



## POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A CADEIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Caio Márcio de Ávila Martins Pinhão

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Rogério de Aragão Bastos do Valle  
Luiz Pinguelli Rosa

Rio de Janeiro  
Novembro de 2015

# POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A CADEIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Caio Márcio de Ávila Martins Pinhão

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

Examinada por:

---

Prof. Rogerio de Aragão Bastos do Valle, D.Sc.

---

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

---

Prof. Carlos Alberto Nunes Cosenza, D.Sc.

---

Prof. Eduardo Homem de Siqueira Cavalcanti, Ph.D.

---

Prof. Antônio Maria Francisco Luiz José Bonomi, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2015

Pinhão, Caio Márcio de Ávila Martins

Políticas Públicas para a Cadeia da Cana-de-Açúcar. /  
Caio Márcio de Ávila Martins Pinhão. - Rio de Janeiro:  
UFRJ/COPPE, 2015.

XX, 202p. 29,7 cm

Orientadores: Rogério de Aragão Bastos do Valle

Luiz Pinguelli Rosa

Tese (doutorado) - UFRJ/COPPE/ Programa de  
Engenharia de Produção, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 189-200.

1. Etanol; 2. Políticas Públicas; 3. Energia Renovável; 4.  
Desenvolvimento Sustentável; 5. Cana-de-Açúcar. I. Valle,  
Rogério de Aragão Bastos do *et al.* II. Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de  
Produção III. Título.

*A meus filhos Guido 'Lancelot' e Caio  
A meus netos Cauã 'Bambam' e Theo  
À minha nora Julianna  
À minha querida Carla  
À minha mãe e magnífica soprano Lizette  
A meu pai Comte Cidinho 'O Camelô'(in memoriam)*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Luiz Pinguelli Rosa, minha mais importante referência profissional, que, ao me acolher, em 1980, na recém-formada Área Interdisciplinar de Energia da COPPE, me apresentou à arte da observação e ao pensamento científico, mudando a minha equivocada percepção do que era ser um engenheiro.

Ao professor e orientador Rogério Valle, com quem compartilhei as alamedas do CMRJ algumas décadas atrás, que me acolheu no SAGE e nestes dois últimos anos me mostrou que era possível organizar o caos que se instalava periodicamente na minha mente e, assim, traduzir os meus conhecimentos neste manuscrito, nesta tese.

Ao BNDES pela oportunidade de realizar esse Curso.

Ao professor Ignacy Sachs da École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS), e diretor do Centre de Recherches sur le Brésil Contemporain, que com seu entusiasmo pela biomassa, em geral, e pela cana, em especial, me ecaminhou o tema.

Aos professores Dominique Finon e Venance Journée do CIRED/CNRS, pelas horas de conversa sobre a economia da energia, a economia da inovação, as imperfeições de mercado, as assustadoras virtudes da energia nuclear, o prazer de esquiar, a hipocrisia mundial, o bom cinema mundial e a música brasileira.

À Fátima, Sheyla, Rafaela, Juliano, Rocha, Sandra, Lindalva, Roberta e Pedrinho pela atenção e disponibilidade.

À Usina São Manoel, CTC, ESALQ, CTBE, Dedini, TGM, Usina São Martinho, GranBio, Beta Renewables, CIRED/CNRS, Instituto Superior Técnico (IST) e Conab.

À Yolanda, Cláudio Leal, Adriane Rodrigues, João Ferraz, Júlio Ramundo, Alexandre Siciliano, Nelson Siffert, Adriana Antunes, Robertinha, Paulo Faveret, Márcio MMC Macedo, Márcio Migon, Gabriel Gomes, Pedro dos Passos, Dalmo, Helena Lastres, Cristina Lemos, ao Departamento de Prioridades, ao CEC.

À Artur Milanez, Cadu e Luizão, insuperáveis e valiosos defensores do etanol celulósico, que me contagiaram.

À Sandrine e Flávio Bruno, meu grupo de estudo favorito em todos os tempos.

À Sérgio Trindade, feliz encontro profissional e pessoal, com quem nunca falta assunto.

Ao meu compadre e implacável revisor Heitor.

À minha querida amiga Cristiane, pelo incentivo, da primeira à última hora, e pela mobilidade que me proporcionou.

Aos meus amigos queridos e queridos consultores acadêmicos Calu, Malu, Cícero e Cristiane.

E, carinhosamente, a todos aqueles que me aturaram e aturam, sambando nas cordas bambas de uma viola vadia: Carla, Showninha Dumont, Ana Bia, Guilherme 'Old Spice', Claudete, 'Maravilha Curativa' Klumb, MC Rangel, Solange, Primo, Cahíto, Julianna, Calu, Márcia, Heitor, Bárbara, Rejane, Paula, Joana, Flávia, Fernanda, Ivan, Cícero, Lucia, Artur, Simone, Carlinhos, Fátima, Lele, Marcelinho Pássaro, Paulo Roberto, Julinhas, Alain, Edy, Luciana, Ricardão, André, Mauro, Edu, Laurelena, Tenório, Marcinha, Zylton, Gisela, Luiza, Cristiana, Jorjão, Alvinho, Fellini, Deglis, Marcel, Dona Stella, Thaiszinha, Claudinho, Denise, Monique, Anginha, Paulo Moreira, Tininha, Tábata, Cláudia, Cafê, Saab, Ana Christina, Helena, Catherine, Shirley, Marianne, Marcus, Rebecca, Frederico, Casemiro, Edilson 'Capetinha', Dona Lourdes, Adolfo, Severino, Dona Maria, Tiana, Veve, Hellen, Dona Rosa, William Wilson, Robert Holbrook, Mauro, Milet, Ovídio, Ned, Ricardo, Anginha, Júlio Gamboa, Edna, Teresa, Maria Teresa, Maurição, Álamo, Lise, Ana Maria, Dulce, Nelsinho, Teresa Cristina, Dora, Florence, Patrick, Eric, Domingos, Zeca, Justa Causa, Tatá Valença, Bruna, Ana, Alba, Garcia D'Ávila, Baixo Vovô e Posto Onze.

*Não espere de mim nada mais que a paixão  
Não espere nada demais do meu coração  
Que bate rebate e grita  
Geme chora e se agita  
Sambando nas cordas bambas de uma viola vadia, vadia  
Não, não espere encontrar numa canção  
Nada além de um sonho  
Nada além de uma ilusão  
Talvez, quem sabe, a verdade  
A infinita vontade  
De arrancar de dentro da noite  
A barra clara do dia*

**E. Gismonti e J. C. Pádua**

*Vida, vida pouca  
Consola e força uma breve emoção  
Do lamento ao riso  
Nunca o paraíso  
Sempre um poço de contradição  
E vai na efemeridade  
Que o eterno já passou  
Disfarça com arte  
Ilumina o que restou  
E vai colhendo outras flores  
Traz um sonho e um bouquet  
Abraços, saudades  
Carinhos com você*

**Primavera Barroca**

*"Um dos paradoxos dolorosos do nosso tempo reside no fato de serem os estúpidos os que têm a certeza, enquanto os que possuem imaginação e inteligência se debatem em dúvidas e indecisões"*

**Bertrand Russell**

*A verdade surge mais facilmente do erro do que da confusão*

**Francis Bacon**

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A CADEIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Caio Márcio de Ávila Martins Pinhão

Novembro / 2015

Orientadores: Rogerio de Aragão Bastos do Valle

Luiz Pinguelli Rosa

Programa: Engenharia de Produção

Esta tese propõe a reformulação do modelo de negócios da indústria do etanol no Brasil, hoje fortemente relacionada ao mercado de açúcar e aos preços da gasolina automotiva, que inibem o estabelecimento de uma lógica de mercado própria para o etanol, resultando em frequentes oscilações de oferta e em baixa atratividade para os investimentos, que reprimem o crescimento do setor.

É recomendado um modelo baseado na eficiência energética das usinas, maximizando o uso da energia da cana, com unidades de etanol celulósico e cogeração de eletricidade, que estabeleçam condições empresariais e políticas, para reduzir as incertezas existentes na oferta de etanol e maximizar a sustentabilidade da matriz energética brasileira.

São apresentadas duas linhas de ação principais: a primeira, para promover a modernização tecnológica com melhoria da eficiência energética de parcela significativa das cerca de 400 usinas em operação, que podem vir a incorporar um módulo de etanol celulósico; e a segunda, para estimular a expansão da oferta de etanol com unidades fundamentadas na tecnologia do etanol celulósico, buscando novas variedades de canas-de-açúcar destinadas à obtenção de combustível, no *upstream*, e direcionando biorrefinarias para a química verde, no *downstream*.

A utilização plena da energia contida na cana-de-açúcar (caldo, bagaço e palha) e a tecnologia do etanol celulósico mudam a estratégia de negócios do setor e reduzem sua dependência aos preços do petróleo e do açúcar no mercado internacional. A realização do modelo proposto requer a efetiva presença do Estado e o estabelecimento de Políticas Públicas para a consolidação da cadeia da cana-de-açúcar.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.).

## PUBLIC POLICY FOR SUGARCANE NETWORK

Caio Márcio de Ávila Martins Pinhão

November / 2015

Advisors: Rogerio de Aragão Bastos do Valle

Luiz Pinguelli Rosa

Department: Production Engineering

This thesis proposes a reformulation of the ethanol industry business model in Brazil, which today is strongly linked to the sugar market (co-product of ethanol production in most Brazilian mills), as well as to automotive gasoline prices. These facts inhibit the establishment of an own market logical for ethanol, resulting in frequent supply oscillations or low attractiveness for investments which stifles sector growth.

A model based on the energy efficiency of plants, maximizing the use of energy from sugarcane, with units of cellulosic ethanol and cogeneration of electricity, is advocates. This could establish business and political conditions that would reduce the uncertainties existent in ethanol supply and maximize the sustainability of the Brazilian energy matrix.

A model with two main lines of action put forward: first, promoting the modernization and energy efficiency of a portion of the approximately 400 existing units, which would comprise the addition of a cellulosic ethanol unit; second, encouraging the expansion of supply with units designed for 2G ethanol technology, which would result in new varieties of sugarcane (energy-sugarcane, for example), in the upstream, and green chemistry biorefineries, in the downstream.

The full utilization of the sugarcane (juice, bagasse and straw) and the 2G technology should change the logic of the sector, making it less dependent on international fuel oil prices or sugar prices. The completion of the proposed model requires the Brazilian State's presence and the establishment of Public Policies to consolidate the sugarcane network.

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 - PANORAMA</b>	<b>4</b>
<b>1. Pequena História do Domínio da Energia: da Idade do Fogo à Revolução Industrial</b>	<b>4</b>
1.1. Da Pré-História aos Mundos Antigos: Conversores Biológicos	4
1.2. O Modelo Energético Chinês	6
1.3. O Ocidente Medieval	8
1.5. A Revolução Industrial	10
<b>2. Breve Panorama Mundial da Energia</b>	<b>11</b>
<b>3. A Questão Energética no Brasil</b>	<b>16</b>
<b>4. Política de Combustíveis, Política Ambiental e Política Inflacionária: Petróleo e Etanol no Brasil</b>	<b>22</b>
<b>5. Alimentos x Biocombustíveis</b>	<b>31</b>
5.1. Terra, Água e Tecnologia	32
5.2. Preços das Commodities Agrícolas nos EUA	33
5.3. Ameaça ao Bioma Amazônico	36
<b>CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO</b>	<b>41</b>
<b>Introdução ao Marco Teórico</b>	<b>41</b>
Para Comandar a Natureza é Preciso Obedecê-la	42
<b>PARTE I: DESENVOLVIMENTO, SUBDESENVOLVIMENTO E A NOVA RELAÇÃO CENTRO-PERIFERIA</b>	<b>43</b>
<b>1. Prebisch, o Centro e a Periferia</b>	<b>43</b>
Furtado, o Desenvolvimento e o Subdesenvolvimento	44
<b>2. Neoclássicos e Intervencionistas</b>	<b>46</b>
2.1. A Cepal e o Estruturalismo	48
2.2. Como ficou a Periferia?	49
2.3. Rota de Ocupação	51
<b>3. Pós-Industrialização</b>	<b>53</b>
<b>4. Os BRICS e a Nova Periferia</b>	<b>57</b>
4.1. A Estratégia dos Países Centrais	59

4.2. O Rescaldo no Terceiro Mundo	62
4.3. O Caso Chinês	64
4.4. Nem tudo deu errado	66
4.5. Crescimento ou Desenvolvimento?	68
<b>5. A Neoperiferia</b>	<b>70</b>
<b>6. Conclusão da Parte I</b>	<b>72</b>
<b>PARTE II: POLÍTICA TECNOLÓGICA E POLÍTICA AMBIENTAL</b>	<b>74</b>
<b>1. A Herança Evolucionista</b>	<b>74</b>
1.1. Políticas Intervencionistas	74
1.2. As Visões Neoclássica e Evolucionista	76
<b>2. Falhas de Mercado</b>	<b>76</b>
a) Externalidades	77
b) Assimetria de informações	77
c) Mercados Incompletos (Incertezas)	77
d) Custo das transações elevado	78
2.1. Ampliando o Retorno social da Intervenção Pública	78
2.2. A "Mão Invisível" e as Externalidades: Tecnologia e Meio Ambiente	79
2.3. Retornos Crescentes Dinâmicos	80
2.4. Incerteza e Inovação Tecnológica	81
<b>3. Ação do Estado - Intervenção Pública: Justificativas e Limites</b>	<b>82</b>
3.1. Sistema Público de Inovação: Infraestrutura Pública de Pesquisa	82
3.2. Aumento do retorno privado	83
3.2.1. Pelo Lado da Oferta	83
3.2.2. Pelo Lado da Demanda	87
<b>4. Conclusão da Parte II</b>	<b>91</b>
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>93</b>
<b>1. Panorama Setorial</b>	<b>93</b>
1.1. Etanol Anidro e Etanol Hidratado	94
1.2. Preço da Energia	94
1.3. Histórico do Setor Sucroalcooleiro no Brasil	96
1.4. Modelos De Usina Atuais	100
<b>2. A Cana</b>	<b>102</b>
2.1. Fase Agrícola	104
2.2. Comentários Adicionais sobre a Colheita da Cana	106
2.3. Considerações sobre a Palha	110

2.4. Colheita Mecanizada versus Emprego	112
2.5. Fase Industrial: Processamento da Cana	112
a) Limpeza e moagem	113
O BAGAÇO	113
b) Tratamento do caldo	114
c) Fábrica de açúcar	114
d) Destilaria: fabricação do etanol	115
e) Energia e efluentes	116
e.1) Cogeração e bioeletricidade	117
e.2) Sistemas a vapor: caldeiras, turbinas e geradores	118
e.3) Água, resíduos, subprodutos e efluentes	119
<b>3. A Energia da Cana</b>	<b>120</b>
Eficiência da Geração de Energia Elétrica nas Usinas Atuais	121
<b>4. Etanol Celulósico</b>	<b>124</b>
4.1. Rotas Tecnológicas: Hidrólise Ácida e Hidrólise Enzimática	125
Hidrólise do Estado Crítico	128
Hidrólise Ácida	128
Hidrólise Enzimática	129
4.2. Fermentação	130
4.3. Enzimas	132
4.4. Pré-Tratamento	133
4.4.1. Características Estruturais da Biomassa Lignocelulósica	133
4.4.2. Processos de Pré-Tratamento da Lignocelulose	135
4.4.3. Pré-Tratamento da Palha	136
4.4.4. Cogeração na Segunda Geração	137
4.5. Química Verde	137
Plásticos biodegradáveis	139
4.6. Cana-Energia	140
<b>5. Modelo para o Etanol Celulósico em Sete Cenários</b>	<b>143</b>
5.1. Introdução	143
5.2. Cenários Selecionados para análise do modelo	145
5.3. Premissas	148
Para cana convencional	148
Para cana-energia	149
5.4. Resultados dos Cenários	152
5.4.1. Estimativa dos Custos de Produção da Biomassa	152
5.4.2. Estimativas de Investimento Industrial	154
Etanol Convencional (1G) + Interface	154
Etanol Celulósico (2G)	154
Investimentos e Custos de Produção	155
<b>5. Conclusão do Capítulo 3</b>	<b>157</b>

