE (2009) mostrou que através de aprimoramentos no processo é possível atingir uma eficiência de conversão de 91,5%. Essas mudanças podem ser resumidas nas seguintes ações:

- Reformulação do processo de tratamento de caldo e preparo de mosto para remoção de matéria em suspensão e esterilização do mosto;
- Introdução da dupla centrifugação para eliminação de micro-organismos contaminantes;
- Otimização dos sistemas de resfriamento para redução da temperatura de fermentação (dos atuais 34-35°C para no mínimo 30°C);
- Operação com alto grau alcoólico final (no mínimo até 12-13°GL), com redução do volume de vinhoto e do consumo energético na destilação;
- Reativação do fermento de forma que permita estabilidade operacional;
- Fermentação com linhagens selecionadas de levedura;
- Eliminação do emprego do ácido sulfúrico;
- Banimento do emprego de antibióticos;
- Introdução de monitoramento através de sensores e automação do processo

Quanto aos processos de destilação em uso, a tecnologia empregada nas destilarias foi desenvolvida para produção de etanol industrial a partir de melaço, operando com baixo grau de automação, aparelhos de porte pequeno, exigindo múltiplas unidades para atender a capacidade da destilaria padrão. Os sistemas em operação atualmente têm limitações para redução do consumo energético. A maioria das unidades emprega a desidratação por destilação azeotrópica com ciclohexano em um único estágio (CGEE, 2012).

Na destilação, as perdas de açúcares são bem pequenas, apenas 1,27% do total. No entanto, a reformulação da destilação é crítica para redução do consumo de vapor de processo, podendo assim disponibilizá-lo para a pré-concentração do caldo, necessária para operar a fermentação em alto grau alcoólico. Essa redução do consumo de vapor é determinante para geração de excedentes de bagaço e de energia elétrica, assim como para viabilizar a operação de processos de concentração térmica de vinhoto, considerando que sua introdução é necessária para reduzir o volume de efluentes e a captação de água para o processo. Alternativas para melhorar o processo de desidratação são: realizar o processo com dois ou três efeitos, destilação extrativa com MEG (mono-etileno-glicol), pervaporação através de membranas e utilização de peneiras moleculares (CGEE, 2009).

Outro potencial das tecnologias de primeira geração está relacionado com a geração e aplicação da energia produzida pela queima do bagaço. Em uma destilaria, as necessidades energéticas envolvem demanda de calor, energia mecânica e energia elétrica. Como existem oportunidades relacionadas tanto com a venda desse

excedente de energia, como com a utilização desta para sustentar novos processos, uma análise sobre a possibilidade de otimizar esse teor energético se torna importante.

O bagaço de cana, atualmente empregado como combustível em todas as usinas do país, é consumido em sistemas a vapor que, ao operarem com maior eficiência, propiciam a redução do consumo de combustível e/ou aumento da geração de excedentes de eletricidade. A substituição das antigas turbinas de simples estágio por turbinas multi-estágio, de maior eficiência, vem ocorrendo em muitas usinas e destilarias, o que possibilita esse aumento da geração de excedentes (DANTAS, 2013).

Diante dessas oportunidades na primeira geração, o estudo realizado pelo Centro de Gestão e Estudo Estratégicos - CGEE (2009) estimou um cenário visando um aproveitamento dessas oportunidades para o ano de 2025. Foram verificados indicadores de desempenho para a tecnologia industrial, Tabela 9, e para a tecnologia energética, Tabela 10, incluindo as ações que devem ser tomadas para se atingir as metas.

Tabela 9: Indicadores de desempenho da tecnologia industrial

Indicador de Desempenho	Valor atual	Meta 2025	Ações
Perdas na lavagem de cana	0,47%	0%	Eliminação da lavagem; limpeza a seco
Extração de açúcar	96,3%	97,5-98%	Melhorias na moagem
Perdas na torta de filtro	0,54%	0,25%	Melhoria operacional
Rendimento fermentativo	89,7%	91-92%	Otimização da fermentação
Grau alcoólico do vinho	8,4°GL	10-12°GL	Redução da temperatura de fermentação
Relação vinhaça/etanol	11,9	9,5 – 7,9	Aumento do grau alcoólico do vinho
Teor de álcool na vinhaça	0,036%	0,015%	Introdução de sensores e automação
Produtividade de Álcool	83 l/tc	95 l/tc	Trabalho de desenvolvimento tecnológico
Produção de álcool anidro e hidratado*	Álcool anidro 7,8 milhões m ³ /ano	Total: 36,9 milhões m ³ /ano	Melhorias nas diversas etapas da produção
	Álcool Hidratado 8,2 milhões m ³ /ano		
	Total: 16 milhões m ³ /ano		
Eficiência Global	82,3%	89,5%	Melhoria da eficiência no tratamento do caldo e na destilação. Redução de perdas indeterminadas.

Fonte: CGEE (2009)

Tabela 10: Indicadores de desempenho da tecnologia energética

Indicador de Desempenho	Valor atual	Meta 2025	Ações
Produtividade energética	7,5 tep/ha*	9,8 tep/ha**	Melhoramento genético; Hidrólise ou geração de energia elétrica a partir do bagaço e da palha
Energia elétrica gerada	26,33 kWh/tc	Até 159 kWh/tc	Utilização da palha em caldeiras; Recuperação da palha; Maior eficiência de equipamentos; Aumento da pressão e da temperatura do vapor gerado
Energia elétrica consumida	15,58 kWh/tc	12,00 kWh/tc	Maior eficiência no uso da energia elétrica;
Consumo de vapor	480 kg/tc	372 kg/tc	Utilização da palha em caldeiras; Recuperação da palha; Redução da demanda de vapor do processo
Pressão de operação das caldeiras	22 bar	90 bar	Investimentos em novas tecnologias do setor; Aumento da escala de produção de caldeiras mais eficientes e que operam a maior pressão.
Bagaço excedente	8,6%	0%	Hidrólise e geração de energia elétrica usam todo bagaço
Cana – participação na Matriz Energética	12%	14%	Hidrólise do bagaço; Melhoria genética; Na matriz energética brasileira há dois aspectos a considerar: manter a competitividade do bioetanol em relação à gasolina, e gerar quanto mais eletricidade possível; o bioetanol exportado não é considerado na matriz

Fonte: CGEE (2009).

As oportunidades voltadas para a primeira geração mostradas neste trabalho são apenas alguns dos melhoramentos que podem ser realizados nas plantas sucroenergéticas do país. Por não serem inovações radicais, essas pequenas inovações incrementais podem se espalhar por toda a extensão do processo.

4.4.3 Opinião dos especialistas sobre oportunidades no processo de primeira geração

Quando questionados sobre as oportunidades de inovação no setor sucroenergético, poucos foram os entrevistados que fizeram comentários sobre o processo de primeira geração. Essa reação já era esperada, uma vez que as oportunidades na primeira geração têm características muito mais incrementais.

Apesar do aspecto mais incremental, e da tradição desse setor no país, a maioria dos entrevistados foi categórica em afirmar que existem diversas oportunidades de melhoramento no processo de primeira geração. As etapas mais citadas foram extração, fermentação, evaporação e destilação. A possibilidade de uma otimização energética também foi citada várias vezes, muitas inclusive fazendo relação com uma

possível integração do processo de primeira e segunda geração para produção do etanol. Segue abaixo alguns dos comentários sobre as oportunidades na primeira geração.

Existe [um potencial na primeira geração], e ele é grande. Agora, é uma indústria que a gente pode chamar de madura eu até pós-madura (...). Da parte industrial, o sistema de extração, ele tem um nível de extração relativamente alto só que gasta muito material e gasta muita energia. Eu vejo na parte de fermentação também muita coisa para melhorar, muita coisa também na parte de aproveitamento térmico (Especialista 2 da indústria).

A eficiência energética é uma grande oportunidade do 1G (Especialista 1 da política).

A fermentação também tem muito que melhorar, até no sistema de fermentação e não necessariamente o biocatalisador. Hoje você tem empresa que faz a fermentação em 8h, mas tem empresas que falam que é melhor fazer em 6h, reduzindo o nível de conversão, mas você conseguiria rodar mais rápido e otimizar essa saída (Especialista da política 3).

A etapa de evaporação é o coração da usina, pois gasta muita energia e gera outras correntes. É uma área que mexe com todo o balanço da usina (Especialista 4 da indústria).

Você vai numa área de destilação hoje de uma usina, ela não roda com simulador de processo dinâmico, nem estático, via de regra. E não tem esse controle. Há vinte anos, isso era normal na indústria de petróleo (Especialista 4 da indústria).

Você não tem hoje no setor uma forma confiável e estabelecida de medir rendimento de fermentação (...). Aí você me pergunta, tem alguma inteligência de processo para medir rendimento de fermentação? – Não. (Especialista 4 da indústria).

O especialista 4 da indústria chama a atenção para a abrasividade da cana-de-açúcar, e que existe uma enorme oportunidade em buscar soluções na ciência dos materiais:

A parte de engenharia de materiais é ignorada completamente. Toda a cana vai passar por metal. Quem está estudando liga aqui? Para esse setor? – Ninguém. A cana corrói muito. Ela é muito abrasiva.

O especialista 4 da indústria levanta uma questão importante sobre como são encaradas as inovações incrementais pelo setor. Ele discute que existe uma resistência para inovar quando ela é limitada ao investimento em capital, por diversas razões, inclusive a crise que o setor vem enfrentando desde 2009. No entanto, que não é apenas por investimento de capital que é possível ter grandes soluções para a primeira geração. A opção de serviços voltados para automação e gestão de dados se apresenta como uma ótima oportunidade:

Às vezes você parte do pressuposto que a única solução é em investimento de capital. Essa é uma hipótese que eu não considero válida. Você tem hoje várias opções de serviços que têm demonstrado que essa não é a única alternativa. Tem gente que fala – compra uma moenda nova – aí realmente fica difícil em investir. Mas você tem gestão de serviços na área de automação, gestão de dados. Ninguém está olhando isso. Isso não é investimento de capital. Às vezes o pessoal já tem o equipamento apropriado, mas faltam serviços.

O especialista ainda faz uma análise sobre outras indústrias que tiveram várias inovações, sem necessariamente terem feito um investimento em capital. No comentário a seguir, essa análise é ilustrada com a indústria de petróleo.

Como você tem campos de petróleo que já tinham que ter parado, que já tinham que estar na fase de declínio e que estão produzindo muito bem. E aí você vai vê que o que mudou foi em processo. Será que a indústria da cana é assim tão diferente de todas as outras que a gente não possa comparar? Eu acho que não.

Uma discussão que apareceu em vários tópicos da entrevista foi a heterogeneidade tecnológica do setor. No caso da primeira geração, essa diferença ficou bem clara pelos comentários dos especialistas, mostrando que o tamanho do potencial de inovação na primeira geração vai depender de que tipo de usina se está lidando, e que para usinas muito eficientes, apesar dessas inovações existirem, o investimento pode não ser interessante. Para exemplificar essa conclusão, seguem dois comentários do especialista 6 da indústria e um do especialista 3 da pesquisa.

Tem usina que é tão antiga que é melhor construir uma nova do que tentar reformar. (...) Tem usina que tem o sistema de controle semelhante aos de processamento de petróleo. Tem usina que não tem nada. Nada mesmo. São só as pessoas.

As usinas mais modernas, para ter um aumento de 0,5-1% devem investir grandes quantidades (...) realmente as mais modernas já estão com as eficiências muito altas, mas pode aparecer alguma coisa de melhoria. Agora, pensar e chegar aos 100% é muito difícil.

Se você jogar um engenheiro em uma usina, que nunca tenha entrado em usina, ele não vai conseguir fazer a planta rodar, por que não tem automação, não tem controle, então é muita experiência de chão de fábrica.

Em resumo, pode-se dizer que os entrevistados enxergaram claras oportunidades de melhoramento no processo de primeira geração, mesmo em usinas com altos padrões de processamento. No entanto, não se pode deixar de considerar que essas oportunidades vão variar muito devido à heterogeneidade tecnológica do setor.

4.4.4 Fatores impulsionadores e Inibidores para o processo de produção de etanol de primeira geração

Como já foi dito no início dessa seção, e enfatizado nas entrevistas, várias inovações incrementais foram identificadas para a primeira geração. No entanto, em relação a essas inovações, a usina tem o foco voltado principalmente para o custo, tanto como fator impulsionador (aumento de produtividade ou redução dos custos) como inibidor (custo do investimento). O resumo dos fatores impulsionadores e inibidores pode ser visto na Tabela 11.

A possibilidade de otimizar o processo de primeira geração para incluir uma planta de segunda geração, a princípio, parece um fator impulsionador interessante. No entanto, esse fator foi pouco comentado durante as entrevistas e não se apresentou como um forte influenciador para as inovações incrementais no processo de primeira geração.

Tabela 11: Fatores impulsionadores e Inibidores para Oportunidades no Processo de Primeira Geração.

Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Ganhos de rendimento (etanol, açúcar e energia)	Custo		Investimento em capital	Custo

Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Redução de gastos com mão-de-obra (automação de processo)	Custo		Investimento em serviços (principalmente voltados para automação de processos)	Custo
Redução de gastos com manutenção (novos equipamentos e novos materiais)	Custo			
Facilitação da inserção de novas tecnologias	Custo			

A Figura 25 e a Figura 26 resumem os fatores impulsionadores e inibidores para as inovações incrementais no processo de primeira geração.

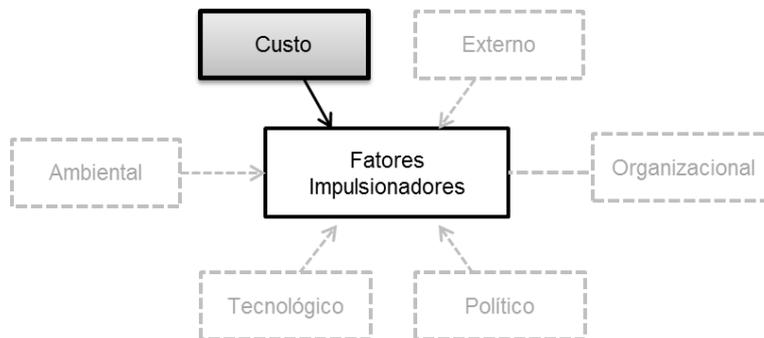


Figura 25: Fatores impulsionadores para a primeira geração.

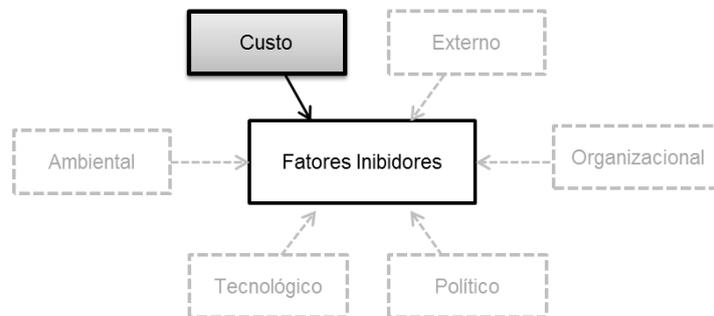


Figura 26: Fatores inibidores para a primeira geração.

Analisando as entrevistas não há dúvidas de que existem oportunidades no processo de primeira geração. A questão principal que determina o aproveitamento dessa oportunidade é o alto custo relacionado com pequenos incrementos de produção. De acordo com os especialistas, as usinas parecem mais dispostas a considerar, por exemplo, grandes investimentos no etanol de segunda geração, que apresentam maiores riscos, porém maiores retornos, do que nas inovações incrementais envolvidas no processo de primeira geração.

No entanto, analisando a heterogeneidade tecnológica do setor, fica claro que algumas usinas investiram em tecnologias mais avançadas enquanto outras permaneceram com processos menos eficientes. A diferença entre elas está relacionada a um aspecto organizacional de como lidar com as inovações incrementais do setor.

Pode-se se concluir então que para superar os fatores inibidores de custo é necessário principalmente um fator organizacional, que enxergue essas oportunidades e consiga lidar com os riscos associados de forma a aproveitar plenamente o seu potencial produtivo.

4.5 Gaseificação

Nas seções anteriores foi discutida a possibilidade de utilizar a biomassa da cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração através de um processo de hidrólise seguido de fermentação, isto é, a produção de combustível através de uma plataforma bioquímica. No entanto, alternativas existem em contraponto às rotas bioquímicas, como no caso das rotas termoquímicas. Dentre os processos termoquímicos tem-se principalmente a combustão, a gaseificação e a pirólise.

A gaseificação aparece como uma das alternativas para a transformação da biomassa em produtos de maior valor agregado e foi reconhecida pelo governo brasileiro como uma das tecnologias de processamento dos resíduos da cana com grande potencial que, entretanto, precisa de incentivos para ser plenamente aproveitada. A inclusão da gaseificação no Plano PAISS 1 do BNDES mostra que existe um interesse em desenvolver a plataforma termoquímica juntamente com a bioquímica, no entanto, apenas uma empresa teve o plano de negócio selecionado para receber o incentivo.

De acordo com Rezaiyan & Cheremisinoff (2005), a gaseificação é um processo de conversão termoquímica que ocorre entre o oxigênio e uma substância constituída de carbono gerando gás de síntese. O carbono sofre oxidação térmica com oxigênio em quantidades inferiores à estequiométrica para a combustão completa. Dessa forma, o gás de síntese ou *syngas* (acrônimo de *synthesis gas*) gerado é constituído por componentes gasosos ainda passíveis de combustão, principalmente o hidrogênio (H₂) e o monóxido de carbono (CO).

A diferença entre a combustão, a gaseificação e a pirólise se dá principalmente pela quantidade de oxidante utilizada. Enquanto a pirólise é realizada na ausência de oxidantes, e a combustão com excesso de oxidantes, a gaseificação utiliza quantidades abaixo da estequiométrica para a reação com o carbono. Em relação aos produtos gerados, a pirólise produz compostos líquidos, a combustão gera calor e subprodutos gasosos, essencialmente gás carbônico (CO₂) e vapor de água (H₂O) e a gaseificação, como foi dito, gera o gás de síntese. O gás de síntese pode ser utilizado na geração de energia como combustível para produção de vapor em caldeiras de processos termoeletrônicos, como fonte de hidrogênio e como matéria-prima de processos para síntese química (CASTRO, 2009).

O processo de gaseificação da biomassa é resultante de diversas e complexas reações ainda não bem conhecidas em sua totalidade, no entanto, em termos teóricos,

a gaseificação pode ser dividida em 5 processos: pirólise ou decomposição térmica, oxidação do carbono fixo do combustível, gaseificação propriamente dita, craqueamento do alcatrão e oxidação parcial dos produtos da pirólise (CENBIO, 2002).

Os primeiros estudos envolvendo a tecnologia de gaseificação iniciaram em meados do século XIX e suas primeiras aplicações estiveram associadas à iluminação pública. No entanto, com o desenvolvimento da indústria de energia elétrica, a crescente oferta de petróleo a preços reduzidos e, ainda, o desenvolvimento da indústria de gás natural, a utilização da rota tecnológica da gaseificação de combustíveis sólidos se tornou marginal (DANTAS, 2013). Entretanto, a partir da década de 1970, verificou-se um aumento do interesse pela gaseificação da biomassa. Essa mudança ocorreu principalmente devido aos choques do petróleo da década de 1970 e posteriormente à necessidade de expansão da oferta de energia em bases sustentáveis para a mitigação dos efeitos nocivos do setor energético sobre o meio ambiente (LORA *et al.*, 2009).

Hoje, a gaseificação tem aplicação voltada para a geração de energia e para a produção de compostos à base de carbono e hidrogênio. Segundo Rezaiyan & Cheremisinoff (2005), os fatores atrativos dessa tecnologia incluem:

- A habilidade de gerar um produto consistente que pode ser utilizado para geração de energia ou como intermediário químico para a produção de químicos e combustíveis para transporte;
- A habilidade de processar uma vasta gama de matéria-prima, como carvão, óleos pesados, coque de petróleo, resíduos de refino, sólidos contaminados de hidrocarbonetos, biomassa e resíduos da agricultura;
- A habilidade de remover contaminantes da matéria-prima e produzir um gás de síntese limpo;
- E a habilidade de converter resíduos, ou produtos de baixo valor agregado, em produtos de alto valor agregado.

Apesar de a gaseificação ser uma tecnologia capaz de processar diversas matérias-primas, ainda existem problemas que inviabilizam a disseminação dessa tecnologia em escala comercial para processamento de biomassa. De acordo com Lora *et al.* (2009), os principais entraves para utilização da gaseificação da biomassa são:

- Pré-tratamento e condicionamento da biomassa polidispersa: a biomassa precisa ter propriedades físicas e químicas compatíveis com o processo de conversão térmica;
- Limpeza e condicionamento do gás: os gases precisam ser tratados e purificados física e quimicamente para estarem aptos a serem utilizados na geração de eletricidade ou em sínteses catalíticas para a produção de combustíveis líquidos;
- Controle do processo: controle operacional e das emissões;
- Materiais de construção dos sistemas: novas rotas apontam para uma trajetória promissora, no que se refere ao uso de novos materiais para reatores, recipientes e peças;
- Integração dos processos: trata-se da integração das plantas de gaseificação a unidade de geração de energia elétrica, acionamentos primários, ou às biorrefinarias.

É importante observar que as variáveis do processo de gaseificação, como: tipo de alimentação, agente gaseificador, tipo de reator e produto final, às vezes possuem objetivos conflitantes, que dificultam na formulação do processo. Por exemplo, Dantas (2013) afirma que para atendimento de demandas térmicas é suficiente a produção de um gás de média qualidade, já para a produção de combustíveis, é necessário um gás de maior qualidade, o que pode depender diretamente do agente gaseificador ou do tipo de reator. Dessa forma, apesar da versatilidade teórica da gaseificação, a escolha da aplicação final do gás de síntese será decisiva para viabilização do processo.

Dentre as tecnologias voltadas para geração de energia elétrica através da gaseificação, Dantas 2013 e o CGEE (2009) destacam o sistema *Biomass Integrated Gasification – Gas Turbine Combined Cycle* (BIG/GTCC) como a tecnologia que possui os maiores níveis de eficiência. Esse sistema é derivado das tecnologias termoelétricas de ciclos combinados baseados em turbinas a gás. Para que tal tecnologia possa ser usada com emprego de combustíveis sólidos, como é o caso da biomassa da cana-de-açúcar, propõe-se a prévia gaseificação do combustível e a queima do gás resultante em turbinas a gás. A Figura 27 mostra uma representação esquemática desse sistema.

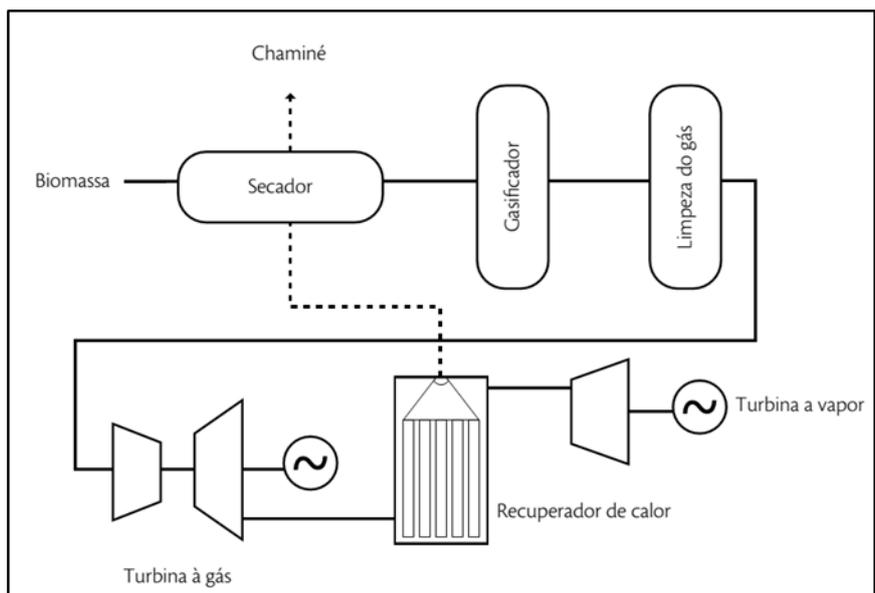


Figura 27: Representação esquemática de um sistema BIG-CC. Fonte: CGEE (2009).

No estudo realizado pelo CGEE (2009), os autores apresentam alguns dos principais projetos de demonstração da tecnologia BIG-CC. No entanto, destacam o insucesso de muitos dos destes, inclusive a planta brasileira prevista para ser construída na Bahia. De acordo com os autores, os projetos falharam pelo alto risco associado em função dos altos custos, o que é típico das primeiras plantas de demonstração e pela grande competitividade existente no setor elétrico em todo o mundo.

Apesar das dificuldades relativas à produção de energia elétrica através da gaseificação, esse processo ainda se apresenta como promissor no sentido de produzir combustíveis através da síntese de Fischer-Tropsch e outros produtos químicos, como pode ser visto na Figura 28.

Dentre as sínteses mais estudadas de utilização do *syngas*, a reação de Fischer-Tropsch se destaca pela possibilidade de produzir combustíveis quimicamente idênticos aos de origem fóssil. O processo recebe este nome devido aos cientistas Franz Fischer e Hans Tropsch que, em 1923, estudaram a conversão do gás de síntese (produzido por derivados de carvão) em produtos de maior valor agregado (SWAIN *et al.*, 2011). De acordo com Swain *et al.* (2011), o processo geral pode ser descrito simplificado em três etapas, cada uma utilizando um catalisador específico.

1. Formação do gás de síntese: Hidrocarboneto antigo + Oxigênio → Gás de Síntese
2. Reação de Fischer-Tropsch: Gás de Síntese → Novo Hidrocarboneto + Água

3. Refino: Novo Hidrocarboneto → Combustíveis e Químicos.

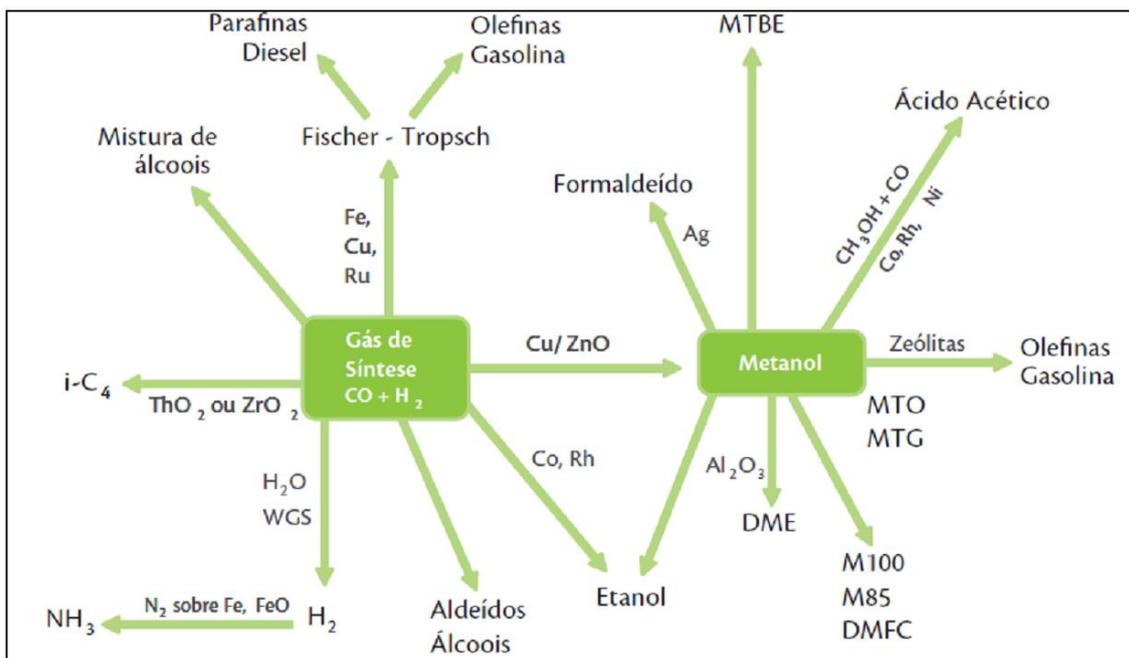


Figura 28: Rotas potenciais a partir do gás de síntese. Fonte: Aguiar e Silva (2010).

Alguns indicativos mostram que as possibilidades relacionadas à produção de combustíveis líquidos de Fischer-Tropsch e às sínteses de químicos verdes são muito promissoras. No CTC, por exemplo, existe uma linha voltada exclusivamente para o desenvolvimento de químicos a partir da gaseificação, e também, como foi dito no início do capítulo, no Plano PAISS 1 do BNDES, onde o último tópico da linha de gaseificação se dedica inteiramente ao desenvolvimento de catalisadores associados à conversão de gás de síntese em produto.

4.5.1 Opinião dos Especialistas sobre a Gaseificação

Como discutido anteriormente, a gaseificação é um processo versátil tanto em relação à matéria-prima utilizada, quanto ao produto final que pode ser gerado a partir do gás de síntese. No entanto, o setor sucroenergético em particular não parece enxergar a gaseificação como uma oportunidade muito promissora para inovação no setor.

A tecnologia de gaseificação poucas vezes era apontada como uma oportunidade e, quando essa tecnologia era mencionada, as expectativas dos especialistas das três áreas (política, pesquisa e indústria) eram bem semelhantes, voltadas mais para expor as dificuldades do que as vantagens.

O comentário do especialista 2 da indústria resume bem a opinião geral do grupo pesquisado.

As rotas térmicas, em geral, são sensíveis à escala (...) e o gaseificador é um pouco caro. Então você tem que ter uma certa escala para que isso seja viável. E se você trazer a biomassa de grandes distâncias isso vira uma deseconomia de escala (...) precisa transportar isso, então precisa primeiro de uma abordagem logística bem feita. Segundo, a qualidade desse gás de síntese tem que ser boa, tem que ver os requisitos catalíticos para cada produto que você quer fazer.

Pode ser verificado no final do comentário que o especialista discute a gaseificação com o objetivo de gerar outros produtos que não a energia elétrica. Essa foi a abordagem desenvolvida por todos os entrevistados que discutiram a questão da gaseificação, nenhum deles apresentou a gaseificação como uma oportunidade para geração de energia elétrica no setor sucroenergético.

Corroborando com a colocação do especialista 2 da indústria, o especialista 6 da indústria volta a comentar sobre dificuldade de custo relacionada à escala, e ainda apresenta a pirólise, outra tecnologia da plataforma termoquímica, como uma alternativa à gaseificação.

A gaseificação é factível tecnologicamente, mas tem problemas relacionados às dimensões dos equipamentos (...) Se o tamanho for pequeno, aumenta o custo e dificulta o retorno econômico. A pirólise talvez fosse melhor, parece que está mais próxima da viabilidade econômica.