<b>CAPÍTULO 4 - UM MODELO PARA O SETOR</b>	<b>158</b>
<b>1. Resultados da Análise Setorial</b>	<b>158</b>
<b>2. Novos Modelos Industriais</b>	<b>160</b>
Otimização	161
Linha Greenfield Celulósico	162
Linha Módulo de Hidrólise	162
<b>3. Esforços em Andamento em Direção ao Modelo</b>	<b>165</b>
Recolhimento da palha	166
Cana-energia	166
Pré-tratamento na planta de hidrólise	166
Enzimas	166
<b>4. O Etanol Celulósico no Brasil e o Modelo Proposto</b>	<b>167</b>
<b>5. Validação do Modelo por Especialistas</b>	<b>169</b>
<b>CAPÍTULO 5 - POLÍTICAS PÚBLICAS PARA NOVAS FONTES DE ENERGIA</b>	<b>172</b>
<b>1. Novas Tecnologias - Mecanismos de Entrada</b>	<b>174</b>
1.1. Avaliação do Estágio Tecnológico	174
1.2. Barreiras	176
1.3. Barreiras Econômicas: o Exemplo do Setor Elétrico	177
<b>2. Política Pública para o Etanol 2G no Brasil</b>	<b>179</b>
2.1. Mandato Obrigatório de Mistura	180
2.2. Subsídios ao Consumo	180
2.3. Incentivos à produção - Isenção de Tributos e Financiamento	181
2.4. Financiamento Contínuo à P&D	181
2.5. Metas Ambientais para Transporte e Energia (MATE)	182
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b>	<b>185</b>
<b>Referências</b>	<b>189</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Oferta de energia primária .....	12
Figura 1.2. Evolução dos preços do petróleo .....	12
Figura 1.3. Divisão do consumo mundial de petróleo por setor.....	14
Figura 1.4. Divisão das emissões de CO <sub>2</sub> eq na combustão, por fonte .....	15
Figura 1.5. Distribuição da oferta de energia – 2012 .....	17
Figura 1.6. Evolução da produção de cana, açúcar e etanol no Brasil .....	18
Figura 1.7. Evolução da produção de etanol no Brasil.....	19
Figura 1.8. Distribuição da energia da cana (total de 90 Mtep em 2012) .....	21
Figura 1.9. Distribuição da energia do petróleo (total de 102 Mtep em 2012) .....	22
Figura 1.10. Abertura e encerramento de biorrefinarias.....	23
Figura 1.11. Custos operacionais na etapa agrícola 2010 - São Paulo .....	25
Figura 1.12. Receita média das usinas por tonelada de cana.....	27
Figura 1.13. Déficit na oferta de combustível no Brasil.....	28
Figura 1.14. Projeção da oferta de derivados de petróleo no Brasil.....	29
Figura 1.15. Consumo de milho EUA: safra (2012/2013) .....	34
Figura 1.16. Produção de etanol e rentabilidade nos EUA.....	35
Figura 1.17. Localização das usinas de cana no Brasil .....	36
Figura 1.18. Área plantada com cana-de-açúcar em 2009 .....	38
Figura 1.19. Área total de pastos para pecuária em 2009.....	39
Figura 2.1. Evolução da participação de combustíveis fósseis nos BRICS e países da OCDE .....	57
Figura 2.2. Evolução do PIB em países selecionados 1975, 1990 e 2010.....	61
Figura 2.3. Consumo setorial de energia em países selecionados 1975, 1990 e 2010 ...	61
Figura 2.4. BRICS: Evolução da oferta de energia primária - carvão mineral.....	62
Figura 2.5. BRICS: Evolução da oferta de energia primária total.....	63
Figura 3.1. Evolução da área plantada de cana no Brasil .....	93
Figura 3.2. Evolução do preço do barril de petróleo (WTI/FOB) e da produção de etanol no Brasil.....	95
Figura 3.3. Automóvel a álcool, 1925, com tecnologia desenvolvida pela Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (EECM).....	97
Figura 3.4. Evolução da frota de veículos ciclo Otto, no Brasil.....	99
Figura 3.5. Fluxograma de operação de uma planta flexível.....	101
Figura 3.6. Queima do canaviaal para colheita manual .....	108
Figura 3.7. Enfardamento da palha no campo .....	111
Figura 3.8. Balanço Simplificado da Energia da Cana.....	120
Figura 3.9. Complementariedade entre a disponibilidade de ENA das Usinas Hidroelétricas do Sudeste e a energia potencial da safra de cana. ....	124
Figura 3.10. Hidrólise das cadeias de hidrocarbonetos .....	125
Figura 3.11. Produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos .....	127
Figura 3.12. Morfologia estrutural da biomassa lignocelulósica .....	134
Figura 3.13. Comparação de aspectos da cana convencional e da cana-energia.....	141

Figura 3.14. Cenários de produção de etanol (2016-2030) .....	144
Figura 3.15. Cenários para estudo da produção de etanol (2016-2030) .....	147
Figura 4.1. Linha de <i>greenfield</i> celulósico .....	164
Figura 4.2. Linha módulo de hidrólise .....	165
Figura 5.1. Impacto das Políticas Públicas na competitividade das energias fósseis e renováveis .....	172
Figura 5.2. Vetores para definição de investimento em energias renováveis.....	173
Figura 5.3. Curva de implantação tecnológica .....	174
Figura 5.4. Barreiras à implantação das novas tecnologias.....	176

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Introdução das técnicas agrícolas e mecânicas na China e na Europa .....	7
Tabela 1.2. Introdução das técnicas agrícolas e mecânicas na China e na Europa .....	9
Tabela 1.3. Emissões de CO <sub>2</sub> pelo consumo de energia (Mt métricas de CO <sub>2</sub> eq.) .....	16
Tabela 1.4. Balanço da produção de cana, açúcar e etanol e seu equivalente energético .....	20
Tabela 1.5. Coeficientes de equivalência energética da cana e do etanol .....	20
Tabela 1.6. Preço médio do etanol hidratado e das importações de petróleo e gasolina	24
Tabela 1.7. Endividamento da Petrobras junto a bancos públicos (em R\$ bilhões).....	26
Tabela 1.8. Emissões evitadas em relação à gasolina.....	31
Tabela 1.9. Milho, soja, trigo e cana: EUA e Brasil.....	33
Tabela 1.10. Evolução da capacidade instalada de produção de etanol nos EUA .....	35
Tabela 1.11 – Evolução do desmatamento da Amazônia Legal entre 2004 e 2014 .....	39
Tabela 2.1. Dimensões das sociedades segundo o estágio de desenvolvimento .....	56
Tabela 2.2. Indicadores energéticos e ambientais de países selecionados .....	58
Tabela 2.3. Evolução da geração termofóssil de energia elétrica (TWh).....	63
Tabela 3.1. Capacidade de moagem de cana e participação de mercado dos oito principais grupos sucroalcooleiros em 2015 .....	100
Tabela 3.2. Demandas de energia no processamento da cana .....	117
Tabela 3.3. Geração de energia elétrica a partir bagaço .....	122
Tabela 3.4. Rendimentos da geração por unidade de cana e de bagaço .....	122
Tabela 3.5. Rendimentos da geração por unidade de cana e de bagaço .....	123
Tabela 3.6. Parâmetros dos processos de hidrólise da celulose.....	126
Tabela 3.7. Características dos processos de pré-tratamento da lignocelulose .....	135
Tabela 3.8. Aplicações do processamento do etanol .....	138
Tabela 3.9. Composição das biomassas.....	150
Tabela 3.10. Principais premissas na produção da cana convencional (CC) e da cana-energia (CE).....	151
Tabela 3.11. Parâmetros industriais dos cenários.....	151
Tabela 3.12. Custo dos colmos de CC, palha de CC e CE (colmo e palha juntos) .....	152
Tabela 3.13. Produtividade de etanol e eletricidade.....	153
Tabela 3.14. Estimativas de investimentos (em R\$ e US\$) .....	156
Tabela 3.15. Estimativa dos custos de produção do E1G e E2G.....	156
Tabela 4.1. A corrida tecnológica no Brasil .....	168
Tabela 5.1. Características gerais de mecanismos de suporte às Políticas Públicas ....	179

# LISTA DE ABREVIATURAS (SIGLAS, UNIDADES E DEFINIÇÕES)

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP – Agência Nacional de Petróleo
- ATR – Açúcar Total Recuperável
- BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- BNDES (AI/DEBIO) – Departamento de Biocombustíveis do BNDES
- Brent - um tipo de petróleo do Mar do Norte que se tornou referência para o mercado de petróleo
- BRICS – acrônimo que se refere aos países membros do grupo político de cooperação constituído pelo Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
- cana – nesta tese, termo empregado genericamente, para designar a cana-de-açúcar
- cana-convencional – variedade de cana-de-açúcar que apresenta alto teor de sacarose e menor teor de fibras, especialmente apropriada para a produção de açúcar
- cana-energia – variedade de cana-de-açúcar que apresenta menor teor de sacarose e maior teor de fibras
- CAPEX – sigla derivada da expressão inglesa Capital Expenditure, que designa o capital despendido na implantação ou introdução de melhorias em qualquer tipo de empreendimento, podendo ser industrial, de infraestrutura ou comercial (os recursos operacionais são denominados OPEX)
- CC – cana convencional
- CCE – Comunidade Comum Europeia
- CE – cana-energia
- CIDE – Contribuições de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE) são tributos brasileiros do tipo contribuição especial de competência exclusiva da União. São tributos de natureza extrafiscal e de arrecadação vinculada
- CNPEM – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
- CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>
- CO<sub>2</sub> equivalente – dióxido de carbono **equivalente** – resultado da multiplicação das toneladas emitidas de gases de efeito estufa (GEE) pelo seu potencial de aquecimento global. Por exemplo, o potencial de aquecimento global do gás metano é 21 vezes maior do que o potencial do CO<sub>2</sub>. As emissões são medidas em toneladas

métricas de CO<sub>2</sub>eq por ano, ou através de múltiplos como milhões de toneladas (MtCO<sub>2</sub>eq) ou bilhões de toneladas (GtCO<sub>2</sub>eq)

- CO<sub>2</sub>eq ou CO<sub>2</sub>e – CO<sub>2</sub> equivalente
- CTBE – Centro de Tecnologia do Bioetanol
- CTBE/CNPEM – Centro de Tecnologia do Bioetanol que faz parte do CNPEM
- CTC – Centro de Tecnologia Canavieira
- DDGS - Dried Distillers Grains with Solubles (proteína vegetal desidratada)
- Dorna volante - reservatório de vinho
- E1G – etanol de primeira geração, etanol 1G, ou etanol convencional
- E2G – etanol de segunda geração, etanol 2G, ou etanol celulósico
- ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP
- Etanol celulósico – etanol obtido de fontes celulósicas, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar
- Etanol celulósico ou etanol 2G ou E2G – etanol obtido a partir da hidrólise de fontes celulósicas, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar ou outras fontes lignocelulósicas
- Etanol convencional ou etanol 1G ou E1G - etanol obtido a partir da fermentação dos açúcares primários da cana-de-açúcar, milho, beterraba, trigo, sorgo,
- ETC – Estrutura de Tráfego Controlado
- FDI – Foreign Direct Investment ou IDE - Investimento Direto Estrangeiro
- FEAGRI/UNICAMP – Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp
- Fermento - suspensão de células de leveduras (pé de cuba) concentradas, que garantem a fermentação de determinado volume de mosto em condições econômicas.
- Flegma - produto principal de destilação mistura hidroalcoólica impura, com graduação alcoólica entre 45 a 50°GL
- Flegmaça - resíduo aquoso da retificação do flegma isento de álcool.
- GEE – gases de efeito estufa
- Graus GL (°GL) - percentagem de álcool, em volume.
- Gt – gigatonelada - 10<sup>9</sup> t
- GtCO<sub>2</sub>e ou GtCO<sub>2</sub>eq – bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente
- ha – hectare ou hectômetro quadrado (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>)
- IDE - Investimento Direto Estrangeiro ou FDI – Foreign Direct Investment
- ILUC - Indirect Land Use Change (uso indireto da terra)

- Leite de levedura: Suspensão de células altamente concentrada, recuperadas no final da fermentação alcoólica
- Mbpd – milhão de barris de petróleo por dia
- MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio
- Mha – megahectare ou milhão de hectare,  $10^6$  ha ou  $10^{10}$  m<sup>2</sup>
- Mosto - Líquido açucarado capaz de fermentar
- Mt – megatonelada ou milhão de tonelada,  $10^6$  t
- Mtc – milhão de toneladas de cana
- MtCO<sub>2</sub>eq ou MtCO<sub>2</sub>e – milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente
- OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Agrupa 34 países: Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Grécia, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Noruega, Países Baixos, Portugal, Reino Unido, Suécia, Suíça, Turquia, Alemanha, Espanha, Canadá, USA, Austrália, Polónia, Coreia do Sul, Japão, Nova Zelândia, México, República Checa, Hungria, Finlândia, Eslováquia, Chile, Eslovênia, Israel, Estónia
- OGM – Organismos Geneticamente Modificados, organismos manipulados geneticamente, de modo a favorecer características desejadas, como a cor, tamanho etc. Possuem alteração em trecho(s) do genoma realizadas através da tecnologia do RNA /DNA recombinante ou engenharia genética
- Óleo de fúsel: Mistura concentrada das impurezas do flegma
- OPEX – sigla derivada da expressão Operational Expenditure, que significa os recursos financeiros utilizados para manter ou melhorar os bens físicos de uma empresa, tais como equipamentos, propriedades e imóveis (os recursos para investimento são denominados CAPEX)
- OTEP – oferta total de energia primária (TPES: total primary energy supply)
- PAISS – Plano Conjunto BNDES-Finep de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucoenergético e Sucoquímico
- Pé de cuba - agente responsável pela fermentação, na forma de uma suspensão de células de leveduras. Indústria Alcooleira
- PIB – Produto Interno Bruto
- PIS/COFINS – na realidade são dois tributos, popularmente chamados PIS/COFINS: o primeiro é o PIS/PASEP - Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público; e o segundo é a COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

- Retificação - operação de purificação e concentração do flegma
- t - tonelada ou tonelada métrica, equivalente a  $10^3$  kg
- tc – tonelada de cana
- tCO<sub>2</sub>eq – tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente
- tcs – tonelada de cana, em base seca
- tep – tonelada equivalente de petróleo (unidade de energia, equivalente a  $10,0 \times 10^9$  cal;  $11,63 \times 10^3$  kWh; ou  $41,87 \times 10^9$  J)
- UE – União Europeia
- USEIA – US Energy Information Administration
- Vinhaça - resíduo aquoso da destilação, que contém todas as substâncias não voláteis do vinho e mais algumas voláteis
- Vinho - produto de fermentação do mosto ou mosto fermentado
- WTI –West Texas Intermediate, um tipo de petróleo do Texas que se tornou referência para o mercado de petróleo

## INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o maior produtor e o maior exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol combustível. Atualmente, no Brasil, a indústria do etanol combustível é fortemente vinculada ao mercado de açúcar, coproduto da produção do etanol na maioria das usinas brasileiras e aos preços da gasolina automotiva. Esse modelo de negócios inibe o estabelecimento de uma lógica independente de mercado para o etanol combustível, acarretando oscilações frequentes de oferta e, conseqüentemente, baixa atratividade para investimentos na expansão do setor.

Esta tese propõe uma reformulação desse modelo de negócios, com duas principais linhas de ação: a primeira, promovendo a modernização e a otimização energética de uma parcela das mais de 400 usinas em operação, que pode vir a incluir uma unidade de etanol celulósico em plantas existentes; e a segunda, estimulando a expansão da oferta por meio de unidades concebidas para a tecnologia do etanol celulósico (etanol 2G), o que significaria o estímulo ao uso de novas variedades de cana-de-açúcar no *upstream* e biorrefinarias para química verde no *downstream*.

É proposto um modelo baseado na cana-energia e na tecnologia do etanol celulósico, buscando o aproveitamento total da energia da cana no Brasil. São enfatizadas as alternativas de desenvolvimento científico, tecnológico e industrial e apontada a falta de interação entre os *stakeholders* de biocombustíveis, o que dificulta mudanças. O objetivo central do modelo proposto é reduzir as incertezas na oferta de etanol, introduzindo uma nova estratégia de negócios para a cana. Atualmente, essa oferta está sujeita à política de combustíveis, que pode ser parte de uma política anti-inflacionária, e às oscilações dos preços internacionais do petróleo e do açúcar.

O sucesso do modelo passa por responder questões como:

- ❖ o desenvolvimento do etanol celulósico e da cana-energia podem modificar o modelo agroindustrial sucroalcooleiro?
- ❖ o desenvolvimento do etanol celulósico reforça as capacitações científicas, tecnológicas e industriais do País?
- ❖ qual o papel das Políticas Públicas nessas capacitações? e

- ❖ a mudança do modelo industrial reforça a estabilidade de oferta de combustíveis renováveis, que contribuem para a melhoria da sustentabilidade global?

Para responder a estas questões, a tese está dividida como a seguir.

O Capítulo 1 inicia abordando as primeiras relações da raça humana com a questão energética, a evolução das técnicas e artefatos para melhoria de seu aproveitamento e a criação da máquina a vapor, símbolo máximo da Revolução Industrial. A seguir, é apresentada uma breve visão do uso das fontes de energia no mundo, destacando o papel do petróleo, que ainda é a mais importante fonte de energia primária, e foi determinante para a expansão e consolidação do modelo de consumo ocidental, a partir da produção em massa fordista, e do transporte individual. Os desdobramentos geopolíticos e ambientais do petróleo expuseram, também, a vulnerabilidade dos Países Centrais à oferta de energia e à poluição, estimulando o desenvolvimento de fontes alternativas e/ou renováveis. O Brasil se destaca nesse cenário pela sua matriz energética rica em fontes limpas, onde a cana-de-açúcar possui um papel relevante. A última parte deste Capítulo 1 trata da importância do etanol para o Brasil, seja pela dimensão do setor sucroalcooleiro na economia, seja pela redução das emissões de gases de efeito estufa, seja pelo papel estratégico na matriz energética e na balança comercial.

O Capítulo 2 é dedicado ao marco teórico, onde a visão estruturalista do pensamento cepalino é usada para demonstrar a necessidade e a importância da participação do Estado, através de Políticas Públicas, na implantação de um modelo industrial que reduza as incertezas na oferta de etanol e permita o máximo aproveitamento da energia disponível na cana. Assim, trata das questões teóricas referentes ao desenvolvimento econômico e social, à relevância da inovação e da tecnologia e à importância da participação do Estado, através de Políticas Públicas, para as novas tecnologias e a sustentabilidade. As oportunidades perdidas pela maioria dos países do Terceiro Mundo na década de 1970, confirmando os padrões da relação Centro-Periferia apontada por Prebisch, servem de alerta para que o novo ciclo de investimentos nos Países em Desenvolvimento, especialmente nos BRICS, possa trazer, além do crescimento da renda, retorno estrutural para a sociedade.

O Capítulo 3, na sua primeira parte, apresenta um panorama setorial

sucroalcooleiro, com um histórico do desenvolvimento da produção de etanol; descreve as principais atividades agroindustriais praticadas; e faz considerações sobre o potencial energético da cana e sobre os motivos de seu baixo aproveitamento. A segunda parte introduz a cana-energia e a tecnologia do etanol celulósico, apontando os principais aspectos do seu desenvolvimento, e mostra cenários onde são estimados os investimentos para produção do etanol 2G, maximizando o aproveitamento da energia da cana. Estes cenários consideram uma estratégia de produção voltada para a cana-energia e para o etanol 2G, resultando numa nova estratégia de negócios.

A partir destes dados, no Capítulo 4 é proposto o novo modelo, desenvolvido de forma que os investimentos no setor sejam direcionados para minimizar as incertezas da oferta de etanol e para maximizar o aproveitamento da energia da cana, que requer a participação efetiva do Estado, com Políticas Públicas que suportem o período de maturação da tecnologia do etanol celulósico.

# **CAPÍTULO 1 - PANORAMA**

## **1. PEQUENA HISTÓRIA DO DOMÍNIO DA ENERGIA: DA IDADE DO FOGO À REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**

---

A relação dos homens com a energia antecede, de fato, à descoberta do fogo. Uma vez que os seres vivos necessitam alimentos, todo processo de transformação do alimento em movimento, em trabalho, em caça, em pesca, os coloca na situação de conversores biológicos, transformando biomassa em energia.

Como Debeir, Deléage e Hémerly (1993) relatam em “Uma História da Energia”, as sociedades humanas e a biosfera se relacionam de uma forma muito mais complexa que uma simples dimensão socioeconômica. Nenhuma espécie, nem mesmo a espécie humana, pode escapar às leis da natureza. Os primeiros sistemas energéticos humanos, suas técnicas e linhas de apropriação da energia são inseparáveis das divisões e das relações de exploração que passaram a ocorrer num universo cada vez mais complexo da sociedade. Essa relação de diversas civilizações com a energia culminou na massificação do uso de combustíveis sólidos após a Revolução Industrial.

Até o final do século XIX, as atividades econômicas foram exercidas, com algumas exceções, num regime de sustentabilidade, permitindo a reprodução e regeneração dos ecossistemas. No entanto, a virada do século trouxe primeiramente a massificação do uso da máquina a vapor e do carvão mineral, seguida pela rápida difusão de um dos ícones da sociedade do século XX, os automóveis, com seus ineficientes motores a combustão interna, movidos a petróleo. Isso modificou radicalmente as relações entre as três esferas, a sociedade, a economia e o meio-ambiente. A história do uso da energia pela raça humana pode ajudar a compreender um pouco os desafios com que se depara a humanidade neste início de século, como resumido no texto a seguir, baseado no trabalho de Debeir, Deléage e Hémerly (1993).

### **1.1. DA PRÉ-HISTÓRIA AOS MUNDOS ANTIGOS: CONVERSORES BIOLÓGICOS**

---

Os primeiros sinais de uso do fogo datam de mais de 500 mil anos atrás. Associado a ele tem início a era energética da lenha, que por dezenas de milênios permaneceu como fonte de energia térmica insubstituível. No plano social, o fogo também responde pela ruptura sócio-psíquica dos grupos humanos, determinando o posicionamento hierárquico ao redor da fogueira, atribuições para manutenção da

chama e criando novas situações de ordem social a serem resolvidas, o que levou os humanos a um novo patamar psíquico.

O período paleolítico, extrativista, tem como principal fonte de energia mecânica o conversor biológico humano, no ciclo elementar: subsistência, consumo, energia humana, predação, subsistência etc. Esses sistemas "predadores-extrativistas" se caracterizavam pela alta produtividade energética e eram limitados pela sustentabilidade do ecossistema do território de predação, da ordem de algumas centenas de quilômetros quadrados para uma população de algumas dezenas de indivíduos.

A revolução neolítica trouxe um modo de exploração mais eficiente dos recursos naturais, com a agricultura e a pecuária. Traz, com isso, a noção de linha energética, decompondo a passagem de uma energia primária, fornecida pela natureza, a uma energia final diretamente utilizada pelo homem. Também controla diversos tipos de conversores biológicos (humanos e animais), e introduz o transporte e o armazenamento em larga escala, bem como a preparação culinária (para estoque e consumo).

Neste mesmo contexto surgem, intrinsecamente, conceitos como a produtividade energética (energia colhida em relação à energia investida) e a eficiência de conversão (energia restituída sob a forma de trabalho em função da energia consumida na forma de alimentos).

As primeiras civilizações surgem nos grandes vales de grandes rios da Ásia (Indus, Tigre, Eufrates, Nilo), por volta de 3.200 a.C., ordenando a utilização da natureza e a produção de bens. As técnicas para a cultura irrigada de cereais (a maioria dos vegetais necessita entre trezentos e mil litros de água para sintetizar um quilo de matéria seca) representarão o suporte para as grandes concentrações humanas e para o surgimento dos primeiros Estados.

Essas aglomerações de indivíduos, disciplinados e reunidos de forma coordenada, tornaram-se as primeiras máquinas motrizes de larga escala, as megamáquinas humanas dos faraós e de outros soberanos da época.

Paralelamente a isso, inicia-se o uso da tração animal e da navegação para o transporte dos produtos. A evolução dos meios de transporte deu-se com o uso da roda (que permitiu atrelar diversos animais num mesmo veículo, multiplicando a capacidade de carga) e com o controle dos ventos, a energia eólica (que veio auxiliar a mover as embarcações, em conjunto com os remadores).

Finalmente, o avanço do domínio dos romanos, unificando, durante os três últimos séculos da era passada, sob a mesma direção política e militar, vastos territórios, quase todos banhados pelo Mar Mediterrâneo. Esses territórios eram provedores de energia (sob a forma de escravos) e de alimentos (principalmente trigo), mas o domínio romano só teve tal longevidade por possuir três características fundamentais:

- ❖ aperfeiçoado sistema de comunicações e transporte (terrestre e marítimo);
- ❖ controle de grande efetivo de agricultores e de escravos;
- ❖ poderoso exército que garantia a perenidade deste vasto sistema de predação e vigiava as linhas de transporte de mercadorias e escravos.

Enquanto isso, naquele momento, em outra região do planeta, acontece o desenvolvimento da civilização chinesa, que se caracterizava pela ausência de relações de produção escravagistas.

## **1.2. O MODELO ENERGÉTICO CHINÊS**

---

O modelo energético chinês se caracterizava pela impressionante produtividade alimentar, que estava estruturada em três elementos:

1. utilização intensiva do solo, minimizando o intervalo entre plantios e focando em conversores cereais de alto rendimento calórico, reutilizando palhas, capim e rejeitos orgânicos como fonte adicional de combustível, além da lenha;
2. uso e difusão de conversores animais e de moinhos;
3. energia-trabalho humana, principal fonte de energia mecânica, associada ao trabalho agrícola, permitindo sua reprodução endógena em larga escala.

Com isso, a sociedade chinesa não teve necessidade de buscar a escravização de populações vizinhas para formação de estoques de energia humana. Estava sustentada por uma capacidade inovativa extraordinária, integrando continuamente ao sistema energético novas linhas térmicas e motrizes, especialmente as hidráulicas.

Comparativamente à Europa Ocidental, a China foi extremamente precoce no uso de variadas técnicas, ferramentas e artefatos mecânicos, tanto na agricultura, como no transporte. A **Tabela 1.1** apresenta, comparativamente à Europa, o século em que foram introduzidas diversas inovações na China, muitas das quais ainda são utilizadas pela sociedade contemporânea.

Destaca-se o arreo de peitoral para o cavalo, seguida pelo arreo de quarto dianteiro (conferindo aos animais de tração um papel essencial nos modos de transporte

chineses), os moinhos horizontais (ancestrais longínquos das turbinas hidráulicas), os avanços de navegação e de transmissão de movimentos mecânicos e, o mais relevante para o tema desta tese, a introdução dos combustíveis fósseis já no século IV (carvão mineral como fonte termorreduzora na produção de ferro-gusa), quase 1.500 anos antes da revolução industrial na Europa.

No início do século X, a indústria do ferro chinesa sofreu com a escassez de carvão vegetal, que passou a ser substituído pelo coque<sup>1</sup> de carvão mineral nos altos-fornos dos centros metalúrgicos chineses. Estima-se que, ao final do século X, a China produzia 125 mil toneladas de ferro-gusa por ano, sendo que a Europa produziria cerca de 150 mil toneladas, apenas 600 anos depois, no do século XVII.

**Tabela 1.1. Introdução das técnicas agrícolas e mecânicas na China e na Europa**

Inovação	Século de Introdução	
	CHINA	EUROPA OCIDENTAL
manivela e virabrequim	I	XIV
suspensão Cardim	I	XIII
carrinho de mão	III	XIII
correia de transmissão	XI	XIV
arreio de pescoço (garrote)	XVI a XI a.C.	VII
arreio de peitoral	XI a V a.C.	VIII
arreio de quarto dianteiro e estribo	V	X
martelo-pilão movido por pedal	I a.C.	XVI
moinho rotativo de braço	II a.C.	II
moinho movido por animais	II	I
moinho hidráulico horizontal para uso industrial	I	XIII
moinho hidráulico horizontal para grãos	V	?
moinho d'água vertical	XIV	XIII
moinho de vento	horizontal: XIV	vertical: XII
navios com compartimentos estanques	II	XVIII
navios com múltiplos mastros e velas de popa e de proa	II ou III	XV
leme de proa	I a IV	XII
carvão mineral para produção de ferro-gusa	IV	?
produção e uso de coque em alto-fornos	IX	XVIII

Fonte: Needham, (1965 e 1971)

A introdução do carvão mineral na metalurgia sinalizou o primeiro registro de migração industrial, já em busca de fontes energéticas mais abundantes e disponíveis. A partir de meados do século XI, a siderurgia chinesa deslocou-se para a proximidade das

<sup>1</sup> O processo de coqueificação já era dominado desde o século anterior, mas seu uso era restrito ao aquecimento doméstico e à cocção de alimentos.

minas de carvão, concentrada em grandes unidades e com centenas de operários.

No entanto, a produção carbonífera não suscitou na China, como viria a ocorrer nas sociedades industriais capitalistas da Europa, novas necessidades sociais, nem ampliou, de forma contínua, as fronteiras de seu próprio mercado. O notável crescimento econômico e a proto-industrialização<sup>2</sup> não se refletiram em divisão acelerada do trabalho, nem chegaram a ultrapassar os limites da produção artesanal e do conhecimento empírico, jamais se configurando em desafio técnico e científico. Assim, o papel do carvão no modelo energético chinês ficou restrito ao aquecimento, como fonte de calor para usos doméstico e industrial.

Este modelo<sup>3</sup> fez parte de um contexto maior, que fechou para a China os caminhos da imensa mutação cultural que trouxe para o Ocidente, nos séculos XVII e XVIII, a formação do pensamento científico, o retorno ao progresso técnico, a difusão do espírito empreendedor e a profunda mudança dos sistemas energéticos europeus.

### **1.3. O OCIDENTE MEDIEVAL**

---

Diferentemente do estável sistema chinês, o Ocidente medieval passou por uma série de mudanças importantes, rompendo radicalmente com o passado. A história energética da Idade Média é dividida por Robert Philippe (apud Debeir, Deléage e Hémery (1993) em três fases, cada uma delas associada a uma fonte de energia, conforme apresentado na **Tabela 1.2**. A primeira fase caracterizava-se pela disseminação e o aperfeiçoamento dos moinhos d'água, apropriando de forma massificada o uso dos rios e das bordas marítimas (um moinho substitui o trabalho de 10 a 20 homens), liberando a energia humana para outras atividades.

Um ponto interessante desta fase é que a construção da infraestrutura, p.ex., moinhos, represas e canais de adução, era “financiada” pelos senhores feudais, que depois se reembolsavam por meio da cobrança de taxas em função da produção (então, com uma produtividade muito maior). Nesta fase também tiveram início os conflitos sociais entre os camponeses mais pobres, os camponeses que enriqueceram dentro desse sistema e os senhores proprietários fundiários das terras, das florestas e da água.

---

<sup>2</sup> Proto-industrialização: atividade de fabricação rural, doméstica e sazonal, para mercados exteriores à região de produção, que precedeu, na Europa, a revolução industrial.

<sup>3</sup> Este velho modelo, instalado entre os séculos VIII e XII, permanece assegurando, nos dias atuais, a base elementar de centenas de milhões de obstinados camponeses. No entanto, os sistemas energéticos de cereais, baseados na cultura irrigada intensiva e na energia humana, esgotaram suas possibilidades de expansão. Este será o desafio energético a ser enfrentado pela China neste início de século XXI.