De forma geral, todos os entrevistados reconhecem que a tecnologia poderia se adaptar bem ao contexto de biorrefinaria, no entanto seus raciocínios seguiram todos da mesma forma: reconhecendo a oportunidade, mas focando principalmente nas suas desvantagens.

Um discurso que foi repetido algumas vezes nas entrevistas foi a comparação da plataforma bioquímica com a termoquímica, tanto para produção de combustíveis – etanol 2G pela rota bioquímica e combustíveis de Fischer-Tropsch pela rota termoquímica – quanto para químicos. Foi de consenso geral que neste setor sucroenergético, a plataforma bioquímica tem mais destaque do que a termoquímica. Isso pode ser claramente constatado uma vez que todos os entrevistados apontaram o

etanol 2G como uma oportunidade, e a gaseificação, ao contrário, muitas vezes não era citada.

Apesar do pouco entusiasmo mostrado pelo setor em relação à tecnologia de gaseificação, alguns entrevistados da área da pesquisa deixaram claro que ambas as plataformas podem existir em uma mesma planta industrial, dando ênfase ao conceito de biorrefinaria, principalmente pela característica *drop in* (produtos idênticos aos produzidos por fonte fóssil) dos combustíveis gerados pela síntese de Fischer-Tropsch.

O comentário do especialista 1 da pesquisa resume bem essa “preferência” pela plataforma bioquímica, mas sem tomar a posição da plataforma termoquímica.

Essa tendência mundial mostra que a plataforma bioquímica, os processos bioquímicos, têm sido os mais escolhidos, mas tem aí uns 27% que usam plataforma termoquímica. Então tem espaço para eles também.

Diante das informações analisadas, parte-se na próxima seção para uma análise dos fatores impulsionadores e inibidores para a inserção da tecnologia de gaseificação no setor sucroenergético.

4.5.2 Fatores impulsionadores e inibidores para a gaseificação

No início dessa seção ficaram claras as oportunidades da gaseificação principalmente relacionada à sua versatilidade tanto para o processamento de diferentes matérias-primas quanto para a geração de diferentes produtos. No entanto, as opiniões dos especialistas não refletiram essas vantagens, alguns desafios parecem demasiado grandes para ser enfrentado pelo setor. Os principais fatores impulsionadores e inibidores detectados para o aproveitamento da gaseificação estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12: Fatores Impulsionadores e Inibidores para a Gaseificação

Fatores Impulsionadores	Categoria		Fatores Inibidores	Categoria
Oferta de biomassa	Custo		Necessidade de grandes escalas	Custo

Fatores Impulsionadores	Categoria	Fatores Inibidores	Categoria
Versatilidade da tecnologia (matéria-prima e produtos finais)	Custo	Pré-Tratamento da Biomassa	Custo
Produtos gerados a partir de fonte renovável	Ambiental	Limpeza e condicionamento do gás	Custo
Possibilidade de atingir nichos de mercados com químicos de fonte renovável.	Organizacional	Desenvolvimento de gaseificadores específicos para biomassa	Tecnológico
Produtos <i>drop in</i>	Organizacional	Definição dos produtos gerados	Organizacional
		Competição da utilização do bagaço para a cogeração e para o processo 2G	Organizacional

O primeiro fator inibidor, e muito destacado nas entrevistas, foi a questão da escala que deve ser alta, e que não se limita aos custos dos equipamentos e operação, mas também envolve uma questão de logística e manutenção de grandes quantidades de biomassa.

Alguns desafios relacionados ao processo também foram citados, principalmente o pré-tratamento da biomassa e a limpeza e o condicionamento do gás de síntese. O próprio gaseificador específico para biomassa ainda é um fator inibidor tecnológico a ser superado. Soma-se ainda a necessidade de uma clara definição do produto gerado para diminuir tais custos, o que minimiza consideravelmente a versatilidade da tecnologia.

Tem-se ainda, novamente, a discussão sobre a competição da biomassa da cana-de-açúcar, se para gaseificação ou para etanol de segunda geração. Se analisada a gaseificação para a produção de biocombustíveis, por um lado se tem a produção de

combustíveis *drop-in*, como o diesel de Fischer-Tropsch; por outro se tem a produção do etanol 2G através da hidrólise e fermentação. Obviamente que as rentabilidades de cada processo vão definir o mais atrativo, no entanto é evidente que existe uma facilidade, em termos organizacionais, de se produzir o mesmo produto – que pode utilizar mesmo sistema de armazenamento e distribuição, estratégias, mercados – do que um produto diferente.

Todavia, analisando a gaseificação para produção de químicos, está tecnologia oferece à empresa a possibilidade de diversificar sua gama de produtos atingindo outros mercados.

Na Figura 29 é possível verificar quais categorias foram consideradas mais influentes para a disseminação da gaseificação no setor sucroenergético. Observa-se que, a princípio, as características de custo e organizacional, além da ambiental, podem ser atrativas para as empresas do setor sucroenergético. Entretanto, é necessário um elevado investimento e um planejamento adequado do novo produto para que essa alternativa seja viável.

Na Figura 30 observam-se as categorias que mais se destacaram como fatores inibidores da gaseificação. Nota-se que fatores de custo, tecnológico e organizacional também entraram na avaliação dos fatores inibidores. No entanto, se analisado o grupo entrevistado, os fatores inibidores superam os impulsionadores, tendo como principal entrave o custo de todas as etapas da tecnologia.

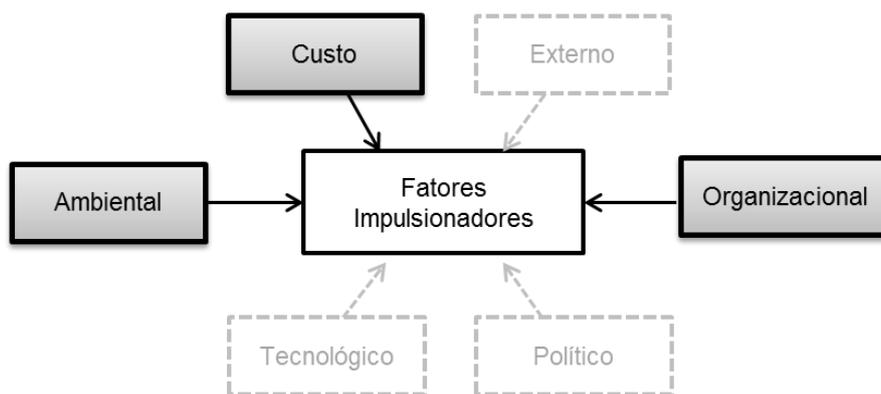


Figura 29: Fatores impulsionadores para a gaseificação

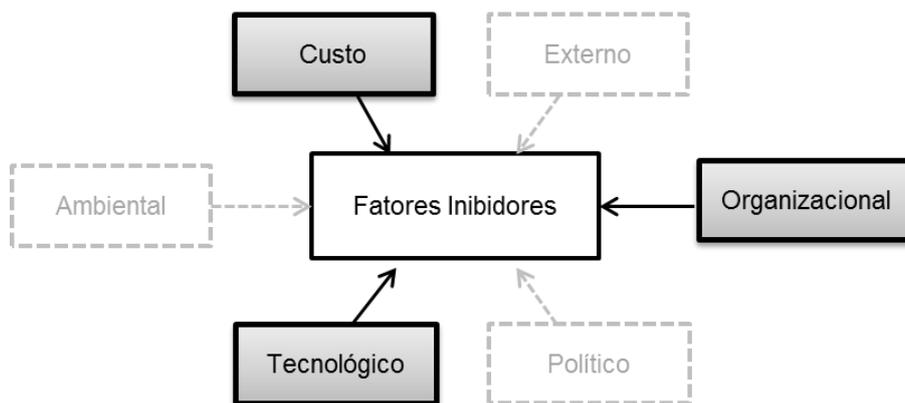


Figura 30: Fatores inibidores para a gaseificação.

Uma vez tendo sido detectado nas entrevistas que a cogeração e o processo de segunda geração para produção de etanol não competem diretamente pelo bagaço da cana – devido à oportunidade de aproveitamento da lignina para geração de energia – a gaseificação entra como uma tecnologia concorrente à utilização da biomassa, e que, pelas informações colhidas neste trabalho, não parece ser a mais promissora.

4.6 Novos produtos

Na seção anterior, foram discutidas as oportunidades relacionadas à gaseificação, a qual poderia ser utilizada tanto para fins energéticos, como energia elétrica e biocombustíveis, quanto não-energéticos, como químicos. No entanto, a linha temática 2 do PAISS intitulada *novos produtos de cana-de-açúcar*, enfatiza que o incentivo se refere ao desenvolvimento novos produtos obtidos a partir da biomassa da cana-de-açúcar por meio de processos biotecnológicos. Essa exigência ressalta a divisão entre as duas principais plataformas nas quais a biorrefinaria poderá se desenvolver: a plataforma bioquímica e a termoquímica.

Sendo assim, esta seção tem o objetivo de analisar de forma ampla a oportunidade relacionada à produção de novos produtos a partir da biomassa da cana-de-açúcar, com a atenção voltada para a plataforma bioquímica, uma vez que a plataforma termoquímica já foi brevemente abordada na seção anterior.

O desenvolvimento de novos produtos a partir da biomassa está diretamente relacionado com um movimento chamado de bioeconomia, ou indústria baseada em matérias-primas renováveis (*biobased industry*). Bomtempo & Alves (2014) apresentam alguns dos principais *drivers* para o surgimento dessa indústria, como o desenvolvimento expressivo da biotecnologia industrial, às restrições ambientais ao uso de matérias-primas fósseis, as orientações estratégicas voltadas para desenvolvimento de produtos de origem renovável por algumas empresas e a perspectiva de inovação tecnológica como saída de crise, isto é, a chamada *green economy* (do inglês, economia verde) como centro de recuperação da atual crise econômica.

Atualmente, cerca de 85% de todo o petróleo bruto consumido é utilizado para a produção de combustíveis de transporte. Esta é uma das razões para que a produção de biocombustíveis atraia mais atenção do que os *biobaseds* (produtos químicos não energéticos feitos a partir de fonte renovável). Em contrapartida, mais de 10% do óleo bruto é utilizado para a produção de produtos químicos industriais. Em termos gerais, estes produtos químicos têm valor agregado maior do que os combustíveis de transporte (CHRISTENSEN *et al.*, 2008).

Apesar da atratividade em termos de maior valor agregado dos químicos de origem renovável, as políticas públicas são mais frequentemente direcionadas para a

produção de biocombustíveis. No Brasil pode-se citar o exemplo da obrigatoriedade de adicionar um percentual de etanol na gasolina e de biodiesel no diesel.

O Brasil encontra-se em posição bastante privilegiada para assumir a liderança no aproveitamento integral das biomassas, pelo fato de ter um dos maiores potenciais de matérias-primas renováveis do planeta; pela grande disponibilidade de culturas agrícolas de grande extensão, com destaque para a indústria sucroenergética; intensa radiação solar; água em abundância; diversidade de clima e pioneirismo na produção de biocombustível em larga escala, como o etanol (CGEE, 2010).

De acordo com Bozell & Petersen (2010), o desenvolvimento da indústria de químicos de origem renovável representa um dos pilares para o sucesso de uma biorrefinaria. Os autores discutem que o desenvolvimento de uma biorrefinaria depende de duas metas estratégicas: a energética e a econômica. A energética foca na substituição do grande volume importado de petróleo para fins de transporte por biocombustíveis, como etanol, biodiesel e combustíveis avançados em geral, que estão associados a baixos preços e elevados volumes. Contudo, o investimento em operações focadas exclusivamente na produção de biocombustíveis pode apresentar uma barreira significativa para que se atinja a meta econômica. A produção de químicos a partir de biomassa, que estariam associados a baixos volumes e elevados preços, viria como um incentivo e uma solução para que ambas as metas, energética e econômica, fossem alcançadas.

Apesar das oportunidades referentes aos químicos a partir de biomassa, Bozell & Petersen (2010) também abordam os principais desafios à criação dessa indústria. De acordo com os autores, seriam principalmente dois desafios. Em primeiro lugar viria a ausência de tecnologia de conversão. A conversão do carbono renovável a produtos químicos envolvem operações de biorrefinaria pouco desenvolvidas e complicadas, especialmente quando comparadas com os processos de conversão disponíveis para os hidrocarbonetos não-renováveis.

Em segundo lugar, o que os autores chamam de “superabundância de alvos”. O desenvolvimento de uma biorrefinaria integrada ainda está no início, e ainda tem que identificar um grupo de produtos químicos primários e secundários análogos aos utilizados pela indústria petroquímica. A gama de alvos potenciais inclui estruturas já feitas pela indústria química, conhecidas como *drop-in*, bem como novas estruturas formadas a partir de intermediários químicos da biorrefinaria.

Como uma alternativa para enfrentar essas dificuldades, os autores propõem uma análise voltada para o processo e não para o produto. Pesquisas focadas em combustíveis tendem a investigar diversas tecnologias para produzir um número reduzido, ou até mesmo único, de biocombustível, como no caso do etanol, onde existem os processos de primeira e segunda geração. Dessa forma, os autores classificam as pesquisas de biocombustíveis como *convergentes*. No caso dos novos produtos, a abordagem deveria ser diferenciada, focando em um processo que produza um grande portfólio de produtos, sendo *divergente*. Essas duas análises podem ser vistas na Figura 31.

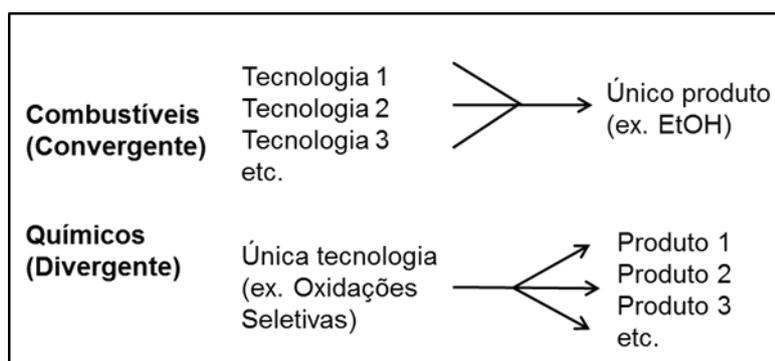


Figura 31: Abordagem de pesquisa para biocombustíveis e químicos de matéria-prima renovável. Fonte: Traduzido de BOZELL & PETERSEN (2010).

A principal vantagem dessa abordagem divergente é a flexibilidade de adaptação do portfólio de produtos de acordo com as mudanças do mercado. A desvantagem, no entanto, é a natureza de alto risco do seu investimento e a necessidade de um comprometimento em longo prazo (BOZELL & PETERSEN, 2010).

Christensen *et al.* (2008) apresentam o potencial dos produtos de fonte renovável através de uma análise sobre as possíveis rotas para a produção de diversas *commodities* químicas, idênticas ou não, às já produzidas pelas fontes fósseis. O resultado dessa análise pode ser observado na Figura 32.

Na Figura 32 é possível ver que, pelo menos quimicamente falando, as biomassas poderiam não só substituir as fontes fósseis para a produção de químicos como também permitir a geração de novos intermediários de alto valor agregado. O objetivo dos autores nesta análise é identificar estratégias para produção de *commodities* químicas a partir de renováveis, que pode ser direcionada para produtos idênticos aos de origem fóssil ou não, criando novos mercados.