Entretanto, estes “senhores” não detinham a ‘propriedade’ dos ventos.

**Tabela 1.2. Introdução das técnicas agrícolas e mecânicas na China e na Europa**

<b>Fase / Característica</b>	<b>Período (século)</b>	<b>Recurso Natural</b>	<b>Forma de Energia</b>
1. apropriação das linhas energéticas	XI e XII	água	hidráulica
2. liberação das linhas energéticas	XIII	vento	eólica
3. penúria e o alto custo das fontes de energia	XIV e XV	lenha	térmica

Fonte: Robert Philippe apud Debeir, Deléage et Hémerly, 1993

Os moinhos de vento, de custo muito inferior ao dos moinhos d’água, começaram a surgir ao final do século XII no norte da França, no litoral da Mancha, caracterizando o início da segunda fase. Além de não estarem submetidos aos proprietários de terra, os conversores eólicos ajudavam a resolver a saturação dos aproveitamentos hidráulicos, que inclusive prejudicavam a navegação fluvial (fase 2).

Finalmente, no século XIV se intensifica o uso de lenha nas forjarias e nos altos-fornos. Isso levou a fortes desmatamentos nas áreas próximas aos complexos proto-industriais, a ponto de assistirmos às primeiras medidas de proteção ambiental, tomadas pelo rei Felipe VI, em 1346, que decidiu não conceder nenhum novo direito de uso de florestas.

Assim, o transporte passou a reger a capacitação industrial dessa época, na Europa medieval, estabelecendo a terceira fase da história energética da Idade Média. O domínio das rotas de navegação e dos deslocamentos terrestres eram atividades estratégicas para os povos. Não foi por menos que os primeiros grandes homens de negócio deste período construíram suas fortunas nos portos, surgindo as primeiras associações comerciais no modelo capitalista desenvolveram-se em Veneza (*collegenza*) e em Gênova (*societas maris*). Foi também nesse período que o domínio das linhas energéticas foi transferido para a Igreja, os “novos senhores da energia”, que, durante séculos, limitou o desenvolvimento dos meios de produção.

## 1.5. A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

---

Na Europa, o capitalismo representou a ruptura de todos os sistemas energéticos que a humanidade conhecia. Com ele, as energias biológicas, sustentadas pela natureza, cederam lugar aos combustíveis fósseis, que passaram a ser a principal fonte de energia, como ocorrido na China, no século X.

No século XVIII, Adam Smith constatava que *“o carvão mineral é um combustível bem mais desagradável que a lenha ou o carvão vegetal, e nenhum povo o adotou senão no caso em que a lenha faltava ou tinha um preço demasiado alto”*.

As florestas, então, até o final da Idade Média, desempenharam o papel (que mais tarde seria das minas de carvão e dos poços de petróleo) de um estoque de energia ‘inesgotável’, que poderia ser desperdiçado sem preocupação. O crescimento populacional e a evolução do modelo capitalista para atender essa nova massa de “consumidores” energéticos modificou esse cenário.

As restrições impostas pela escassez de energia, de terras e de recursos naturais precisaram ser superadas, e a saída buscada seguiu em três direções:

1. intensificar a evolução das técnicas e máquinas medievais, bem como desenvolver novos conversores, como a máquina a vapor.
2. criação de novas linhas energéticas, reformando a relação do homem com a energia: até então as máquinas faziam uso das forças da natureza (vento, água, sol etc.) que permaneciam intactas quando a máquina parava de operar. A máquina a vapor consome as matérias das quais tira sua energia.
3. explorar recursos disponíveis em outras regiões e nas sociedades periféricas.

A competitividade da economia inglesa do século XVIII era função da diferença de custo entre a lenha e o carvão mineral, uma das fontes essenciais da acumulação capitalista inglesa. Isto resultaria na sua longa supremacia manufatureira e mercantil, baseada num fluxo crescente de combustíveis fósseis e produtos agrícolas importados. A questão energética foi subestimada pelos historiadores e John U. Nef foi um dos poucos a perceber as premissas energéticas da revolução industrial.

A nova dimensão fabril na indústria têxtil, que até então era restrita a *“pequenas oficinas, com uma dúzia de trabalhadores e uma ou duas máquinas acionadas pela energia dos conversores biológicos humanos”*, deveu-se ao aperfeiçoamento dos conversores hidráulicos, como destaca David S. Landes, em *Prometeus Desacorrentado (1969)*.

Desde o início do século XVII, as máquinas a vapor já vinham sendo usadas, mas com rendimentos inferiores a 1 %. Só no período de 1765 a 1784, James Watt desenvolve e aperfeiçoa o motor, de forma a lhe conferir, maior rendimento térmico e novas possibilidades de utilização.

Com isso, o tripé “carvão mineral – máquina a vapor – indústria textil” tornou-se a base da revolução industrial e do sistema capitalista. No início do século XX, a difusão automóvel e do transporte individual baseado no petróleo, consolidaram o modelo, que vigora até os dias atuais.

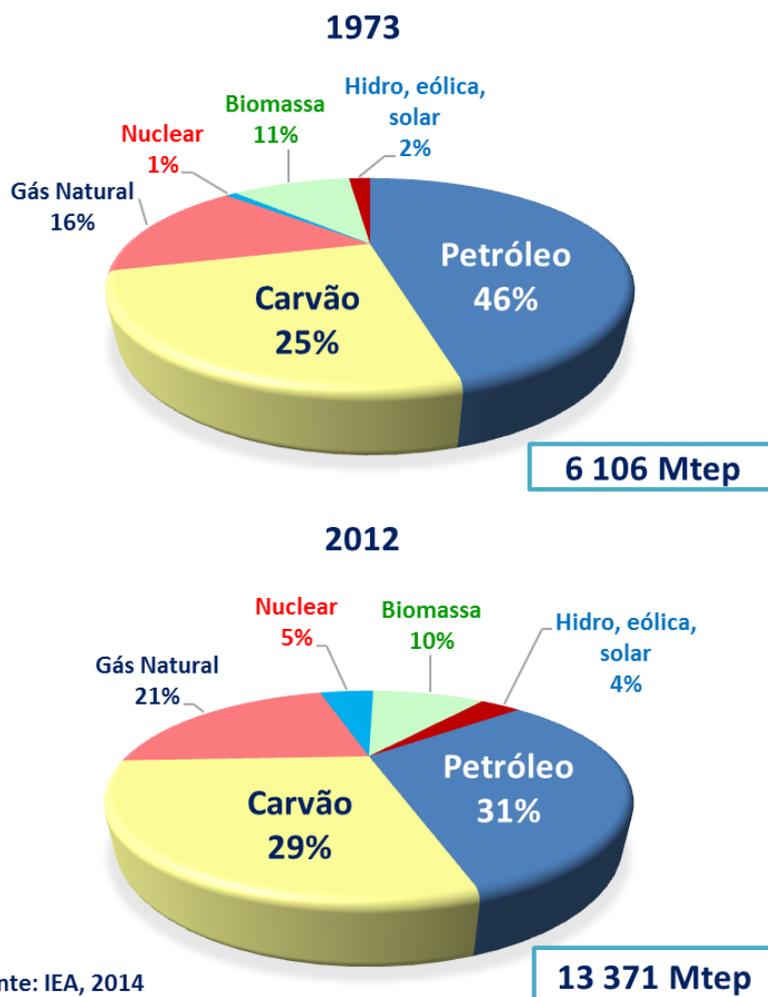
A sustentação deste padrão de consumo, mais uma vez exigiu uma nova expansão e exploração territorial, na busca por novos provedores energéticos, como ocorrido com a Escola de Sagres em Portugal, as expedições às Américas e o caminho marítimo para as Índias, no século XV. Assim, teve início uma divisão entre os países ricos em recursos naturais, mas pobre em técnicas e capacidade de organização e potenciais fornecedores de insumos energéticos e de alimentos, e os países que se encontravam no "olho" da revolução industrial.

## **2. BREVE PANORAMA MUNDIAL DA ENERGIA**

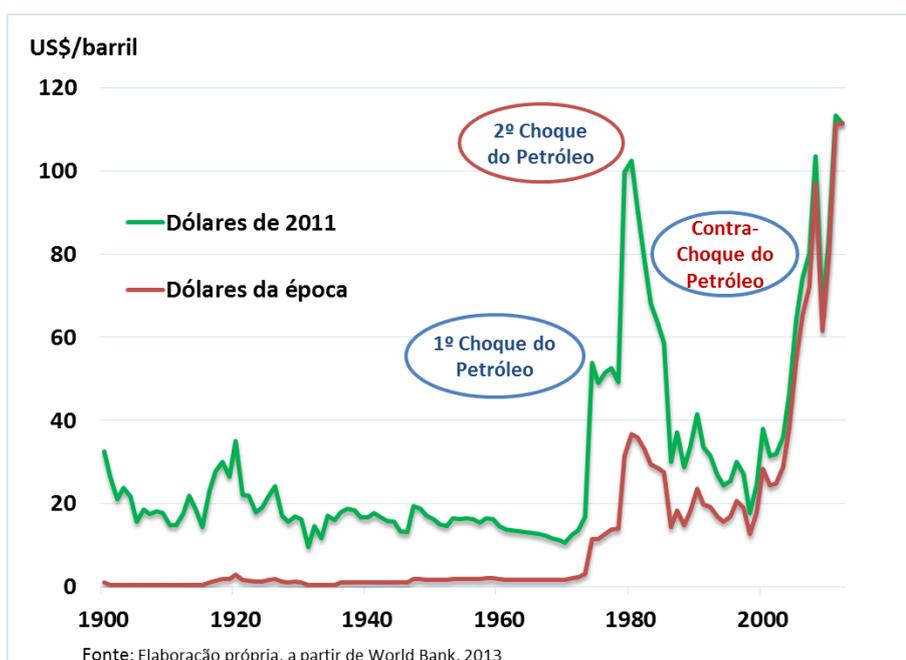
---

Desde o Primeiro Choque do Petróleo, em 1973, as sucessivas demonstrações de fragilidade geopolítica foram gradativamente modificando o perfil de utilização do petróleo como fonte de energia primária. O carvão, o gás natural e a energia nuclear ganharam espaço na matriz energética mundial (**Figura 1.1**) especialmente após o Segundo Choque, em 1979.

Apesar de os preços da energia terem permanecido baixos após o Contrachoque do Petróleo na década de 1980 (**Figura 1.2**), isso não representou um retorno ao padrão de consumo de energia, baseado em petróleo, dos países da OCDE. A visão estratégica, em busca da segurança energética, prevaleceu. A viabilidade das reservas *offshore* no Mar do Norte trouxe novas perspectivas para os europeus, em geral, e para ingleses e noruegueses em particular, e o avanço da tecnologia de exploração em águas profundas, no Golfo do México e na Plataforma Continental brasileira, reduziu a dependência do continente americano ao petróleo externo. Os gasodutos siberianos e noruegueses, bem como as centrais nucleares francesas e japonesas reformularam as matrizes energéticas da OCDE.



**Figura 1.1. Oferta de energia primária**



**Figura 1.2. Evolução dos preços do petróleo**

Este cenário se manteve ao longo da década de 1990 e, mesmo não abrindo as portas do céu, fechou as portas do inferno com relação à dependência do petróleo dos países desenvolvidos. No entanto, os debates e deliberações sobre questões ambientais já evidentes, como as Mudanças Climáticas, o Aquecimento Global e o Efeito Estufa, foram deixados em segundo plano ou postergados, como no caso do protocolo de Kyoto, de 1997, reflexo da Conferência do Rio-92.

No início do século XXI, dois eventos mutuamente estimulados vieram a catapultar os preços da energia: a invasão americana do Iraque e a instituição do capitalismo de Estado na China. A ressurreição de dois setores que vinham desempenhando papéis secundários na economia americana, a indústria bélica e a indústria petrolífera, para fazer a guerra em defesa do petróleo iraquiano, gerou sucessivos e gigantescos déficits gêmeos nos EUA (conta corrente e fiscal) que foram prontamente financiados pelo crescimento chinês e pela renda do petróleo saudita.

A prosperidade mundial deste período negligenciou as repercussões ambientais em prol do crescimento financeiro, que teve como epicentro a Ásia. Além das necessidades de infraestrutura de uma economia emergente, fortemente demandante de energia, as mais significativas indústrias do ocidente se instalaram na Ásia, que cresceu com base numa pauta de exportações repleta de bens e insumos intermediários, de alto conteúdo energético e curto ciclo de vida, e que, por sua vez, trouxeram excelentes resultados financeiros às matrizes dessas corporações na OCDE.

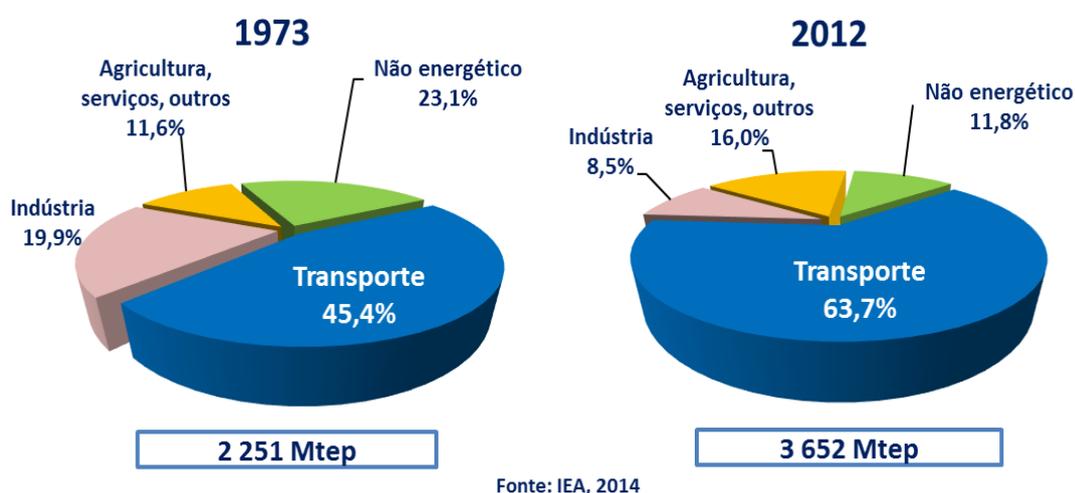
A competitividade dos países asiáticos está baseada em princípios muito particulares de relações trabalhistas, legislações ambientais, paridade cambial, eficiência, direito à propriedade intelectual e aos direitos civis, mas efetivamente trouxe resultados.

Como a principal fonte de energia primária da Ásia é o carvão mineral, com 60 % do total da produção mundial, os países daquele continente dobraram sua participação na oferta, desde a virada do século, refletindo o fato de o carvão ser a principal fonte de energia primária, tanto na China, quanto na Índia, os dois principais países que vêm puxando o crescimento da economia mundial nos últimos anos.

Assim, nas últimas quatro décadas pode-se observar dois comportamentos marcantes: nos primeiros 20 anos, uma determinação generalizada dos países da OCDE em reduzir a dependência do petróleo, concentrando sua aplicação aos transportes; e,

nos últimos 20 anos, o crescimento vertiginoso do uso do carvão mineral e das emissões de GEE a ele associadas nos países emergentes.

No primeiro caso, de dependência do petróleo, os transportes passaram a significar, em 2012, mais de 60 % da sua matriz de consumo no mundo (contra 45 % em 1973), conforme apresentado na **Figura 1.3**, pois sua aplicação como fonte de calor e eletricidade para a indústria, a agricultura e os serviços foi sendo progressivamente reduzida (IEA, 2014). Aparentemente, a estratégia dos países da OCDE para reduzir suas inseguranças energéticas, foi ampliar e maximizar o uso de gás natural, de carvão e de centrais nucleares e direcionar o suprimento de petróleo para o setor de transporte de carga e passageiros, onde as alternativas para sua substituição são mais restritas.

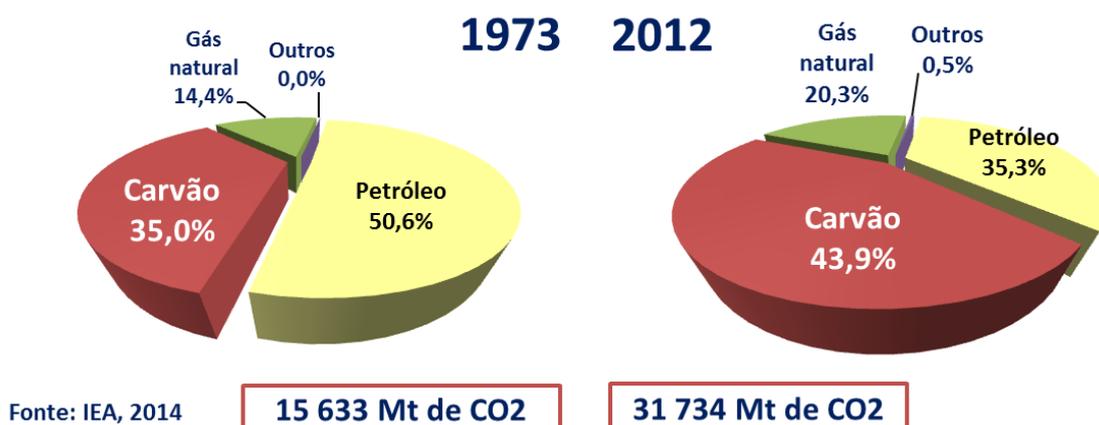


**Figura 1.3. Divisão do consumo mundial de petróleo por setor**

No que se refere às emissões mundiais de GEE, como mostram dados da IEA (2014), ilustrados na **Figura 1.4**, desde o Choque de 1973, a proporção decorrente do uso de petróleo caiu da metade para um terço, enquanto a do uso de carvão cresceu de 35 % para 44 %. Vale ressaltar que, nesse período, o volume anual das emissões dobrou, atingindo 32.000 GtCO<sub>2</sub>e, em 2012, apesar de todas as Conferências e Protocolos sobre as mudanças climáticas e a sustentabilidade apontarem os riscos dos GEE.

Das cerca de 10 GtCO<sub>2</sub>e emitidas pelo petróleo, 6 GtCO<sub>2</sub>e são originárias do setor de transportes (IEA, 2014). Uma das principais alternativas para redução das

emissões dos motores ciclo Otto e ciclo Diesel são os biocombustíveis<sup>4</sup> (etanol para a gasolina e biodiesel para o diesel). O CO<sub>2</sub> é dominante entre as emissões de GEE e a frota de automóvel contribui com 20 % da emissão de CO<sub>2</sub> do mundo. A frota mundial de mais um bilhão de veículos leves e que consome metade dos derivados de petróleo aumenta 20 % por ano, na China, e 3,5 %, no Brasil.



**Figura 1.4. Divisão das emissões de CO<sub>2</sub>eq na combustão, por fonte**

O etanol, por si só, não é suficiente para mitigar significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> a nível mundial. pois seria necessária uma mudança mais profunda, em termos de tecnologia de transporte, fontes de energia e padrão de consumo (Pinguelli Rosa, 2013).

Os biocombustíveis para os automóveis particulares não devem impedir a busca pela eficiência nos transportes públicos e de carga. As políticas de combate às mudanças climáticas devem ser dedicadas a encontrar soluções realistas para o desenvolvimento sustentável com justiça social. A eliminação da pobreza significa usar mais energia per capita nos países em desenvolvimento, sendo necessário, ao mesmo tempo, alterar a utilização intensiva de energia e o padrão de consumo supérfluo e efêmero. Não é possível mitigar radicalmente o aquecimento global sem qualquer alteração no padrão habitual de consumo de energia (Pinguelli Rosa, 2013).

Entre 2000 e 2011, as emissões mundiais de CO<sub>2</sub> cresceram 35 %, segundo dados da Agência de Informações de Energia do Departamento de Energia dos EUA

<sup>4</sup> Quando referenciados à fonte primária de energia, os veículos elétricos são movidos, em última instância, por carvão, gás natural e energia termonuclear, uma vez que essas são as principais fontes para geração de eletricidade.

(EIA/DOE, 2013). Neste período, as emissões dos cinco principais países emergentes, os BRICS', cresceram 103 %, enquanto as emissões mundiais excluindo os BRICS cresceram apenas 10 % (Tabela 1.3).

**Tabela 1.3. Emissões de CO2 pelo consumo de energia (Mt métricas de CO2eq.)**

	2000	2006	2011	2011/ 2000	2011/ 2006	2011/ 2000 a.a.	2011/ 2006 a.a.
<b>Brasil</b>	<b>344</b>	<b>384</b>	<b>475</b>	<b>38%</b>	<b>24%</b>	<b>3,2%</b>	<b>4,0%</b>
<b>Russia</b>	<b>1.499</b>	<b>1.636</b>	<b>1.788</b>	<b>19%</b>	<b>9%</b>	<b>1,6%</b>	<b>1,6%</b>
<b>Índia</b>	<b>991</b>	<b>1.281</b>	<b>1.726</b>	<b>74%</b>	<b>35%</b>	<b>6,2%</b>	<b>5,8%</b>
<b>China</b>	<b>3.272</b>	<b>5.936</b>	<b>8.715</b>	<b>166%</b>	<b>47%</b>	<b>13,9%</b>	<b>7,8%</b>
<b>África do Sul</b>	<b>386</b>	<b>444</b>	<b>462</b>	<b>20%</b>	<b>4%</b>	<b>1,6%</b>	<b>0,6%</b>
<b>BRICS</b>	<b>6.492</b>	<b>9.681</b>	<b>13.166</b>	<b>103%</b>	<b>36%</b>	<b>8,6%</b>	<b>6,0%</b>
<b>Mundo - BRICS</b>	<b>17.658</b>	<b>19.349</b>	<b>19.412</b>	<b>10%</b>	<b>0%</b>	<b>0,8%</b>	<b>0,1%</b>
<b>BRICS - In - Ch</b>	<b>2.229</b>	<b>2.464</b>	<b>2.725</b>	<b>22%</b>	<b>11%</b>	<b>1,9%</b>	<b>1,8%</b>
<b>Mundo - In - Ch</b>	<b>19.887</b>	<b>21.813</b>	<b>22.138</b>	<b>11%</b>	<b>1%</b>	<b>0,9%</b>	<b>0,2%</b>
<b>In + Ch</b>	<b>4.263</b>	<b>7.217</b>	<b>10.441</b>	<b>145%</b>	<b>45%</b>	<b>12,1%</b>	<b>7,4%</b>
<b>Mundo</b>	<b>24.150</b>	<b>29.029</b>	<b>32.579</b>	<b>35%</b>	<b>12%</b>	<b>2,9%</b>	<b>2,0%</b>

Fonte: Elaboração própria com base em Energy Information Administration - EIA, 2013

Índia e China reunidas saltaram de 4 GtCO2eq, no ano 2000, para 10 GtCO2eq, em 2011 (145 % de aumento), num ritmo agregado de 12 % a.a., enquanto as emissões mundiais sem esses dois países cresceram à taxa de 0,8 % a.a. no período.

Essa taxa foi reduzida, no período 2006 a 2011, para 7,4 % a.a., para Índia e China, mas as emissões globais se mantiveram praticamente constantes, caso seja excluído o total da soma destes dois países.

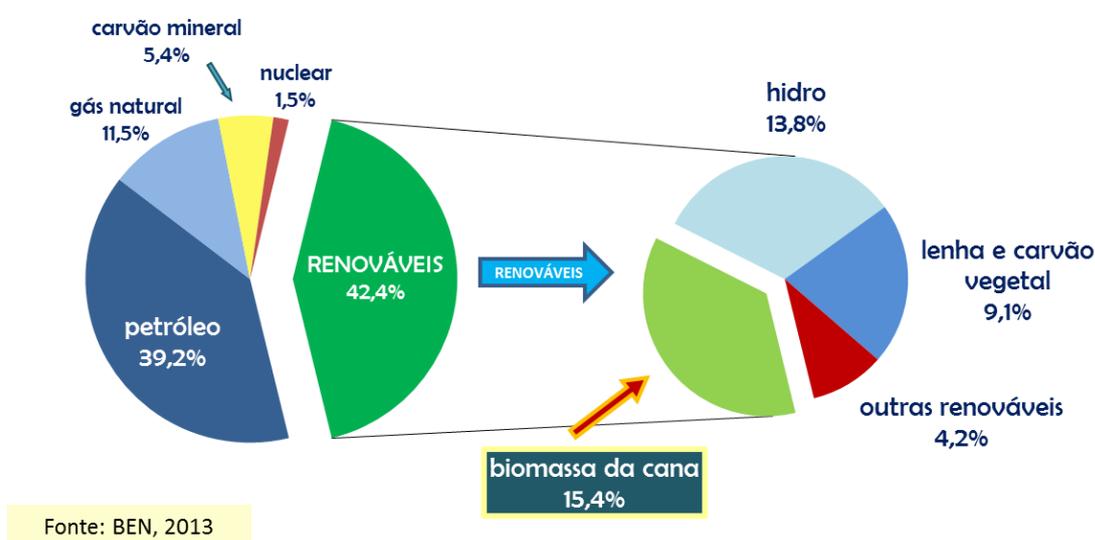
No contexto de uso da biomassa, as tecnologias de segunda geração, objetos das linhas de ação propostas nesta tese, podem aumentar a oferta e trazer expressivos ganhos de produtividade para os biocombustíveis, sem necessidade de ampliar a área cultivada e, com isso, contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

### **3. A QUESTÃO ENERGÉTICA NO BRASIL**

Sob o ponto de vista da sustentabilidade, o Brasil possui uma matriz energética invejável, graças à participação significativa de fontes renováveis, que proporcionam mais de 40% da oferta de energia primária (BEN, 2013). Conta, ainda, com duas

características únicas no planeta, uma na geração e outra no consumo de energia. Pelo lado da geração, cerca de 80 % da energia elétrica tem origem hidráulica e 7 % é proveniente da biomassa. Pelo lado do consumo, cerca de 12 % dos combustíveis usados pelo setor de transportes vem do etanol da cana.

O setor sucroenergético tem papel-chave nesse quadro: a cana-de-açúcar, matéria-prima para a produção de etanol e de bioeletricidade, é a segunda maior fonte de energia do país, respondendo por 15,4 % de toda a energia produzida em 2012. A **Figura 1.5** mostra a distribuição da oferta por fonte na matriz energética brasileira.



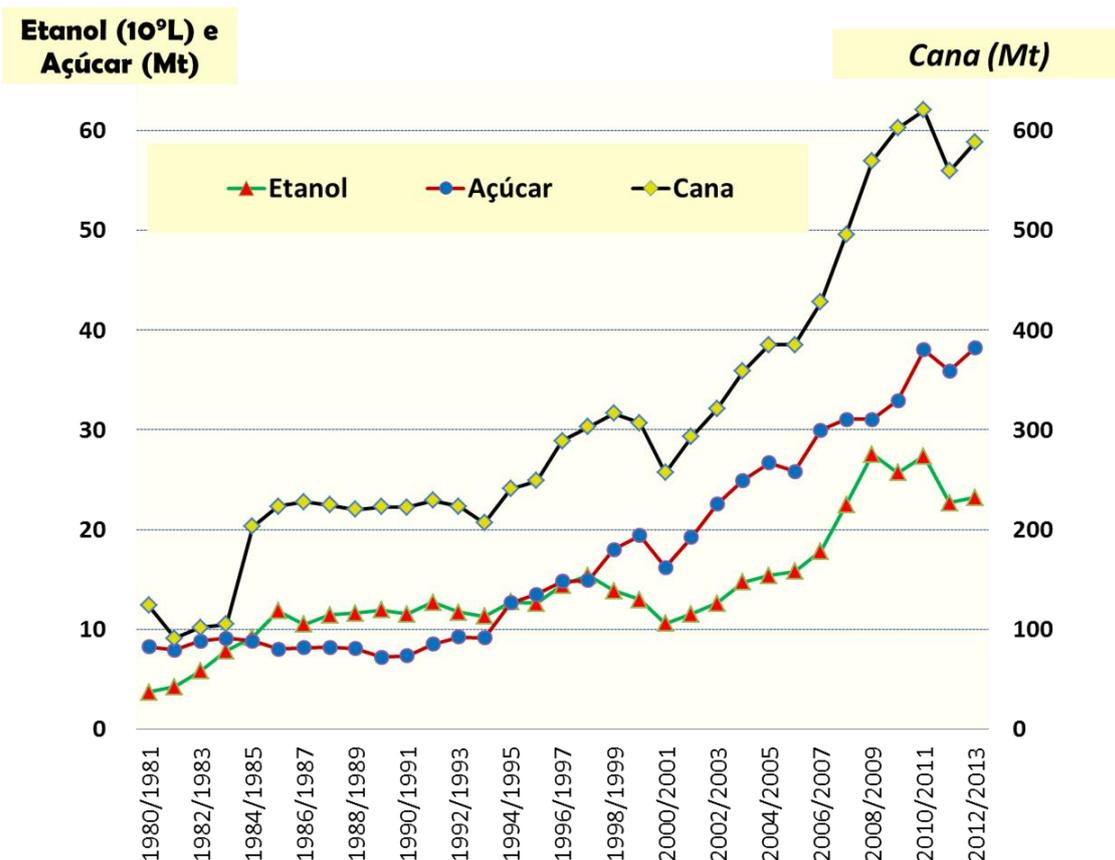
**Figura 1.5. Distribuição da oferta de energia – 2012**

Na safra 2012/2013, o Brasil produziu 588 Mtc e respondeu por 25 % da produção mundial e por 50 % das exportações de açúcar. É o 2º produtor mundial de etanol, sendo responsável por 20 % da produção mundial e 20 % das exportações.

A Figura 1.6 apresenta a evolução da produção do setor (Conab, 2014). Muito desse quadro é devido ao Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975, que é considerado o mais importante e mais bem-sucedido programa de combustíveis renováveis com viabilidade comercial já implantado no mundo, e à competitividade do açúcar brasileiro no mercado internacional, que pode ser atribuída principalmente a dois fatores: alta produtividade da cultura da cana e autossuficiência energética no seu processamento industrial.

Observando a **Figura 1.6** e a **Figura 1.7**, constata-se que o açúcar possui uma

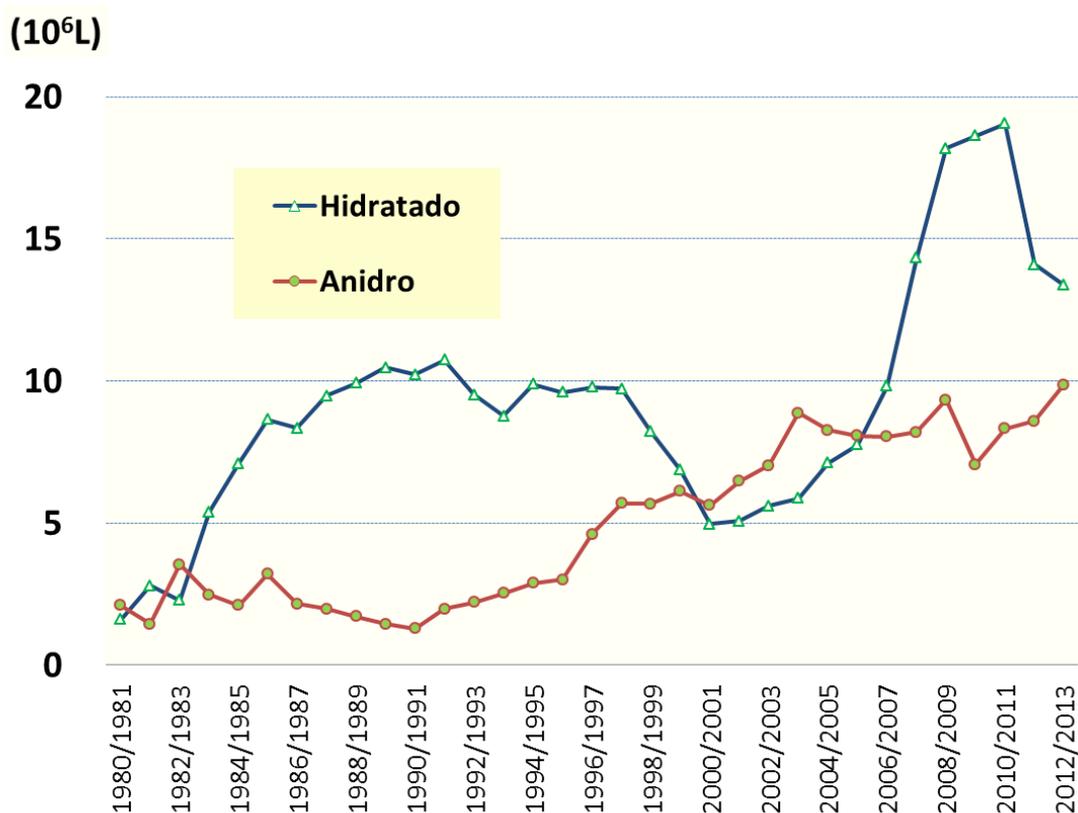
curva de crescimento regular, enquanto o consumo de etanol hidratado passou por um período de queda acentuada na segunda metade da década de 1990, que foi amenizada pelo aumento da participação do etanol anidro adicionado à gasolina (de 20 % para 25 %). A partir de 2011 o quadro voltou a ser repetir e o crescimento da produção de açúcar e um novo aumento na adição de etanol anidro (de 25 % para 27,5 %), tentaram amenizar a queda de demanda do setor.