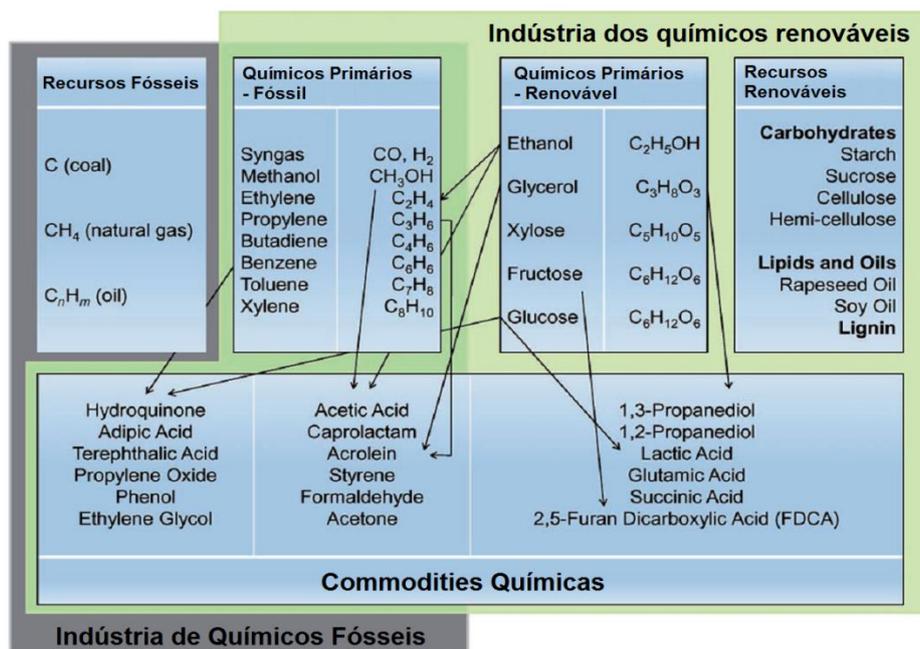


Figura 32: Estratégias para a produção de commodities químicas a partir de biomassa. Fonte: CHRISTENSEN *et al.* (2008).

Focando em produtos especificamente de matéria-prima lignocelulósica através de rotas bioquímicas, Pereira Jr. *et al.* (2008) estudaram possíveis produtos a partir de cada estrutura do material: celulose (Figura 33), hemicelulose (Figura 34) e lignina (Figura 35). Essas ilustrações enfatizam o importante papel da biomassa da cana-de-açúcar como matéria-prima para essa nossa indústria de *biobased*.

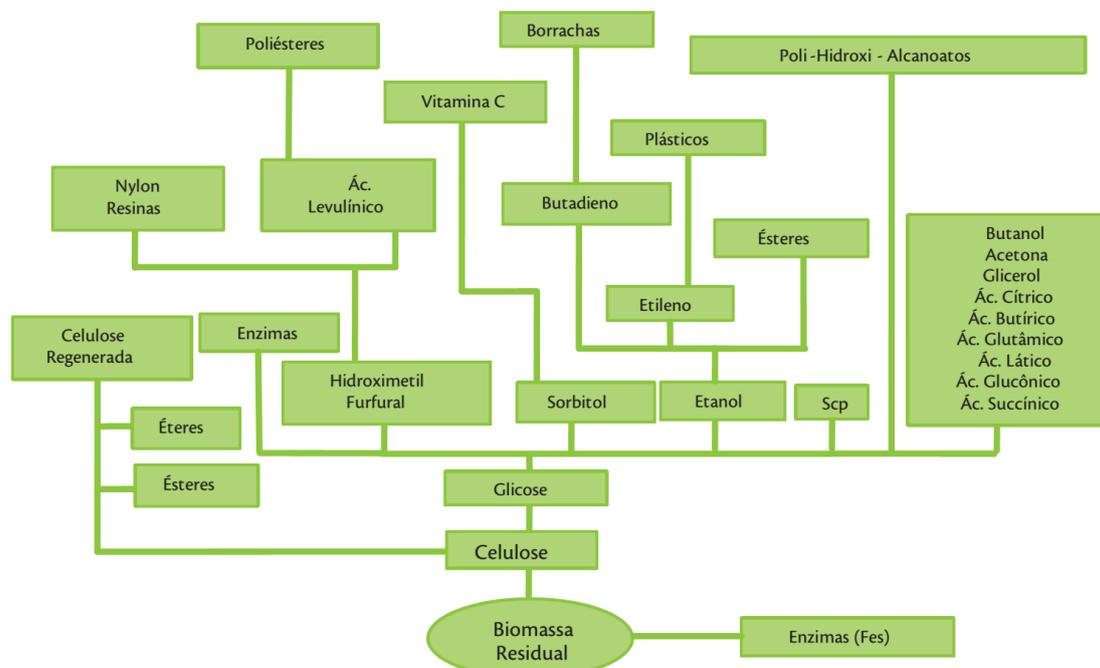


Figura 33: Produtos a partir da celulose. Fonte: PEREIRA JR. *et al.* (2008)

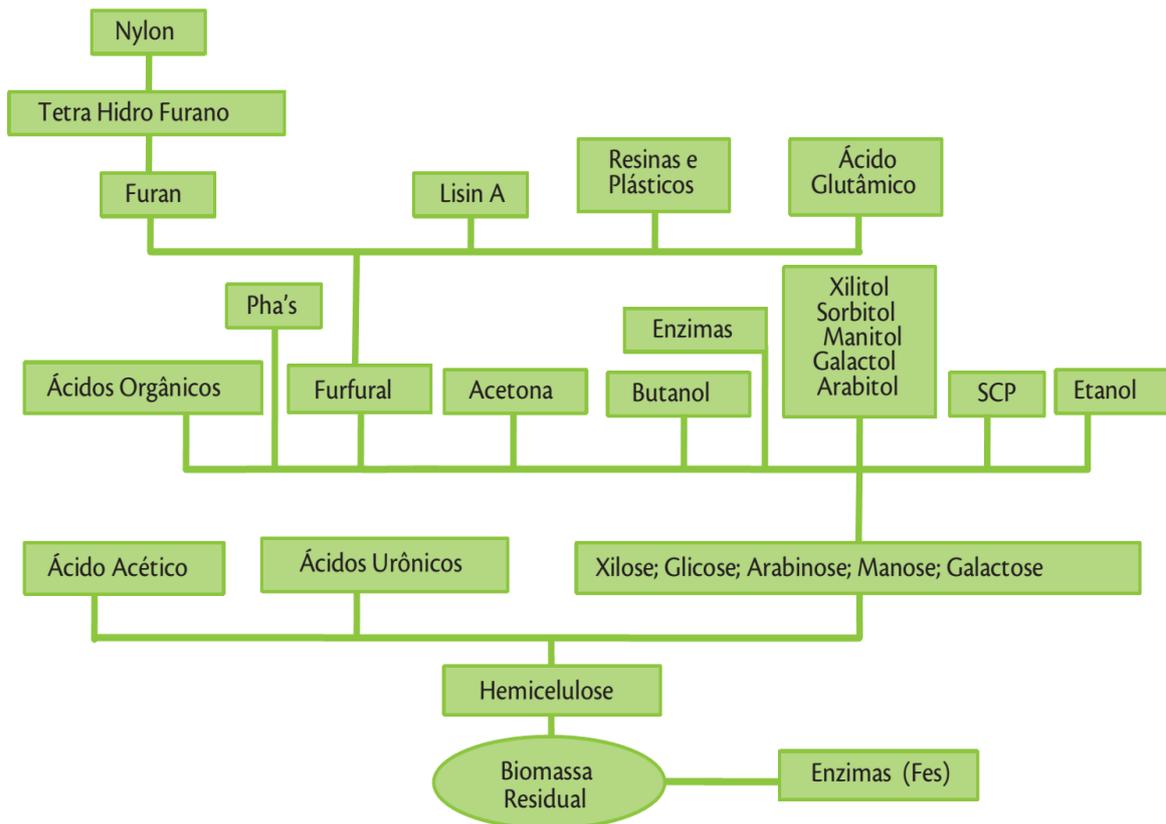


Figura 34: Produtos a partir da hemicelulose Fonte: PEREIRA JR. *et al.* (2008).

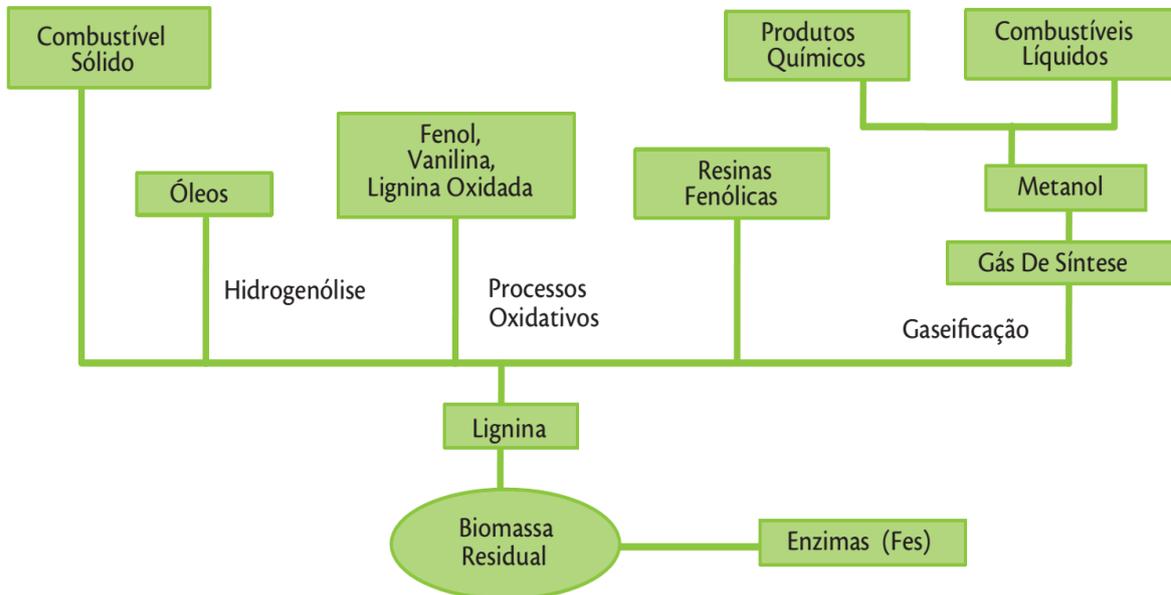


Figura 35: Produtos a partir da lignina. Fonte: PEREIRA JR. *et al.* (2008).

Devido ao elevado número de produtos e mercados que podem ser influenciados por essa nova indústria de químicos de fonte renovável, as oportunidades relacionadas ao aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar são inúmeras. Entretanto, como foi

ênfatisado por Bozell & Petersen (2010), esses vários “alvos” acabam se tornando um desafio para o empreendedor montar a sua estratégia no conceito de biorrefinaria.

4.6.1 *Opinião dos especialistas sobre os Novos Produtos.*

Antes de apresentar os resultados sobre a opinião dos especialistas, é importante frisar que essa oportunidade foi analisada sob a perspectiva de que a usina sucroenergética gera os novos produtos a partir da biomassa da cana-de-açúcar, isto é, a usina, com ou sem parceiros de outros setores, se beneficia da produção de químicos de origem renovável.

Inicialmente foram avaliadas as entrevistas dos especialistas da indústria. Deste grupo, observaram-se duas opiniões ligeiramente diferentes sobre a possibilidade de se produzir novos produtos a partir da biomassa da cana-de-açúcar, uma mais receosa e a outra mais otimista.

Os especialistas da indústria que tiveram uma opinião mais receosa em relação aos novos produtos se baseavam principalmente nas dificuldades de lidar com os novos mercados (independente se o produto é *drop-in* ou não), competir com os químicos de origem fóssil e ter competências técnicas e gerenciais para lidar com produtos de maior valor agregado. A questão tecnológica, em geral, não aparecia como uma grande dificuldade. Para exemplificar essas opiniões, seguem os comentários dos especialistas 2, 1 e 6 da indústria, respectivamente:

Fazendo sentido produzir algum derivado químico, a gente não deixaria de produzir, a questão é avaliar oportunidades (...). O mercado de etanol é enorme, o carro *flex* no Brasil se tiver um produto competitivo, não teria dificuldade de vender, mas cada produto químico tem que ser feito um estudo de mercado bem elaborado, analisar o nicho, localização, então de forma resumida, o nosso foco é produção de etanol, mas estamos abertos a possibilidades de agregação de valor.

A ideia é muito legal, mas a implementação não é tão simples. Esses processos como de ácido succínico, ácido láctico e outros que podem ser utilizados com intermediários químicos (...) são produtos que realmente são de maior valor agregado, mas também com um custo muito elevado de produção. E você pensar que vai produzir um etanol celulósico e uma especialidade química numa mesma unidade, eu acho bastante complexo. Você teria que ter instalações reservadas

para cada uma dessas operações, porque por um lado, no etanol de segunda geração, você tem um combustível de altos volumes e baixo valor agregado e por outro lado, você vai ter pequenos volumes atingindo nichos de mercado. Então são operações que do ponto de vista tecnológico serão diferentes, vão implicar em usos de micro-organismos com características diferentes e principalmente do ponto de vista de negócio, são negócios muito distintos.

O problema não é nem produzir, dá para produzir diversos intermediários, o problema é conseguir competir com o que é produzido por uma grande indústria química. Outro problema é ter mercado, a gente pode produzir uma quantidade grande de xilitol, mas o mercado é pequeno, e aí o preço vai lá para baixo.

Os especialistas 1 e 6 da indústria, respectivamente, colocam algumas condições que facilitariam o surgimento dessa indústria:

A menos que você tenha a sua produção de etanol celulósico agregado a isso. O uso mais imediato da lignina vai ser o uso energético, mas será que existe a possibilidade de fazer uso dessa lignina para produção de alguma outra coisa? Então assim, você consegue trabalhar com algumas correntes de uso, mas essa visão de biorrefinaria que entra o material celulósico e sai inúmeros produtos, eu acho bastante improvável.

Se tem uma lei que diz que deve ter um consumo mínimo de um determinado produto de fonte renovável, aí é outra história, aí a coisa pode realmente funcionar.

O especialista 1 da indústria ainda acrescenta que existe alguns focos de pesquisa na área, mas que ainda não se mostrou promissor para a empresa.

O nosso centro de pesquisa tem algumas pesquisas com parceiros nessa área, mas ainda não se tornou parte do plano de negócio da nossa empresa.

Já o outro grupo, dentre os especialistas da indústria, se mostrou mais otimista em relação a essa oportunidade. O especialista 3 da indústria inclusive, descreve planos para implementar uma biorrefinaria:

No futuro a gente vislumbra ter um *cluster*, então em uma unidade a gente vai produzir o etanol 1G, que você pode pegar a cana-energia e

moer ela e jogar para uma dorna comum, e daí você tem uma produção mais acelerada, e num lado você pode ter uns tanques de fermentação do 2G, no outro você pode ter um bioquímico, você vai gerar energia elétrica da sua lignina e você ainda vai produzir biogás da sua vinhaça. Então a nossa ideia é realmente fazer um cluster com diferentes produtos.

A curto prazo, a gente deve ter plantas dedicadas (...) mas no momento que as tecnologias começarem a ficar mais maduras a ideia é essa da biorrefinaria mesmo. Então se você conseguir separar essas correntes C5 e C6, aí fica muito mais flexível. O que eu enxergo a longo prazo é ter uma biorrefinaria, mas essa biorrefinaria vai precisar de uma área muito grande para ser economicamente viável, então essa planta vai ter que ser muito grande para produzir uma quantidade viável de cada produto. E grande área também para produzir muita biomassa, com muito volume para ter escala.