Fonte: Conab, 2014

**Figura 1.6. Evolução da produção de cana, açúcar e etanol no Brasil**

A questão que se apresenta com relação ao etanol é que, apesar de o Brasil ter condições fortemente favoráveis, o aproveitamento da energia da cana ainda é feito de forma precária, uma vez considerado o potencial disponível. A biomassa da cana, principalmente o bagaço, é utilizada para suprir as necessidades de vapor e energia elétrica para as produções de açúcar e de etanol, disponibilizando uma parcela excedente de eletricidade para a rede de distribuição. No entanto o aproveitamento da energia contida no bagaço é feito de forma ineficiente, por motivos a serem abordados no **Capítulo 3**, e a palha praticamente não é recolhida.



Fonte: Conab, 2014

**Figura 1.7. Evolução da produção de etanol no Brasil**

Como apresentado na **Tabela 1.4**, segundo dados consolidados pelo Balanço Energético Nacional (BEN, 2013), a energia da cana está dividida entre:

- o caldo (e o melaço), matéria-prima para o açúcar e o álcool;
- o bagaço, combustível do processo; e
- a palha, deixada no campo.

A safra de 2012/2013 produziu quase 600 Mtc, conforme dados da Conab (2014), gerando mais de 200 Mt de caldo e melaço e mais de 160 Mt de bagaço. O volume de palha (220 Mt) foi calculado por diferença (cana = caldo + melaço + bagaço + palha) e está próximo do volume estimado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), que foi de 194 Mt nesta safra.

**Tabela 1.4. Balanço da produção de cana, açúcar e etanol e seu equivalente energético**

PRODUÇÃO 2012 (1.000 t)		%	Balanço das destilarias		Balanço de Bagaço	
Cana	588.916	100,0%	Safrá 2012/2013		Safrá 2012/2013	
Caldo de Cana	185.331	31,5%	Caldo	11.491	Bagaço	34.749
Melaço	20.150	3,4%	Melaço	3.728	TOTAL (1.000 tep)	34.749
Bagaço de Cana	163.142	27,7%	TOTAL (1.000 tep)	15.218	Cogeração	5.266
<i>Palha (por diferença)</i>	<i>220.293</i>	<i>37,4%</i>	Etanol Anidro	6.411	Setor Energetico	12.243
<b>PRODUÇÃO 2012 (m3)</b>			Etanol Hidratado	7.958	Alimentos e Bebidas	17.215
Álcool Anidro	12.005		TOTAL (1.000 tep)	14.368	TOTAL (1.000 tep)	34.724
Álcool hidratado	15.603					

Fonte: Elaboração própria a partir de BEN 2013 e Conab 2014

POTENCIAL DA PALHA (1.000 tep) só 50% recolhido 20.666

A partir dos coeficientes de equivalência da **Tabela 1.5**, chega-se a 90 Mtep de energia contida na cana da safra 2012/2013, sendo 15 Mtep no caldo para produção de etanol, 35 Mtep no bagaço para sustentar energeticamente a produção de açúcar e etanol (e ainda gerar um excedente na forma de energia elétrica vendida para a rede) e 40 Mtep na palha que praticamente não são aproveitados.

**Tabela 1.5. Coeficientes de equivalência energética da cana e do etanol**

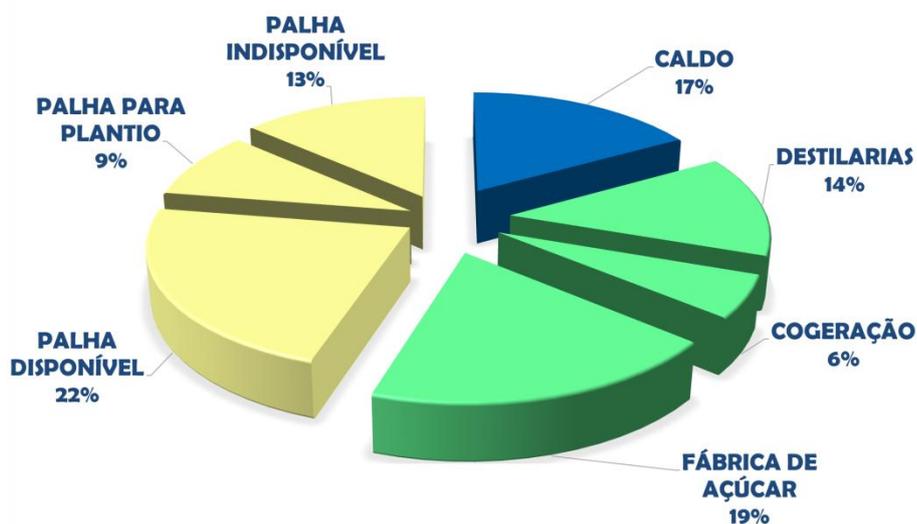
	Coeficientes de Equivalência		
	(Gcal/t)	(tep/t)	(MWh/t)
Caldo	0,62	0,062	0,72
Melaço	1,85	0,185	2,15
Bagaço	2,13	0,213	2,48
Palha	2,13	0,213	2,48
	(Gcal/m3)	(tep/m3)	(MWh/m3)
Etanol Anidro	5,34	0,534	6,21
Etanol Hidratado	5,01	0,510	5,93

Fonte: Elaboração própria, a partir do BEN, 2013

Como apenas 50 % da palha gerada podem estar imediatamente disponíveis (20 % precisam ser mantidos no campo, para proteger e adubar a próxima safra, e as impurezas que se encontram misturadas aos 30 % restantes tiram a atratividade econômica de seu uso, até o momento), o potencial energético da cana não utilizado é da ordem de 20 Mtep.

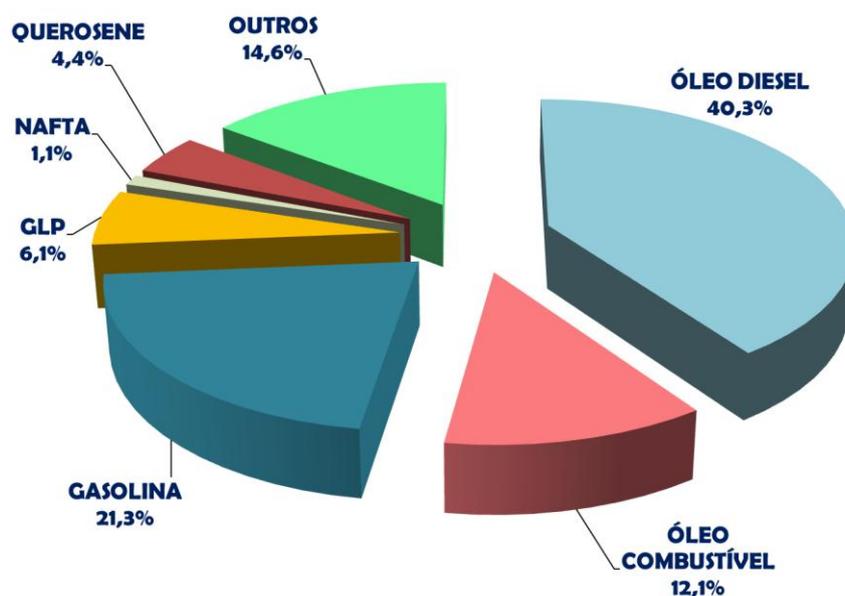
A quantidade de caldo destinada à fabricação de açúcar não está contabilizada como "energia disponível", pois é um insumo para o setor de alimentos. Historicamente, o caldo produzido nas usinas é dividido entre a fabricação de açúcar e a destilaria de etanol. Caso toda cana fosse dirigida para produzir combustíveis, a energia contida no caldo seria da ordem de 35 % do total. A energia da cana é considerada como sendo 1/3 de cada um dos seus principais componentes: caldo, bagaço e palha. No entanto, a energia necessária para a produção do açúcar é proveniente da queima do bagaço e representa mais de 17 Mtep.

A magnitude destes números se torna mais evidente quando comparada ao petróleo consumido no Brasil. A energia da cana é de mesma ordem de grandeza da energia de todo o petróleo consumido no Brasil (90 Mtep contra 105 Mtep, em 2012). A diferença existe no aproveitamento dessa energia, pois do petróleo, tudo se aproveita, enquanto da cana se desperdiça quase 50 % da sua capacidade calorífica (**Figuras 1.8 e 1.9**). A otimização dessa fonte de energia primária pode, no "estado-da-arte" da tecnologia do etanol convencional, acrescentar um volume de energia equivalente, por exemplo, à energia contida em toda a gasolina produzida no Brasil em 2012, superior a 20 Mtep, proveniente do uso de 50 % da palha deixada no campo durante a colheita mecanizada.



Fonte: elaboração própria a partir de BEN 2013 (ano base 2012)

**Figura 1.8. Distribuição da energia da cana (total de 90 Mtep em 2012)**



Fonte: elaboração própria a partir de BEN 2013 (ano base 2012)

**Figura 1.9. Distribuição da energia do petróleo (total de 102 Mtep em 2012)**

Esta tese apresenta alternativas para o aproveitamento integral da energia da cana, seja através:

- da melhoria da eficiência nos processos industriais;
- da maximização da cogeração;
- de métodos de plantio e colheita que viabilizem economicamente o recolhimento da palha;
- do emprego de novas variedades de cana, como a cana-energia; e
- da tecnologia do etanol de segunda geração, o etanol celulósico.

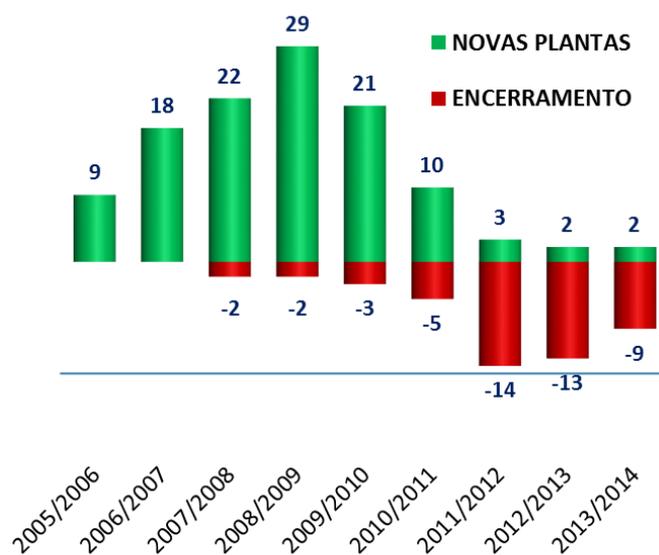
#### **4. POLÍTICA DE COMBUSTÍVEIS, POLÍTICA AMBIENTAL E POLÍTICA INFLACIONÁRIA: PETRÓLEO E ETANOL NO BRASIL**

O etanol tem se mostrado uma alternativa viável à gasolina e também um instrumento de redução de emissões dos motores ciclo Otto. Para os brasileiros<sup>5</sup>, o etanol faz parte de um setor da economia que se mantém na liderança mundial em

<sup>5</sup> Como também mostram os resultados das iniciativas americanas (DOE, 2013)

função de sua competitividade e da sua capacitação tecnológica e empresarial, conquistada e mantida pela integração entre as instituições públicas e a iniciativa privada.

Atraídos exatamente por essa competitividade da cana, pela pegada de carbono do etanol brasileiro e pelos preços crescentes da energia e do petróleo, entre 2006 e 2011 foram inauguradas 109 novas usinas por investidores privados (**Figura 1.10**). Porém, nos últimos anos (2012-2014), o "congelamento" dos preços da gasolina, promovido pelo governo como medida anti-inflacionária e de estímulo à economia através do consumo, determinou a estagnação dos investimentos e o fechamento de várias usinas.



Fonte: FARINA, 2014

**Figura 1.10. Abertura e encerramento de biorrefinarias**

Em 2002, foi criada a Cide (Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico), que tributava o preço da gasolina em 14 %, na bomba. Apesar da demanda de combustíveis aquecida, o governo reduziu a Cide para 7 %, em 2008, e para zero, em 2012, de maneira a preservar o preço da gasolina ao consumidor e com isso não pressionar a inflação (Rodrigues, 2012).

Ou seja, o governo abriu mão de receita tributária para não deixar de aumentar a remuneração da Petrobras que operava a partir de preços crescentes do petróleo e da

gasolina (**Tabela 1.6**), num mercado em expansão. Segundo dados da ANP (2015), o preço médio mais alto pago na importação de petróleo e gasolina ocorreu exatamente no período entre 2011 e 2013, com o preço do etanol em queda (Cepea, 2015), e quando foram fechadas mais de três dezenas de biorrefinarias de etanol.

**Tabela 1.6. Preço médio do etanol hidratado e das importações de petróleo e gasolina**

Ano		2002	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gasolina	US\$/litro	0,183	-	0,564	0,752	0,794	0,745	0,727	0,425
Petróleo	US\$/litro	0,154	0,402	0,516	0,733	0,741	0,710	0,694	0,425
Etanol Hidratado	US\$/litro	0,225	0,632	0,659	0,640	0,554	0,541	0,477	0,386

Fonte: ANP, 2015 e CEPEA, 2015

Do outro lado da mesa, os custos de produção da tonelada de cana-de-açúcar cresceram 70 % entre as safras 2006/2007 e 2011/2012, segundo Farina (2014b). Nesse período, o rendimento por hectare caiu para 5.600 litros na safra 2011/2012, na região Centro-Sul, contra uma média histórica de 6.900 litros. Mas, ainda que o setor tivesse operado com uma produtividade<sup>6</sup> próxima a um potencial de 7.200 L/ha, o aumento nominal nos custos ainda alcançaria 64 %.

Na base desse aumento de custos estão os investimentos na mecanização da lavoura, em atendimento à agenda ambiental e às maiores exigências trabalhistas, e os prejuízos obtidos com o congelamento dos preços da gasolina.

A mão-de-obra representa cerca de 25 % dos custos na colheita manual e cerca de 12 % na colheita mecanizada (**Figura 1.11**), o que ajuda a explicar a rapidez com que a lavoura foi mecanizada no Centro-Sul do país, apesar do custo de capital, mas com financiamento incentivado pelo governo (ICONE, 2010).