O especialista 5 da indústria justifica seu otimismo baseado no movimento que algumas empresas químicas tem feito em busca de parcerias com usinas para explorar as oportunidade das matérias-primas renováveis. Dentre os entrevistados, surgiu com frequência a ideia de que o interesse das empresas da indústria química em aproveitar a biomassa seria um fator impulsionador ainda maior do que o próprio interesse da usina em desenvolver esses novos produtos.

Os intermediários químicos e os produtos não-energéticos vão fazer parte do *mix* de produtos, sim! Os interesses das indústrias químicas estão mostrando isso (Cita algumas empresas).

O especialista 4 da indústria rebate os comentários sobre as dificuldades gerenciais em lidar com alguns produtos diferenciados através da simples lógica de que a empresa vai buscar o melhor para a sua sobrevivência, e reconhecendo os recursos que lhe faltam, tenderá a buscá-los.

Parte-se do princípio que ela (a usina) quer o melhor para ela, então se algo de fato vai gerar valor, ela vai procurar em algum outro lugar essa habilidade (Habilidade gerencial). Ela (a nova fonte de renda) está lá para melhorar.

Os especialistas da área de pesquisa se apresentaram mais otimistas em relação ao potencial dos novos produtos da biomassa. Não só pela questão ambiental como também por razões econômicas, como a sustentabilidade econômica da biorrefinaria,

como foi discutido por Bozell & Petersen (2010), e a dependência das oscilações do preço do petróleo. Os comentários dos especialistas 1 e 5 da pesquisa, respectivamente, exemplificam essas opiniões.

É importante buscar moléculas de maior valor agregado, para buscar outro tipo de sustentabilidade, que é a sustentabilidade econômica, (...) como a indústria do petróleo faz, a indústria do petróleo ganha em diesel, gasolina, querosene, mas ganha em valores unitários em outras moléculas que se conectam a outros seguimentos. Por que não envolver essas concepções?

Existe uma grande vontade de algumas empresas aqui no Brasil (cita empresas) de estudar e entender a questão da indústria de químicos de fonte renovável para poder buscar novos mercados e substituir os produtos de origem fóssil. Isso não só pela questão ambiental, mas pela oscilação do preço do petróleo, então a nafta, que é a principal parte do petróleo que vai para indústria petroquímica e química, ela aumenta se aumenta o preço do petróleo.

O especialista 5 da pesquisa ainda acrescenta que, no momento, o foco tem que estar voltado para o desenvolvimento de processos para fabricação dos mesmos produtos da indústria de químicos de fonte fóssil, de forma a facilitar o surgimento da indústria.

Aí a inovação não é tanto de produto, porque você pode continuar com o mesmo leque de produtos, já existe um mercado. A inovação vai ser voltada para novos processos, máquinas e equipamentos, membranas, que façam esse produto ser competitivo com o de origem fóssil. (...) Os produtos continuam sendo importantes, não tem uma necessidade prioritária de fazer novos produtos, o foco tem que ser em desenvolver novos processos para lidar com a matéria-prima renovável. A não ser que a molécula seja diferenciada, digamos, fazer o ácido succínico α seja mais eficiente que ácido succínico β , então aí sim deve mudar o produto.

Apesar do otimismo, os especialistas da pesquisa não deixaram de acrescentar algumas dificuldades relacionadas aos bioprodutos. O especialista 2 comenta sobre a futura competitividade e a dificuldade de lidar com a heterogeneidade da biomassa.

A biomassa não vai estar sempre abundante, vai ter que ter um gerenciamento de uso de biomassa. E biomassa não é petróleo, a

heterogeneidade da biomassa é muito maior que a do petróleo. Você vai ter que ter protocolos de caracterização muito bem definidos.

O especialista 5 da pesquisa enfatiza também a imaturidade tecnológica:

Nós somos grandes produtores de matérias-primas renováveis, só que daí para você fazer produto final que vai servir para várias coisas, existe um *gap* em relação a isso. Que é o *gap* tecnológico, é o *gap* de subsídio. Então existe um interesse muito grande investir em químicos a partir de matéria-prima renovável, mas ainda não é competitiva, a maior parte dos produtos não é competitiva.

Sobre a discussão relativa aos produtos mais promissores, o especialista 3 da pesquisa enfatiza que muito provavelmente não vai existir um produto ou processo ideal. O melhor produto para cada empresa vai depender de um conjunto de fatores:

Os “melhores produtos” vão depender dos mercados associados, da indústria da química verde, a indústria de alimentos, a indústria farmacêutica, eu acho que isso está muito ligado com a plataforma que você está desenvolvendo na sua indústria. Cada indústria está seguindo uma rota, não vai ter uma rota única ou caminho vencedor para todo mundo.

Os especialistas da política foram os que se mostraram mais otimistas. Uma das principais razões foi o conjunto de condições estabelecidas no país que facilita o desenvolvimento da indústria de químicos de fonte renovável, como foi discutido pelo especialista 1 da área de política.

Qualquer coisa que se faça para uma biomassa lá fora (no exterior) (...) se você utilizar a cana provavelmente vai ser mais barato. A gente tem (em relação ao Brasil) uma base para atrair várias indústrias de biomassa, se observar outros países tropicais com esse potencial, provavelmente não terá uma infraestrutura tão boa quanto a nossa.

Em geral, os especialistas se mostraram otimistas em relação à produção de novos produtos a partir da biomassa da cana-de-açúcar. As dificuldades foram voltadas principalmente para questões organizacionais, o que pode significar uma barreira grande para inovação uma vez que só a maturação tecnológica não parece ser suficiente para garantir a introdução destes produtos.

4.6.2 Fatores Impulsionadores e Inibidores para os Novos Produtos

Baseado no estudo prévio sobre os novos produtos a partir da biomassa e principalmente nas entrevistas com os especialistas foi possível montar a Tabela 13 com os fatores impulsionadores e inibidores para a oportunidade em novos produtos.

Pode-se observar na Tabela 13, que os fatores impulsionadores estão distribuídos em várias categorias – custo, ambiental, organizacional e externo – o que favorece o processo de inovação uma vez que a influência positiva para essa oportunidade está relacionada com vários aspectos da indústria de etanol, bem como externos a esta. Os fatores impulsionadores de custo e ambiental, mais uma vez, estão atrelados ao conceito de desenvolvimento sustentável. Os organizacionais estão relacionados às novas estratégias de negócio associada a um possível aumento da receita do setor com a ampliação do seu portfólio de produtos. Já os externos mostram que o ambiente fora do setor também impulsiona essa oportunidade através das condições climáticas, da biota e infraestrutura do país, e do interesse de empresas fora do setor, como as indústrias químicas e farmacêuticas, de criar parcerias para construir a indústria de químicos de fonte renovável.

Tabela 13: Fatores Impulsionadores e Inibidores para os Novos Produtos

Fatores Impulsionadores	Categoria	Fatores Inibidores	Categoria
Oferta de biomassa	Custo	Desenvolvimento de tecnologias de conversão	Tecnológico
Produtos gerados a partir de fonte renovável	Ambiental	Competição com os produtos de origem fóssil (<i>drop-in</i>)	Organizacional
Produtos com potencial de substituir os de origem fóssil	Ambiental	Desenvolvimento de novos mercados (produtos diferentes, não <i>drop-in</i>)	Organizacional
Fonte de sustentabilidade econômica para biorrefinara	Organizacional	Definição do portfólio de produtos e nichos de mercado.	Organizacional

Fatores Impulsionadores	Categoria	Fatores Inibidores	Categoria
Possibilidade de atingir nichos de mercados com químicos de fonte renovável.	Organizacional	Gestão de produtos diferenciados (biocombustíveis – alto volume e baixos preços; químicos – baixo volume e altos preços)	Organizacional
Brasil com condições propícias para o desenvolvimento da indústria.	Externo	Competição da utilização da biomassa para outros fins.	Organizacional
Interesse de empresas da indústria química	Externo	Necessidade de plantas grandes para viabilizar os produtos	Custo
		Ausência de políticas específicas para os produtos gerados a partir de matéria-prima renovável	Político
		Necessidade de parcerias	Organizacional

Quando se analisam os fatores inibidores para os novos produtos, observa-se que a maioria é organizacional. Existe também a dificuldade tecnológica para as rotas de conversão, a questão do custo de uma planta de biorrefinaria que, de acordo com um dos entrevistados, deve ser significativamente maior que uma planta atual de açúcar e etanol, e a ausência de incentivos políticos. No entanto, são os fatores organizacionais que mais influenciam no aumento de uma barreira inibidora para a utilização da biomassa da cana-de-açúcar para novos produtos.

Os fatores organizacionais: necessidade de desenvolvimento de novos mercados (para produtos não *drop-in*), definição do portfólio de produtos e nichos de mercado, gestão de produtos diferenciados (biocombustíveis – alto volume e baixos preços; químicos – baixo volume e altos preços) e competição na utilização da biomassa para

outros fins, enfatizam a imaturidade da própria indústria de químicos de fonte renovável que ainda está no início de seu desenvolvimento, o que acarreta em enormes dificuldades a serem superadas tanto pelas usinas quanto por empresas de outros setores também envolvidas na construção dessa nova indústria.

Já os fatores organizacionais: “competição com os produtos de origem fóssil (produtos *drop-in*)” e “necessidade de parcerias” são dificuldades direcionadas para o próprio setor de etanol. A falta de experiência em lidar com os mercados que já existem é uma barreira que o setor têm dificuldade de ultrapassar, e para isso, necessita que empresas de outros setores contribuam com competências que lhe faltam.

A Figura 36 ilustra como diferentes aspectos do setor impulsionam o desenvolvimento dessa oportunidade. A Figura 37 enfatiza as 4 categorias de fatores inibidores: custo, organizacional, político e tecnológico. Entretanto, com uma análise conjunta à Tabela 13 é possível verificar que os fatores organizacionais são os que mais influenciam nas dificuldades relacionadas aos novos produtos.

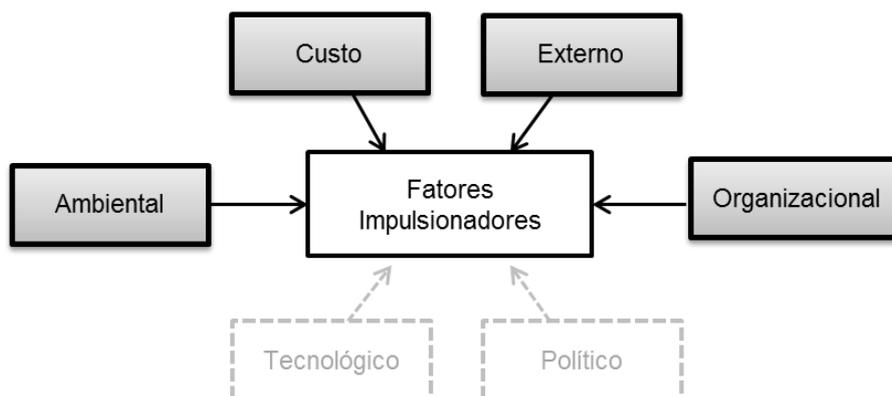


Figura 36: Fatores impulsionadores para os Novos Produtos

Dentre os fatores impulsionadores, o que mais foi discutido nas entrevistas como o que melhor pode ultrapassar as barreiras dos fatores inibidores foi o interesse de empresas externas ao setor de etanol em criar parcerias para valorizar a utilização da biomassa. Como foi discutido pelo especialista 3 da indústria, cada biorrefinaria vai desenvolver os seus “melhores produtos” de acordo com as suas parcerias, o ambiente em que ela está localizada, as dimensões das suas unidades, entre outros fatores.

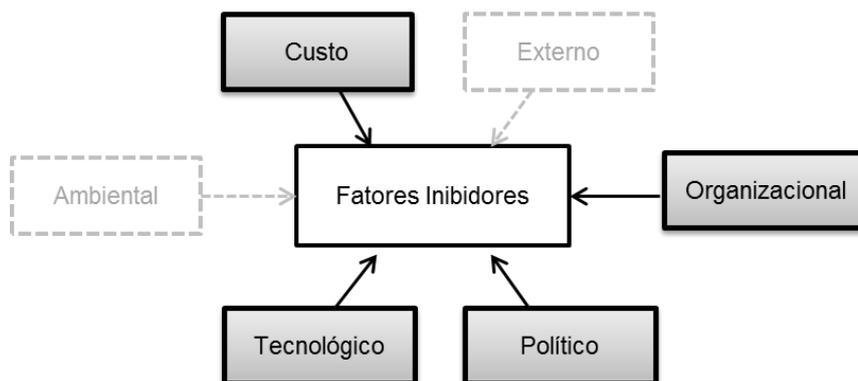


Figura 37: Fatores inibidores para os Novos Produtos

Sendo assim, mesmo que haja uma forte inibição por parte do setor em ultrapassar essas barreiras organizacionais, o interesse de empresas externas ao setor de etanol vem como um auxílio ao setor para enfrentar tanto as dificuldades tecnológicas como as dificuldades organizacionais.

5 RELAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ÁREAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Em seu trabalho, Malerba (2006) afirma que a forte relação entre as empresas e outras organizações (tais como universidades e agências públicas) tem sido uma fonte de inovação e mudança em vários sistemas setoriais, como produtos farmacêuticos e biotecnologia, tecnologia da informação e telecomunicações.

Buscando entender as relações entre esses importantes agentes do SSI, este capítulo tem o objetivo de avaliar a comunicação entre os agentes envolvidos com a área de pesquisa, política e indústria, através das opiniões expressas por eles mesmos sobre seus níveis de interação.

Inicialmente será avaliada a comunicação com a área industrial, em seguida com a de pesquisa e, por fim, área de política.

5.1 Comunicação com a Indústria

Quando perguntados sobre o relacionamento com a área de indústria, os especialistas da pesquisa e da política, e alguns de empresas que se relacionam com as usinas, sempre destacavam que a indústria de etanol é um tanto resistente em lidar com inovações. No entanto, quase sempre também havia um sentimento de mudança, no sentido que o setor estaria começando a perceber que essa resistência à inovação já o estaria prejudicando.

Os especialistas da área da política reconheceram essa resistência à inovação explicando que o foco dos empreendedores é voltado para melhoramentos incrementais. O comentário do especialista 1 da política ilustra essa opinião.

Para eles (os atores da indústria), melhor tentar ganhos de 3 ou 4%, mas sabendo que com isso vai conseguir esse aumento de eficiência, do que tentar o 2G que pode ser 50, 60 (%), mas ainda é muito difícil. A gente já acha o contrário, pela lógica de inovação você deve apostar onde tem retorno. Porque é ali que você vai mudar o setor.

O especialista 1 da pesquisa deixou clara essa característica do setor em seus comentário:

Existe grande dificuldade de discutir inovação com esse setor sucroalcooleiro, ele é conservador e ortodoxo.

Em geral, essa primeira impressão foi passada por muitos dos entrevistados. No entanto, alguns afirmavam reconhecer dois grupos dentro do setor, um mais tradicional e um mais aberto à inovação, como foi o caso do especialista 7 da pesquisa:

Hoje a gente pode dizer, sem dúvida, que existem 2 tipos de empresas trabalhando nessa área de etanol e energia: um mais tradicional, que tem essa resistência à inovação; e tem esse outro grupo que está crescendo fortemente e que vem baseado nessas *joint ventures*, como Raízen e a Granbio e outros grupos que estão sendo criados e que possuem forte capital estrangeiro, que vêm muito mais abertos à competitividade e ao processo de inovação.

Com esse segundo grupo a gente tem uma relação muito forte e realmente um laço mais fraco com o grupo da primeira linha, embora a gente continue sempre tentando ampliar esse contato. O que a gente acredita, é que dentro de algum tempo eles vão ter que ser obrigados a se abrir para esse tipo de cultura, senão vão perecer no mercado.

O especialista 7 da indústria também demonstrou ter conhecimento dessa divisão no setor.

Existe ainda uma resistência para inovar devido ainda às influências daquelas empresas familiares. Mas isso depende, tem muita empresa no setor que vai usufruir disso (oportunidades de inovação) sim, que não tem essa resistência. Mas existe tradicionalismo sim, pode não existir no contexto dessas empresas maiores, mas ainda existe em várias pequenas.

Uma observação semelhante foi constatada na seção de Oportunidades no Processo de Produção de Etanol de Primeira Geração. Naquele tópico, existe uma forte separação entre “as empresas mais modernas” e as “menores”.

Os especialistas 1 e 2 da indústria, respectivamente, abordam essa divisão no setor quando comentam as relações com as usinas parceiras:

Isso varia muito com o sócio, alguns sócios são mais fáceis de você ter essa governança bem definida e tem outros que isso não é tão

simples assim. O setor como um todo não é um dos mais afeitos às inovações e em época de crise menos ainda... Investimentos em inovações e processos experimentais não estão no foco. A gente tenta obter ganhos incrementais e é um setor que trabalha mais assim, buscando ganhos mais incrementais do que tentando *breakthrough* tecnológicos.

Nós temos parceiros muito bons de conversar sobre o ponto de vista tecnológico, são parceiros grandes. Agora, inovação geralmente sempre é um ponto sensível, porque junto da inovação tem um risco associado, e o momento que o setor sucroenergético passa é um momento difícil de conversar sobre inovação.

Os comentários dos especialistas 2 e 5 da pesquisa, respectivamente, mostram que apesar do tradicionalismo do setor, as empresas estariam caminhando para superar essa deficiência:

Na parte das usinas, eu acho que ainda tem muito preconceito, o setor ainda é um grupo muito conservador, só que com esses anúncios de novas plantas, eu acho que isso está começando a mudar a mentalidade. A partir do momento que a tecnologia for se mostrando madura e vai se produzindo efetivamente etanol e bioquímicos, eu acho que a procura vai ser cada vez maior e não vai faltar contato entre 1G e 2G. Acho que isso vai naturalmente migrando para essa produção mista.

As empresas estão procurando mais as universidades para ajudar em suas pesquisas. Melhorou muito dos últimos 10 anos para cá. Eles se ajudam, e ambos percebem isso. A questão da inovação aberta também está aumentando muito. Claro que isso depende muito do tamanho: as pequenas em geral não buscam tantas parcerias, muitas nem tem condições de lidar com o futuro se todo dia estão brigando para se sustentar.

A conclusão que se pode tirar sobre a comunicação da indústria com as outras áreas é que existe uma real dificuldade de lidar com essas empresas devido a essa característica que foi tanto citada de resistência à inovação. No entanto, a maior parte dos especialistas, vislumbra uma mudança nesse cenário que será dirigida pelas empresas que estão com maior contato com as oportunidades de inovação.

Em coerência com a abordagem de SSI, a insuficiência, ou até ausência, da relação entre esses atores, limita extremamente o processo de inovação. E ainda, como foi dito pelo especialista 7 da pesquisa no primeiro comentário da seção, a ausência dessa comunicação efetiva, pode levar ao fechamento das empresas menos inovadoras.

5.2 Comunicação com a Pesquisa

Quando os especialistas da indústria, e alguns da própria área de pesquisa, foram questionados sobre o aproveitamento dos resultados das universidades e centros de pesquisa, várias críticas foram levantadas em relação às universidades. O especialista 1 da indústria aponta as principais dificuldades no relacionamento com as universidades:

Na grande maioria das vezes os resultados são inúteis... Tem exceções. Os resultados vêm de forma lenta, eles vêm meio descasados dos seus objetivos (...) a gente continua investindo e esperando que saia alguma coisa, mas até agora, pelo menos na parte de biocombustíveis, eles têm sido pouco úteis para a gente.

Eles não têm agilidade para comprar equipamentos, não tem agilidade para contratar pessoas, não tem uma cultura de gestão dos recursos, dos investimentos; os são projetos limitados, têm dificuldades de cumprir prazos (...) as universidades brasileiras não têm uma cultura de pesquisa aplicada, tem mais uma cultura para uma pesquisa básica sem muito foco numa aplicação e sem uma cultura de gestão desses recursos.

O especialista 3 da indústria também apontou que muitos resultados das universidades não são aproveitados, no entanto ele destaca que isso ocorre pelo distanciamento entre as áreas de pesquisa e indústria. O especialista 2 da indústria segue a mesma linha de raciocínio, mas enfatizando que parte da responsabilidade dessa troca cabe às empresas. Seguem os comentários dos especialistas 3 e 2 da indústria, respectivamente.

O grande problema das universidades que eu tenho observado é a distância que a academia está da indústria. Se você observar as linhas de pesquisa e os trabalho que estão sendo desenvolvidos, eles são ainda muito em escala de laboratório, não tem uma visão de escalonamento, não tem um contato com a empresa. Por exemplo, às

vezes alguém desenvolve um projeto que aos olhos da empresa já não tem sentido algum de usar, uma tecnologia que já está ultrapassada e já provou que não é viável, então não faz sentido ficar estudando aquilo. Acho que falta a academia entender melhor o mercado, hoje as pesquisas ainda são muito fechadas no ambiente acadêmico. Outro gargalo é a falta de preocupação com o escalonamento. Então quando a gente conversa com a universidade, por falta desse conhecimento, fica até difícil avançar em uma eventual parceria com esse corpo técnico.

Fácil não é (o relacionamento com as universidades). Tem a dificuldade da continuidade do trabalho, às vezes a pesquisa é conduzida por um aluno de mestrado que se forma e vai trabalhar em outra coisa. O meu sentimento é que em termos de velocidade e de potencial de aproveitamento tem um espaço muito grande para crescer. Eu sei que eles, e a gente também como empresa, temos que ser mais ágeis, mais eficientes, ter sistemas de gestão melhores.

O especialista 5 da indústria também chama a atenção para a responsabilidade por parte das empresas em estreitar o relacionamento com as universidades:

A comunicação com a área de pesquisa não é fácil, na verdade não é comum. O setor é muito heterogêneo e hoje tem algumas empresas muito próximas da pesquisa, mas muitas ainda sem esse relacionamento. Com essa crise o distanciamento entre indústria e pesquisa está aumentando. O foco está sendo direcionado o tempo todo para custo e faltam condições para focar na pesquisa.

Em relação aos centros de pesquisa desassociados das universidades, os comentários foram mais positivos. O CTC e o CTBE foram citados diversas vezes como exemplos de bom relacionamento com a indústria, mas sempre salientando que para algumas usinas esse relacionamento é quase inexistente.

Os comentários do especialista 3 da pesquisa enfatiza a importância da comunicação entre essas duas áreas e mostra que não haverá espaço no setor para as empresas que não compreenderem essa importância. Sutilmente, o especialista também acrescenta que existe uma descrença de ambas as partes, isto é, a dificuldade de estreitar a relação entre essas duas áreas pode ser devida a preconceitos presentes em ambas as áreas de pesquisa e indústria.

Você só vai conseguir viabilizar isso (aproveitar as oportunidades de inovação) se houver essa comunicação efetiva. Algumas empresas que a gente tem trabalhado nisso, tem visto a necessidade de não haver a separação entre indústria e pesquisa. Mas claro que sempre vai ter atrito e sempre vai ter conflito, mas uma corporação que quer crescer, ela tem que olhar aquilo como negócio. Eu acho que não tem mais espaço para empresas que pensam que “isso é indústria e isso é pesquisa”. Ou vai acontecer em conjunto ou não vai acontecer.

Essa fase de descrédito de ambos os lados já deve estar passando, eu digo isso porque um vai perceber que precisa do outro. As usinas vão perceber que continuar fazendo o que elas já faziam já não cabe nesse cenário e, por outro lado, as empresas ou instituições de pesquisa e inovação vão perceber que não sabem o que essas empresas precisam, e não sabem o que pessoas de chão de fábrica conseguem fazer.

5.3 Comunicação com a área de política

Quando se discutiu o relacionamento com a área de política observou-se uma clara diferença quando se falava de políticas voltadas para pesquisa e desenvolvimento, como o papel de agências de fomento, e quando se falava de política em âmbito nacional. Os especialistas da pesquisa e da indústria, em geral, não tinham muitas críticas em relação às agências fomento como BNDES, FINEP e FAPESP. Alguns especialistas da pesquisa comentaram que os incentivos poderiam ser maiores. O PAISS 1 e o PAISS agrícola foram repetidamente citados como ações importantes do ambiente político. Os comentários dos especialistas da pesquisa 6 e 7 mostram o bom relacionamento com as agências de fomento.

O projeto que eu citei sobre a lignina tem apoio do BNDES. Nós temos outros projetos também com esse suporte do BNDES, então de forma geral, a relação é muito boa com instituições como BNDES e FINEP.

Quando a gente fala de política a gente tem que fazer uma separação de política de desenvolvimento e pesquisa, esse é o papel fundamental do BNDES e da FINEP. O BNDES é bem aberto e bem positivo para nossas metas para o setor. Mas também a gente precisa falar da importância da política pública voltada ao mercado de etanol, que é fortemente combatida pelo setor, que analisa que do

ponto de vista governamental tem havido uma perda de relevância do mercado de etanol.

Entretanto, quando se discutia a política no âmbito nacional, várias críticas foram feitas principalmente devido à falta de uma política continuada para biocombustíveis e uma predominância de uma cultura voltada para o petróleo. Seguem alguns comentários que serviram de base para essas conclusões:

A primeira coisa que você precisa ter para investir em algo novo no país é você ter o suporte da legislação. O que acontece aqui no país é que o Brasil é dominado pela cultura do petróleo: a maior empresa brasileira é da área de petróleo, esse é o maior entrave para o desenvolvimento da biotecnologia no país. Não existe no Brasil uma cultura de biotecnologia, apesar da biodiversidade, apesar do potencial natural em quantidade e qualidade, apesar da diversidade microbiana que o Brasil tem, como nenhum outro país no mundo tem, a biotecnologia não se expandiu aqui (Especialista 2 da pesquisa).

O pior problema que existe no Brasil, que recursos eu tenho certeza que existem, é a falta de política continuada, o que ocorre são episódios. Não tem uma programação, esse é um grave problema, porque recursos existem. Eu acho que os investimentos poderiam ser maiores, acho que poderia ter política mais definida e que o petróleo ou o pré-sal não resfriassem esses esforços. Isso é o que eu sinto falta, falta de políticas definidas, continuadas, não apenas episódicas (Especialista 1 da pesquisa).

Falta no nosso país uma política de combustíveis a longo prazo. Para que haja segurança para o investimento é necessária uma política pública de longo prazo para combustíveis que una o privado e o público. Sem isso o investimento fica difícil (Especialista 6 da indústria).

Faltam no setor incentivos fiscais para que se possa estruturar a área de inovação e que realmente as empresas tenham condições de inovar e gerar esse novos produtos (Especialista 5 da indústria).

Depois desse ano e nos anos seguintes, talvez a gente vá ter muita incerteza sobre a continuação dessas políticas e dos recursos disponíveis. Isso traz um grau de incerteza muito grande (Especialista 3 da pesquisa).

Tomando como base as entrevistas realizadas, é possível dizer que tanto a área de pesquisa quanto a área de indústria não identificaram grandes dificuldades de relacionamento com as agências de apoio à pesquisa e desenvolvimento. No entanto, foram detectados diversos argumentos que indicam que o ambiente político nacional não oferece suporte suficiente para que o setor tenha condições de aproveitar as oportunidades de inovação.

Sendo assim, em resumo do que foi visto nestas três últimas seções, pode-se dizer que a principal deficiência na interação entre os agentes do SSI encontra-se no relacionamento entre pesquisa e indústria. Outra grande barreira para inovação detectada nessas seções foi a falta de uma política nacional focada em biocombustíveis e bioprodutos.

5.4 Perspectiva de evolução do setor sucroenergético

Para encerrar o capítulo cinco, essa seção fará um breve resumo sobre os resultados encontrados no capítulo 4 e analisará algumas opiniões expressas pelos especialistas sobre a evolução do setor diante das oportunidades de inovação apresentadas.

A Tabela 14 apresenta a classificação dos principais fatores inibidores, o tamanho relativo da barreira imposta por esses fatores e o interesse dos entrevistados em cada oportunidade.

Tabela 14: Resumo dos fatores inibidores e interesse dos entrevistados sobre as oportunidades.

Oportunidade	Principais fatores inibidores	Barreira imposta pelos inibidores	Interesse para o setor
Cogeração	Político	Média	Alto
Etanol 2G	Político/Tecnológico	Média	Alto
Biogás	Político/Tecnológico	Alta	Médio
Primeira Geração	Custo	Baixo	Baixo
Gaseificação	Tecnológico	Alta	Baixo
Novos Produtos	Organizacional/ Tecnológico	Alta	Alto

Pode-se observar primeiramente que os principais fatores foram de origem tecnológica, política, organizacional e de custo. No entanto, o tamanho da barreira de cada um deles variou bastante. Com as maiores barreiras, pode-se citar: o biogás da vinhaça, que não só tem um desafio tecnológico de viabilidade a ser superado como também um desafio político relacionado com a facilidade de disposição da vinhaça para a fertirrigação; a gaseificação, que mostrou um desafio tecnológico grande o suficiente para diminuir o interesse dos entrevistados; e os novos produtos, tanto pelos seus desafios organizacionais (novos mercados, definição de portfólio, necessidade de parcerias...) quanto tecnológicos, pela própria dificuldade em converter a biomassa da cana em outros produtos.

As oportunidades com barreiras médias foram o etanol 2G e a cogeração para venda da bioeletricidade. A venda da bioeletricidade é facilitada por já ter uma tecnologia consolidada, no entanto, as limitações impostas pelos leilões de energia, dificultam a realização dos investimentos necessários para aproveitar essa energia. No caso do etanol de segunda geração as limitações são tecnológicas, pelo desenvolvimento das etapas para liberar os açúcares do bagaço e da palha, e políticas, principalmente na ausência de um programa de incentivo que facilite a construção de uma curva de aprendizado para a nova tecnologia. Entretanto, esforços de empresas e instituições de pesquisa mostram que as barreiras tecnológicas estão sendo superadas. A menor barreira é a de custo para as oportunidades no processo de primeira geração para a produção de etanol.

Em relação ao interesse dos entrevistados, a maioria dos comentários foi voltada para a venda da bioeletricidade, o etanol 2G e os novos produtos, sinalizando essas oportunidades como as mais promissoras pelos agentes do setor. As barreiras médias para a bioeletricidade e o etanol de segunda geração denotam uma maior proximidade dessas oportunidades de serem amplamente aceitas pelo setor. Houve também um interesse muito grande pelos novos produtos, todavia, devidas às elevadas barreiras, o ambiente para essa oportunidade ainda é bastante incerto.

Para concluir essa seção, seguem alguns comentários dos especialistas sobre as perspectivas de evolução do setor sucroenergético.

O especialista 1 da política acredita que o setor no futuro continuará com dificuldade de desenvolver inovações e deverá evoluir como um usuário, cada vez mais consciente, de novas tecnologias.

Eu acredito que ele (o setor de etanol) vai se sofisticar como usuário de inovação. Mas eu acho que ele vai continuar com o perfil de usuário. Conseguir ser produtor ou gerador de inovação de forma interna não... Quem vai produzir enzimas é a Novozymes (exemplo), quem vai fazer o pré-tratamento vai ser outra empresa, e ele vai comprar o pacote e quão mais eficiente ele for do ponto de vista de conhecer essas tecnologias, melhor ele vai tirar proveito.