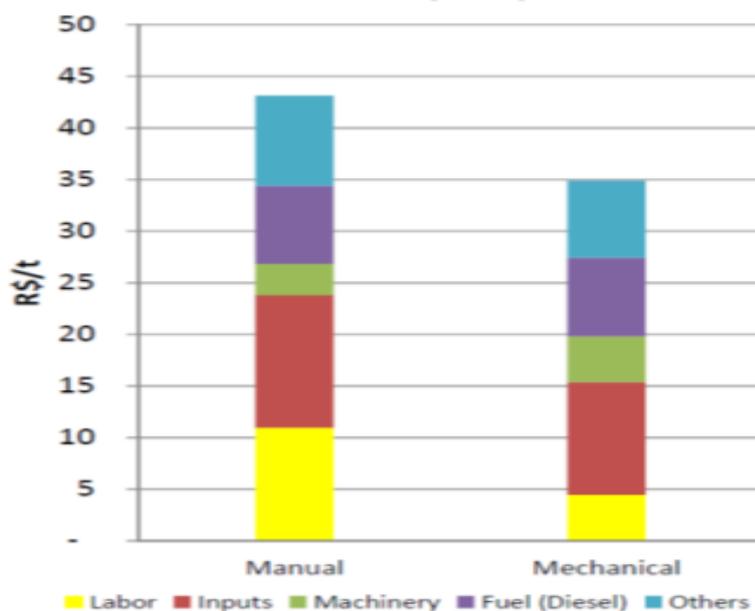
Quanto à política de preços, ela se deu por meio da desoneração da Cide cobrada sobre a gasolina, sem contrapartida ao etanol. Entre 2007 e 2012, essa desoneração foi de R\$ 0,28 por litro, o que garantiu preços estáveis<sup>7</sup> ao consumidor (neutralizando a elevação no valor do derivado cobrado na refinaria), ao mesmo tempo

<sup>6</sup> O ganho de produtividade necessário para que o custo de produção do etanol aumentasse em iguais 9 % - e, assim, continuasse competitivo frente à gasolina - seria da ordem de 8,5 % a.a. Nem mesmo a lavoura de grãos, uma das atividades agrícolas mais competitivas do Brasil, apresentou tal desempenho - na última década, o aumento de sua produtividade foi de 4 % a.a. (Farina, 2014).

<sup>7</sup> O preço pago pelo consumidor brasileiro aumentou apenas 9 % em termos nominais.

em que transferiu R\$ 14 bilhões dos cofres públicos à Petrobras.

Essa lógica perversa eliminou a diferenciação tributária entre o etanol e a gasolina; incorporou incertezas desnecessárias nesse mercado; e alterou completamente o cenário promissor do etanol, vislumbrado pelos empresários até então.



Fonte: CTBE e ICONE, 2010

**Figura 1.11. Custos operacionais na etapa agrícola 2010 - São Paulo**

Segundo Farina (2014b), é inconcebível atribuir à uma suposta falta de produtividade e incapacidade gerencial a crise do setor sucroalcooleiro nesse período. Em 2009, o etanol hidratado representava 37 % do volume total de combustível para motores ciclo Otto consumido no país. Em 2014, essa proporção ficou próxima de 15%.

Além de lidar com a necessidade de melhoria da própria competitividade, os produtores de etanol ainda observaram nesse período: incentivos crescentes do governo ao consumo de combustíveis fósseis, como no caso da redução da Cide; nas importações onerosas de gasolina realizadas pela Petrobras; e "congelamento" dos preços dos combustíveis.

O montante renunciado pela Petrobras, em função do diferencial entre o valor de mercado e o valor repassado ao consumidor, é estimado pelo CBIE (2014) em mais de R\$ 80 bilhões no período de 2004 a 2014. Isso foi responsável pela redução da capacidade de investimento da empresa, bem como pelos resultados insatisfatórios que

resultaram em desvalorização de seu capital e dificuldades para financiar seus planos de expansão.

Segundo Almeida (2014), algumas consequências dessa política de preços dos combustíveis seriam:

- ❖ subsídio indireto do governo ao transporte individual privado, em detrimento do transporte público;
- ❖ prejuízos na área de distribuição da Petrobras, o que significa menor geração de caixa e, assim, necessidade de aumentar o endividamento para continuar com o plano de investimentos, inclusive para o pré-sal; e
- ❖ utilização crescente dos bancos públicos, como mostra a **Tabela 1.7**, pois, até 2006, a Petrobras tinha a maior parte de seu endividamento com os bancos privados, mas, desde então, o questionamento sobre essa "intervenção" nos preços, que iria prejudicar o desempenho da empresa, os levou a restringir as condições de financiamento.

**Tabela 1.7. Endividamento da Petrobras junto a bancos públicos (em R\$ bilhões)**

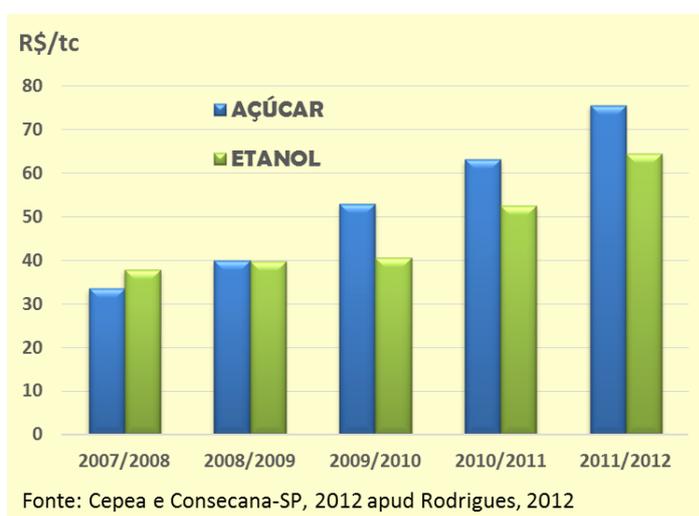
	<b>BNDES</b>	<b>BB</b>	<b>CEF</b>	<b>TOTAL</b>
2006	7,2	-9,7	0,0	-2,5
2007	6,7	-2,2	0,0	4,5
2008	10,7	4,3	3,6	18,6
2009	35,0	5,8	3,9	44,7
2010	36,4	8,2	5,6	50,2
2011	40,9	8,9	3,0	52,8
2012	47,9	7,0	8,2	63,1
2013	40,3	11,0	11,3	62,6

Fonte: Petrobras, 2013, apud Almeida, 2014

Os dois principais referenciais de preços para o setor sucroalcooleiro são o preço da gasolina, pois esta é que irá definir o teto de preço do etanol, e a cotação do açúcar, pois o Brasil é o maior exportador e o maior produtor mundial. Como o valor de venda do etanol hidratado na bomba de combustível precisa ser menor do que 70 % do preço da gasolina, em função das capacidades caloríficas de cada um, os preços depreciados da gasolina limitaram qualquer estímulo ao aumento da oferta de etanol nas usinas existentes ou ao investimento para aumento da capacidade de produção.

Como apresentado anteriormente, em três anos, entre 2012 e 2014, foram inauguradas apenas sete novas usinas, enquanto nos 3 anos anteriores esse número foi de 50 novas biorrefinarias, além de outras 49, no período de 2006 a 2008, demonstrando a capacidade de mobilização do setor para investir.

Além da questão da gasolina e do petróleo, a oferta de etanol também sofre a concorrência *indoor* do açúcar, pois um grande número de usinas produz ambos, contando com uma capacidade instalada que lhes permite ofertar um *mix* de 25 % de açúcar e 75 % de etanol até 75 % de açúcar e 25 % de etanol. Como pode ser observado na **Figura 1.12**, a receita média do açúcar vem superando em mais de 20 % a do etanol, desde 2010.

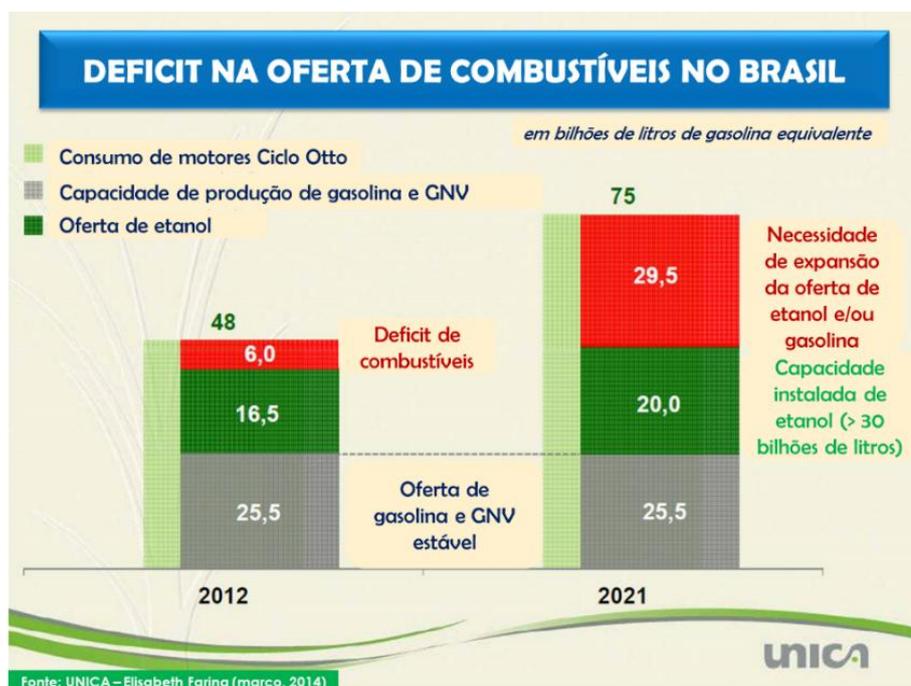


**Figura 1.12. Receita média das usinas por tonelada de cana**

Isso permite ao setor uma rentabilidade aceitável ao usineiro, pois passa a produzir mais açúcar, mas não suficientemente interessante para novos investimentos, principalmente em etanol. O Brasil é o maior produtor e o maior exportador mundial de açúcar e o etanol é uma atividade onde a competitividade brasileira está plenamente consolidada, tanto na agricultura, quanto na indústria ou na logística.

Ressalta-se que esse cenário exigiu a importação de 6 bilhões de litros de gasolina, segundo a UNICA (2014), pois o consumo de combustíveis para motores ciclo Otto, em 2012, foi de 48 bilhões de litros, para uma produção de 25,5 bilhões de litros de gasolina e 16,5 bilhões de litros de etanol<sup>8</sup> (**Figura 1.13**).

<sup>8</sup> Volume de etanol em equivalente de gasolina



**Figura 1.13. Déficit na oferta de combustível no Brasil**

Como apresentado anteriormente, esse volume de importação de gasolina causou prejuízos à Petrobras, pois o seu custo foi maior do que o repassado aos consumidores, enquanto a política inflacionária manteve as usinas ou ociosas ou direcionadas para o açúcar.

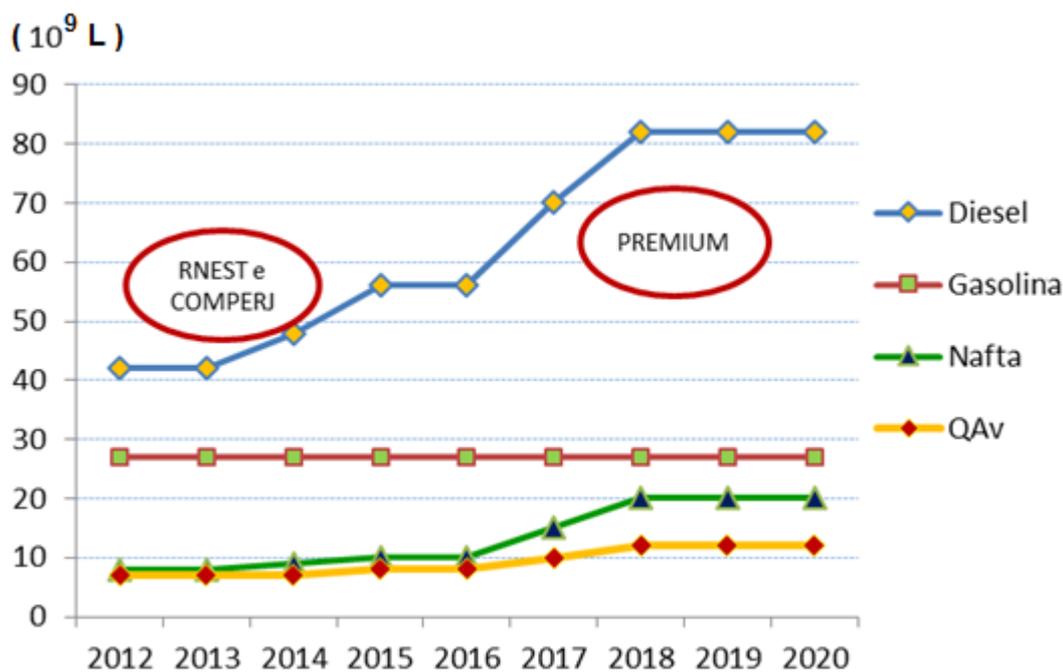
Independentemente dos prejuízos financeiros, outro aspecto extremamente importante é a projeção da capacidade instalada de refino da Petrobras, que está totalmente voltada para o diesel<sup>9</sup> (Figura 1.14). Ou seja, a demanda de combustíveis para motores ciclo Otto está prevista em 75 bilhões de litros para 2021, mas a projeção da capacidade de refino de gasolina permanece em 25 bilhões de litros. Isso significa que existem 50 bilhões de litros de demanda a serem atendidos com 20 bilhões de etanol e 30 bilhões de importações, o que certamente vai criar um gargalo logístico.

Em que pese a importância da cadeia do petróleo<sup>10</sup> para a economia do Brasil, é importante verificar qual seria o resultado desse mesmo volume de investimentos se feitos na indústria do etanol. O investimento necessário para uma usina de etanol moderna, com capacidade para moer 4 Mtc/ano, é estimado (Bonomi, 2012; Milanez,

<sup>9</sup> Todas as novas refinarias são dedicadas ao diesel, sendo que as refinarias Premium I e II tiveram seus projetos adiados 'sine die'.

<sup>10</sup> De 2014 a 2018, a Petrobras vai investir US\$ 102 bilhões no Pré-sal, para produzir 1 Mbpd (a produção foi de 2 Mbpd em 2014).

2012) em US\$ 330 milhões<sup>11</sup>. Assim, para produzir o equivalente a toda gasolina consumida no Brasil, em 2013, seriam necessárias 144 usinas desse porte, com um investimento total de R\$ 47,6 bilhões. No último ciclo de expansão do setor, entre 2007 e 2011, foram inauguradas 100 usinas, o que demonstra a possibilidade material desse tipo de proposta ser implementada.



Fonte: ANP e Petrobrás, 2014

**Figura 1.14. Projeção da oferta de derivados de petróleo no Brasil**

Caso seja considerado o fator logístico, a substituição de toda a gasolina consumida no Estado de São Paulo<sup>12</sup>, iria requerer 11 bilhões de litros de etanol para substituir 8 bilhões de litros de gasolina A, evitando a emissão<sup>13</sup> de 26 MtCO<sub>2</sub>eq. Em termos de distribuição, isso poderia ser expandido para outros estados vizinhos sem maior dificuldade. Esse volume de etanol necessitaria de uma área de 1,7 Mha, 15 % adicionais à área hoje usada para plantio cana (açúcar mais etanol) e poderia ocupar áreas degradadas ou de pasto. O gado, maior responsável pela abertura de "fronteiras" agropecuárias na Amazônia Legal, possui hoje 200 Mha de pasto, mas vem ganhando produtividade, reduzindo a área necessária por cabeça (hoje, é da ordem de 1 hectare

<sup>11</sup> Cada usina produziria 340.000 L/ano, que, em unidades de energia, são equivalentes a 173.000 tep/ano de etanol. A relação cambial usada foi de 2,30 R\$/US\$.

<sup>12</sup> Em 2013, cerca de 10,5 bilhões de litros de gasolina C (com 25 % de etanol anidro), equivalentes a 8 bilhões de litros de gasolina A (sem etanol anidro).

<sup>13</sup> Emissões - GEE gasolina: 3,65 kg/L de CO<sub>2</sub>eq; GEE diesel: 4,01 kg/L de CO<sub>2</sub>eq.

por cabeça de gado). Assim, a disponibilidade de terras pode ser ampliada, sem o deslocamento de outras culturas.