O especialista 1 da pesquisa dá ênfase na magnitude do desafio que será para o setor começar a lidar cada vez mais com novas tecnologias, mas sugere que isso irá acontecer em algum momento.

É uma mudança de paradigma (...) o desafio vai ser grande, mas vai ser superado, tem que ser. O setor que herdou esse tradicionalismo se capacitou, mas continuam com a visão conservadora. Mas quando eles perceberem os ganhos que terão em relação à matéria-prima, podendo até duplicar sua produção, isso vai ter um impacto enorme.

O especialista 6 da indústria reconhece as dificuldades tecnológicas, mas conclui seu raciocínio afirmando que o setor tem condições de inovar e se transformar. Para isso ele dá o exemplo da cogeração e a venda da bioeletricidade, um novo produto para o setor.

O setor é sim capaz de fazer inovações radicais, (...) a cogeração é um exemplo que modificou muito o setor.

Todos os especialistas que discutiram sobre os formatos e produtos dessas novas plantas, dentro da ideia de biorrefinaria, deixaram claro que isso irá acontecer de forma muito individual e diferenciada para cada empresa. Como já foi discutida na seção de Novos Produtos, a indústria de químicos de fonte renovável deve surgir com plantas bem diferentes umas das outras, cada uma escolhendo processos e produtos que forem mais condizentes com o ambiente em que ela se encontra, suas parcerias, seu tamanho, o mercado que deseja atingir, enfim, suas estratégias de forma geral. Os especialistas 2 e 3 da pesquisa, respectivamente, exemplificam essa conclusão.

A gente vai ter lidar no Brasil com a biotecnologia com a ideia de customização, aquela empresa, naquele local com aquela matéria-prima, com aquele processo. A customização é o segredo da biotecnologia.

Você não vai conseguir ter em uma única planta em um único ambiente industrial que vai te dar tudo isso ao mesmo tempo (todas essas oportunidades de inovação). Então cada uma vai ter uma opção que ela vai ter que decidir.

O especialista da pesquisa 3 sugere como isso deve acontecer:

O modelo que vai ficar em pé é provavelmente o modelo misto, onde as usinas talvez não tenham as tecnologias, essas tecnologias são protegidas, e esse modelo misto é uma *joint venture*. Isso porque você não vai vender a matéria-prima porque você não consegue nem precificar essa matéria-prima: vou precificar esse bagaço como o quê? Como custo de oportunidade de eu não fazer cogeração? Ou o custo de converter aquele bagaço em outra coisa? E quanto vale a tecnologia de conversão desse material lignocelulósico? Eu nem consigo dizer se ele é viável ou não ainda. Então o modelo de negócio é o misto, no meu entendimento.

A ideia do modelo misto onde a usina e outra empresa de um setor externo ao sucroenergético criam uma parceria em que ambas se beneficiam da produção de um químico de fonte renovável, foi o modelo que mais foi enfatizado durante as entrevistas.

Apesar de várias dificuldades apontadas ao longo de todo esse trabalho, já é fato que algumas empresas do setor reconhecem oportunidades em outros produtos e processos. O conceito de biorrefinaria para substituir a maior parte dos produtos de origem fóssil ainda pode estar distante, mas o reconhecimento do setor de poder gerar produtos diversificados já existe, e isso já é um sinal favorável para se esperar que o setor sucroenergético se torne umas das principais bases para uma indústria de produtos a base de matéria-prima renovável. O comentário do especialista 3 da pesquisa ilustra esse raciocínio:

Já tem usinas que a viabilidade não depende só de açúcar e etanol, ela só viabiliza porque está vendendo levedura em larga escala. Tem outra usina que preferiu usar o bagaço para fazer a cogeração. A outra usina está optando por fazer *pellets* de bagaço de cana para vender para o mercado europeu. A outra usina montou uma planta de biodiesel para alimentar suas máquinas. A outra está agregando uma planta de algas, então esse modelo eu acho que já existe. A

biorrefinaria de fato já existe, e a cana-de-açúcar talvez seja o exemplo mais emblemático disso.

6 CONCLUSÃO

A principal conclusão que pode ser tirada desse trabalho é que apesar do setor não estar aproveitando atualmente de forma intensa as oportunidades de inovação estudadas, a grande maioria dos especialistas sinalizou uma mudança nesse cenário. Em diversas situações foram detectados sinais de que as usinas estão ficando cada vez mais atentas a essas oportunidades e reconhecendo sua importância não só pela possibilidade de aumentar suas receitas, mas também como uma questão de sobrevivência da própria empresa no setor.

De forma geral, os principais fatores impulsionadores estão voltados para aspectos ambientais e financeiros, principalmente nas tecnologias de valorização da biomassa da cana-de-açúcar. Os principais fatores inibidores foram de origem tecnológica, política, organizacional e de custo.

Falando especificamente das oportunidades de inovação, é possível tirar as seguintes conclusões:

- **Cogeração e Venda da Bioeletricidade:** Não há dúvidas de que a oportunidade de venda da bioeletricidade é extremamente interessante tanto para o Brasil, que tem condições de melhorar a segurança energética do país com uma nova fonte renovável, quanto para a própria usina que acrescenta mais um produto em seu portfólio. No entanto, os fatores inibidores relacionados aos leilões (competição com a energia eólica e a ausência de um incentivo à geração próxima a rede) são barreiras grandes o suficiente para, se não impedir, pelo menos desacelerar o aproveitamento dessa oportunidade pelas usinas.
- **Etanol de Segunda Geração:** Sem dúvida a oportunidade mais citada dentre o conjunto analisado. O próprio título de oportunidade de inovação frequentemente era remetido ao processo de segunda geração. Não só o processo 2G foi bastante citado, como também foi reconhecido como a tecnologia radical mais provável de ser absorvida pelo setor. Apesar dos vários desafios apontados, a possibilidade dessa tecnologia estar presente no futuro da indústria foi aceita pelas três áreas analisadas. O fator inibidor que parece ser o mais relevante para retardar esse aproveitamento é a ausência de um incentivo político para facilitar a construção de uma curva de aprendizado.

- **Aproveitamento da Vinhaça:** Apesar do grande interesse apresentado pelos especialistas na produção do biogás, a oportunidade relacionada ao aproveitamento da vinhaça é principalmente impulsionada pela necessidade de dar uma nova destinação para esse material que agrida menos o meio ambiente do que a fertirrigação. Em relação aos aspectos tecnológicos, um fator impulsionador bastante citado para o biogás foi o desenvolvimento de pesquisas para utilização do gás de xisto em motores pesados.
- **Processo de Primeira Geração:** Ficou claro neste estudo que existem diversas oportunidades incrementais de inovação no processo de primeira geração. A dificuldade de implementar essas inovações nas usinas se deve principalmente pelo elevado investimento que deve ser feito que, no entanto, envolve apenas pequenos incrementos de produtividade. A discussão também deixou clara a heterogeneidade tecnológica do setor, mostrando que o potencial de aprimoramentos incrementais varia imensamente de acordo com a usina analisada.
- **Gaseificação:** Apesar da gaseificação apresentar diversas vantagens, principalmente em relação à sua flexibilidade (tanto de matéria-prima como de produtos) os especialistas não mostraram um grande interesse por essa oportunidade de inovação. Os elevados custos e a necessidade de grandes escalas foram os principais fatores inibidores. A discussão apontou uma clara preferência do setor pela plataforma bioquímica do que pela termoquímica, tanto para biocombustíveis como para químicos.
- **Novos Produtos:** Essa oportunidade foi bastante elogiada, no entanto parece ser a mais distante de ser implementada. Os principais fatores inibidores expressos pelos especialistas foram organizacionais e não só tecnológicos. A dificuldade de lidar com novos produtos e novos mercados pareceu ser grande o suficiente para pelo menos atrasar a exploração dessa oportunidade. Um fator impulsionador bastante relevante é o interesse de empresas de outros setores, principalmente da indústria química, em criar parcerias com as usinas de forma a aproveitar a biomassa.

Em relação à comunicação entre as áreas do setor, parece existir um distanciamento maior entre a indústria e a pesquisa. Esse distanciamento prejudica ambas as áreas, no caso da indústria, as oportunidades de inovar em seu setor ficam mais limitadas, e no caso da pesquisa, essa distância da indústria dificulta o reconhecimento das principais necessidades do mercado, se dedicando muitas vezes a pesquisas que não tem uma aplicação prática na indústria.

Foi detectado pelos especialistas que o reconhecimento da importância dessa comunicação é crescente, principalmente para a área de indústria, que percebe cada vez mais a importância de ganhar competitividade através de inovação.

Em relação às agências de política de incentivo à inovação, foi detectada uma boa comunicação tanto com a pesquisa quanto com a indústria. No entanto, foram verificados diversos problemas relacionados com a política nacional voltada para biocombustíveis e químicos a partir de renováveis. Dois dos principais problemas citados foram: o foco excessivo na cadeia do petróleo e a ausência de uma política contínua voltada para biocombustíveis e bioprodutos.

Assumindo a possibilidade que diversas dessas oportunidades serão aproveitadas ao longo da evolução do setor, o cenário que os especialistas identificaram foi o mais heterogêneo, isto é, não haverá um modelo de biorrefinaria que será perfeito para qualquer usina, muito ao contrário, cada usina deverá evoluir de acordo com as suas especificidades técnicas e gerenciais, sua localização e suas parcerias.

Como conclusão geral, pode-se dizer que as grandes empresas do setor vão aproveitar parte dessas oportunidades para aumentar sua competitividade através da inovação, destacando-se ainda mais num setor que já é bastante heterogêneo. Além disso, essa evolução das usinas para biorrefinaria vai ser cada vez mais acelerada conforme as áreas de pesquisa e indústria se aproximarem.

6.1 Oportunidades para novas pesquisas

Os resultados desse trabalho apresentam um diagnóstico do setor que abre oportunidades para várias novas pesquisas, tais como:

- **Outras oportunidades de inovação no setor sucoenergético:** Esse trabalho foi centrado na parte industrial, no entanto, existem diversas oportunidades relacionadas com a parte agrícola, como: melhoramento e modificação genética da cana-de-açúcar, novas técnicas de plantio, logística, coleta da palha no campo, aproveitamento do período de entressafra, entre outros. Mesmo na parte industrial existem algumas oportunidades que não foram exploradas, como a utilização do CO₂ liberado na fermentação.
- **Soluções para superar os fatores inibidores:** Diante de vários fatores inibidores de diferentes tipos (tecnológicos, organizacionais, políticos e de

custo) cabe uma análise sobre as alternativas para superá-los, tanto através de um estudo interno ao setor quanto externo.

- **Impactos dessas inovações na estrutura do setor:** É importante também buscar entender como essas inovações transformam o setor e o papel do setor sucroenergético no surgimento da indústria de produtos de fonte renovável.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, E. F. S.; SILVA, A. J. G., "Biorrefinarias - Rota Termoquímica". Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Química Verde no Brasil: 2010-2030, Capítulo 2, Edição Revista e Atualizada, Brasília, CGEE, 2010.

BOERRIGTER, H. Economy of Biomass-to-Liquids (BTL) plants. *Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)*. 2006.

BOMTEMPO, J. V.; ALVES, F. C. Innovation dynamics in the biobased industry. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. v. 1, n. 19, 2014.

BOZELL, J.; PETERSEN, R. Technology development for the production of biobased products from biorrefinery carbohydrates, the US Department of Energy's "Top 10" revisited. *Green Chemistry*, v. 12, n. 4, p. 525-728, 2010.

CAMARGO, J.A.; PEREIRA, N.; CABELLO, P.R.; TERAN, F.J.C. Viabilidade da aplicação do método respirométrico de Bartha para a análise da atividade microbiana de solos sob a aplicação de vinhaça. *Engenharia Ambiental*. n. 6, p. 264–271, 2009.

CANILHA, S.; CHANDEL, A.K.; MILESSI, T.S.S.; ANTUNES, F.A.F.; FREITAS, W.L.C.; FELIPE, M. G. A.; SILVA, S.S. Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition of hydrolysates, enzymatic saccharification and ethanol fermentation. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. v. 2012, 15 p. 2012.

CASTRO, A., J.A.; CASSIANO, D. A.; FERREIRA, N. L. Gaseificação do bagaço da cana-de-açúcar: modelagem, análise e comparação com o sistema real. *Exacta*. São Paulo, v.7, p. 39-47, jan/mar 2009.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. Considerações sobre a ampliação da geração complementar ao parque hídrico brasileiro. Texto de Discussão n. 15. Rio de Janeiro: Gesel/IE/UFRJ, 2010.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2014a. Ambiente Livre e Ambiente Regulado. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-

regulado?_afrLoop=1194377969465620#%40%3F_afrLoop%3D1194377969465620%26_adf.ctrl-state%3Dojsgqsnts_58> Acessado em maio de 2014.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2014b. Tipos de Leilões. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afrLoop=1194968856603651#%40%3F_afrLoop%3D1194968856603651%26_adf.ctrl-state%3Dojsgqsnts_71> Acessado em maio de 2014.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região Norte. Estado da Arte da Gaseificação. Setembro de 2002. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/Estado_da_Arte.pdf> Acesso em setembro de 2014.

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

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Química Verde no Brasil 2010-2030. Edição revisada e atualizada. Brasília – DF. 2010.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Sustainability of sugarcane bioenergy. Edição revisada e atualizada. Brasília – DF. 2012.

CHRISTENSEN, C. H.; RASS-HANSEN, J.; MARSDEN, C.C.; TAARNING, E.; EGBLAD, K. The Renewable Chemical Industry. *ChemSusChem.*, n. 1, p.283-289, 2008.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*, n. 33, p. 2752-2761, 2013.

CORTEZ, L.A.B., SILVA, A., DE LUCAS JUNIOR, J., JORDAN, R.A., DE CASTRO, L.R. Biodigestão de Efluentes. In: Cortez, L.A.B., Lora, E.S. (Eds.), *Biomassa para Energia*. Editora da UNICAMP, Campinas, pp. 493–529. 2007.

DANTAS, G. A. Alternativas de investimento do setor sucroenergético brasileiro para aproveitamento de bagaço e de palha. 2013. f. 183. Tese (Doutorado em Planejamento Energético). PPE, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

DIAS, M. O.S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; PAVANELLO, L. G.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D.F.; FILHO, R. M.; BONOMI, A. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. *Applied Energy*, n.109 p. 72-78, 2013.

DUNHAM, F. B. Co-Evolução da mudança tecnológica e institucional em sistemas de inovação: análise histórica da indústria de álcool combustível no Brasil. 2009. 409 f. Tese de doutorado. Rio de Janeiro, RJ: EQ/UFRJ. 2009

DUNHAM, F. B.; BOMTEMPO, J.V.; FLECK, D.L. A Estruturação do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro como Base para o Próalcool. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas (SP), n. 10, v.1, p. 35-72, 2010.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2012. Informe à imprensa. Demanda da Energia elétrica – 10 anos. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120104_3.pdf>. Acessado em maio de 2014.

FINGUERUT, J. Simultaneous production of sugar and alcohol from sugarcane. In: international society of sugar cane technologists (issct) congress, 25., Guatemala City, Guatemala, 2005.

FURLAN, F. F; FILHO; TONON, R.; PINTO, F. H. P. B.; COSTA, COSTA, C. B. B.; CRUZ, A. J. G.; GIORDANO, R. L. C.; GIORDANO, R. C. Bioelectricity versus bioethanol from sugarcane bagasse: is it worth being flexible?. *Biotechnology for biofuels*. v. 2013, n. 6, p. 142- 155, 2013.

FURTADO, A.T.; SCANDIFFIO, M.I.G.; CORTEZ, L.A.B. The Brazilian Sugarcane innovation system. *Energy Policy*. n. 39, p. 156-166, 2010.

GEO Energética. Conheça a Geo – Peril. Disponível em: <<http://www.geoenergetica.com.br/index.php>> Acessado em setembro de 2014.

GRANBIO. A Granbio – Quem somos. Disponível em: <http://www.granbio.com.br/conteudos/quem-somos/> Acessado em setembro de 2014.

GIL, A.C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. São Paulo. Editora Atlas SA. 2008. 200 p.

GOLDEMBERG, J.; GUARDABASSI, P. The Potential for first-generation ethanol production from sugarcane. *Wiley InterScience*. Biofpr - Biofuels, Bioproducts & Biorefining. p. 17-24, 2010.

HAMELINCK, C.N.; HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A.P.C. "Ethanol from lignocelulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term". *Biomass and Bioenergy*, v. 28, p. 384-410, 2005.

HECTOR, R. E.; MERTENS, J. A.; BOWMAN, M. J.; NICHOLS, N. N.; COTTA, M. A.; HUGHES, S. R. *Saccharomyces cerevisiae* engineered for xylose metabolism requires gluconeogenesis and the oxidative branch of the pentose phosphate pathway for aerobic xylose assimilation. *Yeast*, v. 28, p. 645–660, 2011.

HEKKERT, M. P. et al. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, p. 413-432. 2007.

IEA, International Energy Agency. CO₂ Emissions from fuel combustion. IEA STATISTICS. 2014a.

IEA, International Energy Agency. From 1st to 2nd – Generation Biofuel Technologies: an overview of current industry and RD & D activities. IEA. Paris. 2008.

IEA, International Energy Agency. Key World Energy Statistics. 2014b.

IEA, International Energy Agency. Technology Roadmap – Biofuels for Transport. IEA. Paris. 2011.

JORNAL DA ENERGIA. Jornal da Energia: O munda da eletricidade em tempo real. Geo Energética triplica a produção de biogás. Disponível em: <http://jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=16875&id_secao=15>Acessado em setembro de 2014.

LIMA, R. L.; MARCONDES, A. A. Álcool Carburante: Uma estratégia brasileira. Paraná: Editora UFPR. 2002. 248 p.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R.V.; SANCHEZ, C.G. et al. "Gaseificação". In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. (organizadores), Biomassa para Energia, Capítulo 9, Campinas, Editora Unicamp, 2009.

LUNDEVALL, B. A. National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning. London Priter, Londres. 1992.

MALERBA, F. Sectorial Systems: How and why innovation differs across sectors. *The Oxford Handbook of Innovation*. p. 380-401, 2006.

MALERBA, F.; ORSENIGO, L.. Schumpeterian patterns of Innovation are technology-specific. *Research Policy*, v. 25, p. 451-478, 1996.

MME, Ministério de Minas e Energia; 2014. Leilões de Energia. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html> Acessado em maio de 2014.

MME, Ministério de Minas e Energia; EPE, Empresa de Pesquisa Energética 2014. Balanço Energético Nacional de 2014.

MORAES, B. S.; JUNQUEIRA, T. S.; PAVANELLO, L. G.; CAVALETT, O.; MANTELATTO, P. E. BONOMI, A.; ZAIAT, M. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*. n. 113, p 825-835, 2013.

NAIK, S.N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A. K. Productions of first and second generation biofuel: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. n. 14, p. 578-597, 2009.

NAZATO, C.; SILVA, D. F. C.; FERRAZ, S. C. U.; HARDER, M. N. C. Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o tema. *Bioenergia em Revista: Diálogos*. p. 129 -129, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H. Bioetanol de cana-de-açúcar. Energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES e CGEE (orgs.), 2008.

NOVACANA. As usinas de etanol autorizadas pelo governo da Califórnia. Disponível em: <<http://www.novacana.com/dados/usinas/usinas-cadastradas-na-california>> Acessado em janeiro de 2015a.

NOVACANA. As usinas de etanol e açúcar do Brasil. Disponível em: <<http://www.novacana.com/usinas-brasil/>> Acessado em janeiro de 2015b.

NOVACANA. A Granbio inicia produção de etanol de segunda geração. Disponível em: < <http://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/granbio-producao-etanol-segunda-geracao-240914/>> Acessado em setembro de 2014.

NYKO, D.; FARIA, J. L. G.; MILANEZ, A. Y.; CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo. BNDES Setorial 33. *Bioenergia* p. 421 – 476, 2010.

OGEDA, T.L.; PETRI, D.F.S. Hidrólise enzimática de biomassa. *Quím. Nova*. v.33, n. 7, p. 1549-1558, 2010.

OLIVER, G.S.; SZMRECSÁNYI, T. A estação experimental de Piracicaba e a modernização tecnológica da agroindústria canvieira (1920-1940). *Revista Brasileira de História*. São Paulo, v. 23, n. 46, p. 37-60, 2003.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014b. Institucional. Disponível em: http://www.ons.org.br/institucional/o_que_e_o_ons.aspx. Acessado em maio de 2014.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico de Operação – Geração de Energia, 2014a. Disponível em: http://www.ons.org.br/institucional/o_que_e_o_ons.aspx. Acessado em maio de 2014.

PALMQVIST, E & HAHN-HAGERDAL, B. Fermentation of ligno-cellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource Technology*. v. 74, n. 1, p. 25–33, 2000.

PENATTI, C.P., CAMBRIA, S., BONI, P.S., ARRUDA, F.C.O., MANOEL, L.A., 1999. Efeitos da aplicação da vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. *Boletim Técnico Copersucar* 44, 32–38.

PINTO JÚNIOR, H. Q.; ALMEIDA, E.F.; BOMTEMPO, J.V.; IOOTTY, M.; BICALHO, R.G. Economia da Energia: Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial. Edição: 6ª. Rio de Janeiro: Elsevier Acadêmico, p. 360, 2007.

PINTO, P. C.; Tecnologia da gestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável. 1999. 147 f. Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia. Campinas – SP. 1999.

RAÍZEN. *Get to know Raízen*. Disponível em: <<http://en.raizen.com.br/en/raizen>> Acessado em setembro de 2014.

REZAIYAN, J.; CHEREMISINOFF, N.P.; *Gasification technology: a primer for engineers and scientists*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. 331 p.

RODRIGUES, A. H., 2008. Três patamares tecnológicos na produção de Etanol: a Usina do Proálcool, a Usina atual e a Usina do futuro. 2008. 160 p. Tese. Doutorado em Ciências Sociais. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.

SEABRA, J. E.A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*. Campinas, SP, Brasil, p. 421-428, 2010.

SIMISA. Limpeza da cana a seco e aproveitamento da palha. Disponível em: <<http://www.simisa.com.br/arquivos/download/Download85.pdf>>. Acessado em novembro de 2014.

SOCOL, C. R.; VANDENBERGHE, L. P. S.; MEDEIROS, A. B. P.; KARP, S. G.; BUCKERIDGE, M.; RAMOS, L. P.; PITARELO, A. P.; FERREIRA-LEITAO, V.; GOTTSCHALK, L. M. F.; FERRARA, M. A.; BON, E. P. D.; DE MORAES, L. M. P.; ARAÚJO, J. M.; TORRES, F. A. G. Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 13, p. 4820-4825, 2010.

Sun, Y.; Cheng, J. Y.; *Bioresour. Technol*; Saddler, J. N.; Ramos, L. P.; Breuil, C. *Bioconversion of Forest and Agricultural Plant Residues*; Saddler, J. N., ed.; CAB International: Wallingford, 1993, p. 73, 2002.

SWAIN, P. K.; DAS, L.M.; NAIK, S.N. Biomass to liquid: A prospective challenge to research and development in 21st. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 4917-4934, 2011.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBONOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão Anaeróbica da vinhaça: aproveitamento energético e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. *Semina: Ciências Agrícolas*, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010.

UDOP, União dos Produtores de Bioenergia. Califórnia deve pagar prêmio por etanol 2G. 09/2014. Disponível em: <

<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1117900>> Acessado em outubro de 2014.

UNICA. União da Indústria de Cana de Açúcar. Energia da Cana Pode Fortalecer o Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/palavra-do-presidente/43033975920331483908/a-energia-da-cana-pode-fortalecer-o-sistema-eletrico/>> Acessado em junho de 2014.

UNICA. União da Indústria de Cana de Açúcar. O setor sucroenergético – Histórico do Setor. Disponível em <<http://www.unica.com.br/linha-do-tempo/>> Acessado em janeiro de 2015.

UNICA. União da Indústria de Cana de Açúcar. Unicadata – Histórico de produção e moagem. Disponível em <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>> Acessado em janeiro de 2015b.

VALOR. Geo Energética recebe R\$160 milhões da Finep para pesquisa em biogás. Disponível em: <http://www.valor.com.br/agro/3482442/geo-energetica-recebe-r-160-milhoes-da-finep-para-pesquisa-em-biogas>. Acessado em setembro de 2014.

VERGARA, S.C. Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração. São Paulo. Editora Atlas SA. 1998. 90 p.

VERGES, P. H. Transição do Sistema de Produção e Inovação Sucroalcooleiro. 2013. f.106. Tese (Doutorado em Economia). Instituto de Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

ZANINI. Açúcar: Limpeza de cana a seco e aproveitamento da palha. Disponível em: <<http://www.sermatec.com.br/produtos/limpeza-de-cana-seco-e-aproveitamento-da-palha/>> Acessado em novembro de 2014.

8 ANEXO

8.1 Vantagens e desvantagens dos pré-tratamentos existentes

Pré-Tratamento	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Moagem (Físico)	Quebra mecanicamente a cristalinidade da celulose. O moinho de bolas é o mais comumente utilizado.	Por não necessitar de adição de químicos torna-se favorável ambientalmente. Não são gerados inibidores.	Por requerer elevada potência para movimentação do maquinário, possui elevados custos em energia. Longo tempo de operação. Para o bagaço, são necessários repetidos ciclos pelo moinho.
Micro-ondas (Físico)	Utiliza a interação direta entre a biomassa e ondas eletromagnéticas, gerando alta eficiência de aquecimento e fácil operação.	Tempo de reação curto. Aquecimento homogêneo da mistura reacional. Pequena geração de inibidores.	Para maior eficiência deve ser combinado com métodos químicos.
Explosão de Vapor (Físico-químico)	Um dos métodos mais comuns. Consiste em tratar a biomassa triturada com vapor (saturado, 160°C-260°C) e em seguida submete-la a uma rápida descompressão. Promove a hidrólise da hemicelulose.	Requer pouco, e em alguns casos, nada de adição de químicos. Tem um curto tempo de reação (1-10min) com rendimento de xilose de aproximadamente 45%-65%.	É preciso uma lavagem para remover componentes degradados que reduz a solubilidade dos açúcares.
Ammonia Fiber Explosion (AFEX) (Físico-químico)	De forma semelhante à explosão de vapor, a biomassa é exposta à amônia líquida a alta temperatura e pressão e em seguida sofre uma descompressão.	Remoção eficiente de lignina. Pequena quantidade de inibidores produzidos. É um processo relativamente simples e rápido. Boa conversão dos açúcares em etapas posteriores.	É caro devido à presença da amônia, mas pode ter seu custo reduzido se a mesma for reciclada.

Pré-Tratamento	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Explosão de CO₂ (Físico-Químico)	Semelhante ao AFEX. As moléculas de CO ₂ , que tem tamanho similar ao da água penetram nas superfícies do bagaço e da palha, melhorando a hidrólise da celulose e hemicelulose.	Conversões maiores que a explosão de vapor. Menor custo que a AFEX. Sem formações de inibidores.	É um método de difícil operação e processos complexos.
LHW - Liquid Hot Water (físico-químico)	Emprega água quente a altas pressões. O contato da biomassa com a água quente pressurizada é inferior a 15 minutos com temperaturas que variam entre 200°C e 230°C.	Alta recuperação de xilose 88-98%. Sem utilização de químicos. Não necessita da redução da biomassa.	Ainda em estágio laboratorial.
Ácido diluído (Químico)	A solubilização da hemicelulose ocorre a altas temperaturas. O ácido mais comumente utilizado é o sulfúrico, podendo também ser o clorídrico ou o nítrico.	A fração da hemicelulose é hidrolisada em pentoses e se melhora a hidrólise da celulose.	É um processo caro, pois exige investimentos manutenção (devido principalmente à corrosão) e a neutralização do ácido. A alta temperatura Do sistema pode degradar os açúcares. Possibilidade de formação de outros sub-produtos que são considerados inibidora da fermentação microbiana.

Pré-Tratamento	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Ácido Concentrado (Químico)	Semelhante ao ácido diluído, no entanto não exige temperaturas tão altas.	Por permitir menores temperaturas, ocorre menor degradação dos açúcares.	É um processo caro que pode se tornar mais competitivo com a recuperação e o reaproveitamento dos ácidos. Possibilidade de formação de outros sub-produtos que são considerados inibidora da fermentação microbiana.
Alcalino (Químico)	É um processo de delignificação que ocorre em paralelo com a solubilização de uma grande parcela hemicelulose, através de uma base como hidróxido de sódio.	Utiliza temperaturas e pressões mais baixas que qualquer outro pré-tratamento. Muitos sais cáusticos podem ser regenerados. Possui menor degradação de açúcares se comparado com os métodos que utilizam ácidos. Os custos do reator são mais baixos do que os das tecnologias com ácidos.	Tempo de ação pode durar de horas a dias. O uso de sais mais caros em concentrações elevadas é uma desvantagem significativa que levanta preocupações ambientais e pode conduzir a reciclagem, tratamento de águas residuais e custos de manutenção.
Delignificação Oxidativa (Químico)	Neste processo, a degradação da lignina é catalisada pela enzima peroxidase na presença de H ₂ O ₂ .	Opera em fluxo contínuo com elevada carga de biomassa e baixa carga de H ₂ O ₂ .	Ainda não é um método tão explorado como os termoquímicos.
Ozonólise (Químico)	Utiliza o ozônio para degradar as frações de lignina e hemicelulose da biomassa.	Tem boa eficiência na remoção da lignina e não produz resíduos tóxicos que podem prejudicar os processos seguintes. As reações ocorrem em temperaturas e pressões ambientes.	O processo é caro devido a grande quantidade de ozônio.

Pré-Tratamento	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Organosolv (Químico)	Consiste na utilização de um solvente orgânico (etanol, metanol, acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H ₂ SO ₄ , HCl) com o objetivo de quebrar as ligações internas da lignina e hemicelulose.	O processo de organosolv utiliza menor quantidade de produtos químicos para neutralizar o hidrolisado e gera poucos resíduos em comparação com outros processos semelhantes.	Utiliza agentes químicos.
Oxidação úmida (Wet oxidation) (Químico)	O processo de oxidação úmida ocorre na presença de oxigênio ou ar, catalisada, em que o catalisador mais usado é o carbonato de sódio.	Alta conversão da biomassa em monossacarídeos com baixa formação de inibidores.	É um processo caro.
Fungos (Biológico)	Os fungos degradam a lignina através da ação de enzimas como peroxidases e lactases.	Baixa necessidade de energia. Condições brandas.	Baixa eficiência associada à perda de carboidratos. Longos tempos de residência. Necessita de forte controle sobre as condições de crescimento do fungo.

Fonte: Construído com base em CANILHA *et al.* (2012), SEABRA (2008), HAMELINCK *et al.* (2005) e IEA (2008).