O mercado do etanol é virtualmente ilimitado, tanto no Brasil como no mundo, considerando que se trata do único combustível alternativo à gasolina para uma frota de mais de 500 milhões de automóveis em circulação com motores ciclo Otto.

Segundo a IEA (2014), em 2012, os consumos mundiais foram de 1,1 trilhões de litros de gasolina e de 85 bilhões de litros de etanol, este correspondendo a cerca de 7,2 % do total de combustíveis. A introdução de mais 10 % de etanol nessa matriz de consumo, 100 bilhões de litros, significaria mais do que dobrar a atual oferta mundial ou algo como seis vezes a produção brasileira.

Entretanto, em termos de gases de efeito estufa, apenas o etanol da cana poderia apresentar uma significativa redução de emissões. Com base nas médias dos principais parâmetros agrícolas e industriais de 44 usinas na região Centro-Sul do Brasil, Macedo (2008) estimou que, para cada unidade de energia fóssil consumida no processamento total do etanol de cana, foram geradas 9,3 unidades de energia renovável.

Como apresentado na **Tabela 1.8**, as emissões evitadas pelo etanol de cana, em relação à gasolina, são da ordem de 90 % , sendo que o etanol celulósico (lignocelulose) apresenta números equivalentes ao da cana convencional. No entanto, as demais matérias-primas são bem menos eficientes na captura de carbono (Nogueira Horta, 2008).

Hoje, os 24 bilhões de litros de etanol consumidos no Brasil, substituem 16,8 bilhões de litros de gasolina, que emitiriam 61 MtCO<sub>2</sub>eq, evitando, portanto, a emissão de 55 MtCO<sub>2</sub>eq. Isso representa 13,5 % das 408 Mt de CO<sub>2</sub>eq emitidas<sup>14</sup> pelo Brasil na combustão, ou, ainda, 1 % das emissões de gás efeito estufa referentes ao petróleo usado pelo setor de transportes no mundo, em 2012.

Além da abordagem sobre os aspectos ambientais, os biocombustíveis são objeto de intenso debate sobre o deslocamento de culturas de alimentos para que a terra seja usada na produção de insumos para a bioenergia. Isso seria mais um componente para promover pressão sobre os preços dos alimentos, em função da demanda por

---

<sup>14</sup> Somente emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de combustão. As emissões são calculadas usando os balanços energéticos do IEA e os Guidelines revistas do IPCC (1966) . Se incluirmos as emissões referentes ao uso da terra, das florestas e da agricultura, esse valor seria 3 vezes maior, superando 1,2 GtCO<sub>2</sub>eq.

combustíveis, principalmente no caso do etanol de milho norte-americano, bem como sobre o bioma amazônico, no caso da cana brasileira, como apresentado a seguir.

**Tabela 1.8. Emissões evitadas em relação à gasolina**

<b>MATÉRIA-PRIMA</b>	<b>RELAÇÃO DE ENERGIA*</b>	<b>EMISSIONES EVITADAS EM RELAÇÃO À GASOLINA (%)</b>
CANA	9,3	89
MILHO	0,6 a 2,0	(30) a 38
TRIGO	0,97 a 1,11	19 a 47
BETERRABA	1,2 a 1,8	35 a 56
MANDIOCA	1,6 a 1,7	63
LIGNOCELULOSE**	8,3 a 8,4	66 a 73

Fonte: Nogueira, 2008

\* a relação de energia representa a quantidade de energia renovável produzida em toda cadeia produtiva do biocombustível, dividida pela quantidade de energia fóssil requerida na sua produção

\*\* estimativa teórica, processo em desenvolvimento

## **5. ALIMENTOS X BIOCOMBUSTÍVEIS**

Existe um consenso no fato de que os biocombustíveis possuem um papel importante nos preços dos alimentos. Mesmo que seja vinculado a determinadas matérias-primas, como milho, soja ou trigo, ainda assim, em países com oferta abundante de outros insumos bioenergéticos, como a cana, isso poderia ser um estímulo à produção de alimentos, por exemplo na entressafra.

O impacto fora das fronteiras dos maiores produtores de grãos e biocombustíveis também deve ser observado, seja pela redução das exportações de alimentos, seja pelo crescimento das importações de alimentos, cujos insumos estão sendo desviados para os biocombustíveis. Isso pode levar ao aumento nos preços internacionais dos alimentos com impactos negativos para os países importadores, principalmente para os mais pobres, mais necessitados, menos estruturados.

O fato de que o mundo já teve picos de preços de *commodities* agrícolas nos últimos anos tem aumentado a importância de saber até que ponto os biocombustíveis (e as políticas de biocombustíveis) contribuem para isso.

Os biocombustíveis são o único substituto, em larga escala, de combustíveis

líquidos para o transporte, por isso, quando os preços do petróleo aumentam, cresce também a demanda por biocombustíveis. Além disso, as variações de preços das *commodities* agrícolas são causados também pela demanda por alimentos e pelos eventos climáticos.

Essa questão possui dois pontos principais, que serão abordados a seguir: se a pressão causada no preço dos alimentos, a nível mundial, é causada pelo etanol de milho; e se a expansão da área de cana plantada impacta o bioma amazônico no Brasil.

## **5.1. TERRA, ÁGUA E TECNOLOGIA**

---

A partir das discussões do Painel de Especialista da FAO para Segurança Alimentar e Nutrição, (HLPE - *High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition*), de 2013, se conclui que a bioenergia compete por terra e água com a produção de alimentos e a experiência mostra que raramente isso pode ser completamente evitado. A terra utilizada em outras culturas frequentemente não recebe o mesmo investimento em tecnologia e produtividade que os insumos energéticos e, portanto, não se consegue reduzir a área de terra necessária para produzir a mesma quantidade de alimentos.

Os impactos positivos são na geração de empregos, na subsistência em áreas rurais e, com as políticas adequadas, nas pequenas propriedades. Um terço da população mundial (4,4 bilhões de pessoas) depende da bioenergia. Para essas comunidades, o desenvolvimento de usos mais eficientes e limpos pode trazer um amplo impacto. As políticas de biocombustíveis tiveram sucesso no desenvolvimento de biocombustíveis, mas agora deve ser voltada para a segurança alimentar, o que significa levar em conta outras dimensões (FAO, 2013).

O Painel teve como principais conclusões:

- as políticas para desenvolvimento da indústria e do mercado de biocombustíveis foram bem-sucedidas, com mais de 60 países contando com políticas públicas;
- devido ao (até então) crescente preço dos combustíveis fósseis e aos próprios ganhos de produtividade, alguns biocombustíveis já são competitivos, mesmo sem suporte público;
- o desenvolvimento do setor deverá ser puxado mais pelo mercado, do que empurrado pelas políticas, o que significa que as políticas vão mudar;
- os biocombustíveis possuem efeitos globais e locais, positivos e negativos, de curto e

longo prazos, e muitos desses efeitos tomam a forma de competição com alimentos, por terra e água;

- existem ligações entre os biocombustíveis e a segurança alimentar e, assim sendo, as políticas devem voltar suas maiores preocupações para a segurança alimentar; e
- o principal foco deve ser orientar o desenvolvimento dos biocombustíveis minimizando seus impactos negativos e fortalecendo seus potenciais impactos positivos.

➔ Assim, segundo a FAO, é renovada a importância de uma coordenação internacional de políticas, estabelecendo trocas de informações atualizadas sobre projetos e políticas locais, de forma que seja possível estabelecer limites nos impactos de preços.

## 5.2. PREÇOS DAS COMMODITIES AGRÍCOLAS NOS EUA

Os dois maiores produtores mundiais de etanol, EUA e Brasil, também são dois dos maiores produtores de alimentos do mundo. Em 2012, colheram 160 Mt de soja, das 280 Mt da safra mundial; e 380 Mt de milho, das 850 Mt da safra mundial (**Tabela 1.9**). Em função disso, as oscilações de preços das *commodities* agrícolas são atribuídas aos biocombustíveis, especialmente ao etanol norte-americano, que, de 2004 a 2013, passou de uma produção de 10 bilhões de litros de etanol para 50 bilhões de litros de etanol e de 256 Mt de milho para 351 Mt de milho. No entanto, como mostra a **Figura 1.15**, apenas 26 % do milho são destinados à produção de etanol, enquanto 47 % são destinados à alimentação (USDA, 2013), e assim o crescimento da produção de etanol, também estimulou o crescimento da oferta de alimentos.

**Tabela 1.9. Milho, soja, trigo e cana: EUA e Brasil**

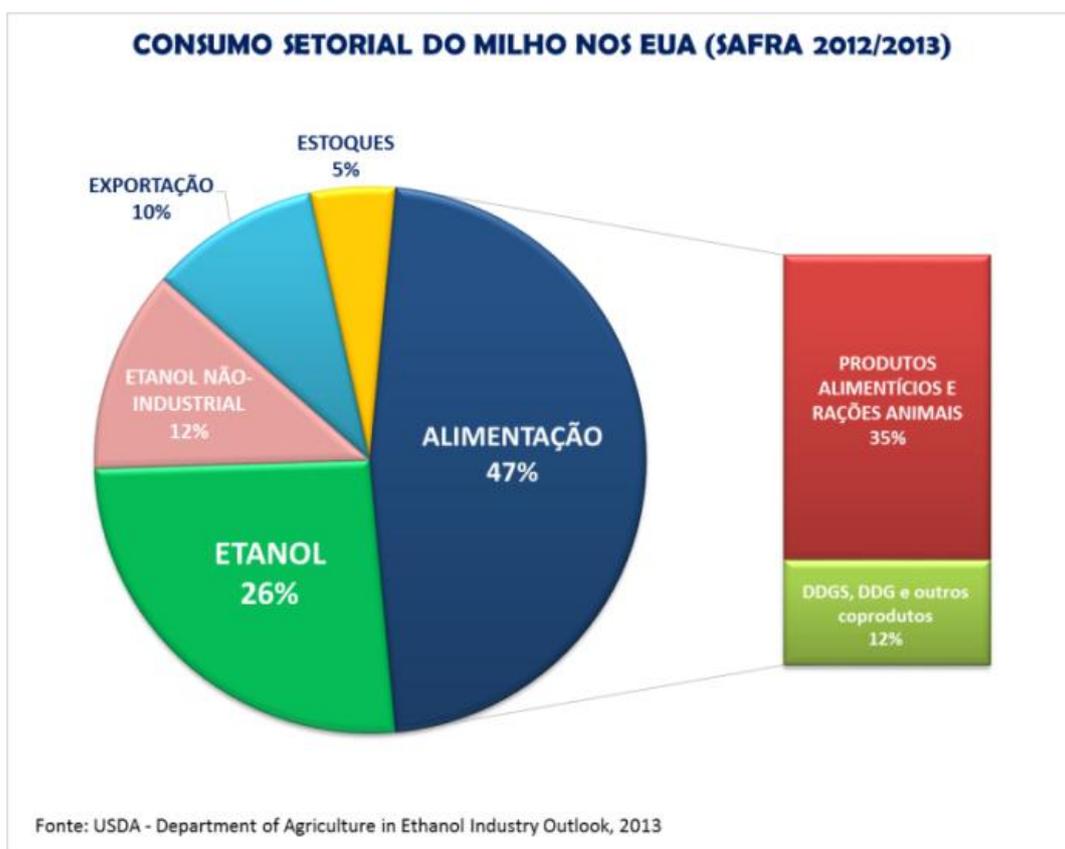
		SAFRA 2012			SAFRA 2012/2013			
		EUA			BRASIL			
		MILHO	SOJA	TRIGO	MILHO	SOJA	TRIGO	CANA
<b>Área Plantada</b>	(10 <sup>3</sup> ha)	35.359	30.798	14.097	15.822	27.736	1.895	8.485
<b>Produtividade</b>	(t/ha)	8,3	2,7	3,2	5,1	2,9	2,3	69,3
<b>Produção</b>	(10 <sup>3</sup> t)	293.391	82.055	44.775	81.007	81.499	4.380	588.016

Fonte: United States Department of Agriculture - National Agricultural Statistics Service (jan 2013) e Conab (julho, 2013)

Babcock (2011) estimou o comportamento dos preços das *commodities* agrícolas nas safras de 2005 a 2009 nos EUA, através de "*backcasting*" (previsão invertida, onde a partir de um cenário futuro constrói-se um cenário presente), caso os subsídios não existissem durante este período e caso a produção de etanol permanecesse

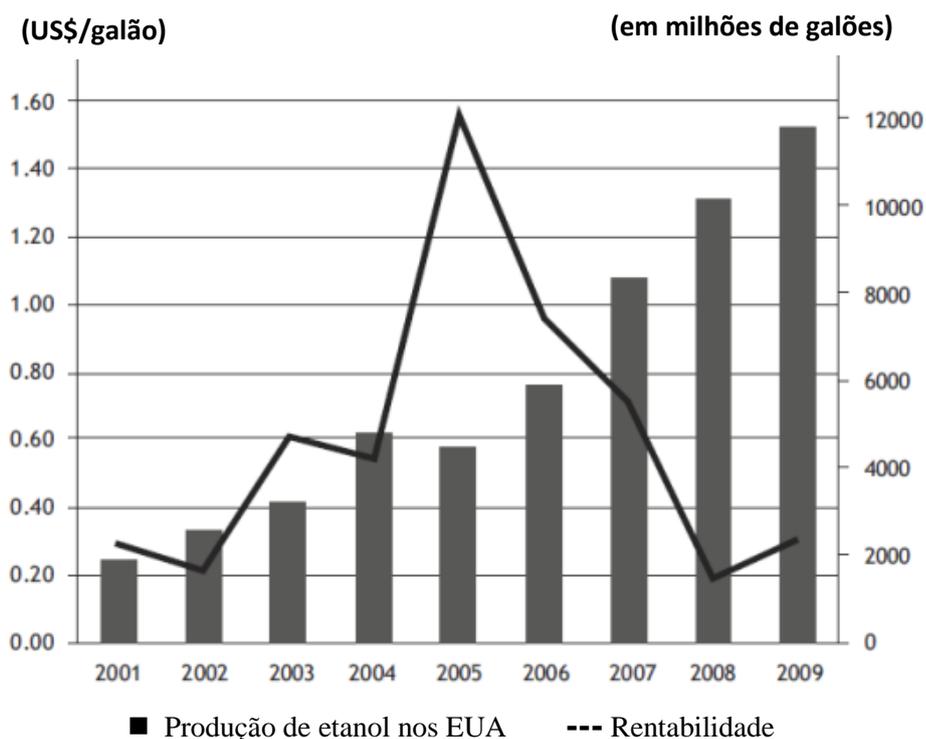
no nível de 2004. Suas principais conclusões foram:

- os impactos dos subsídios foram bastante modestos sobre o preço do milho, no período, e ainda menores sobre os preços do trigo, arroz e soja; e
- mesmo que o mercado de etanol não tivesse se expandido, as *commodities* não se manteriam em baixa durante este período. Os preços do milho, em 2009, teriam sido 40 % maiores do que eram em 2004, os do trigo, 45 % maiores, e os da soja, 57 % maiores.



**Figura 1.15. Consumo de milho EUA: safra (2012/2013)**

Ainda segundo Babcock (2011), o maior estímulo para os investimentos no etanol de milho americano foram os preços do petróleo mais elevados, que aumentaram a demanda por biocombustíveis. Portanto, mesmo sem subsídios, isso teria resultado em uma grande expansão da indústria de etanol nos EUA. A rentabilidade do etanol americano, de 2004 a 2007, foi um estímulo à expansão acelerada do parque agroindustrial. Em 2007 e 2008 foram acrescentados mais 26 bilhões de litros de capacidade instalada de produção de etanol aos 24 bilhões existentes.



Fonte: Babcock (2011)

**Figura 1.16. Produção de etanol e rentabilidade nos EUA**

**Tabela 1.10. Evolução da capacidade instalada de produção de etanol nos EUA**

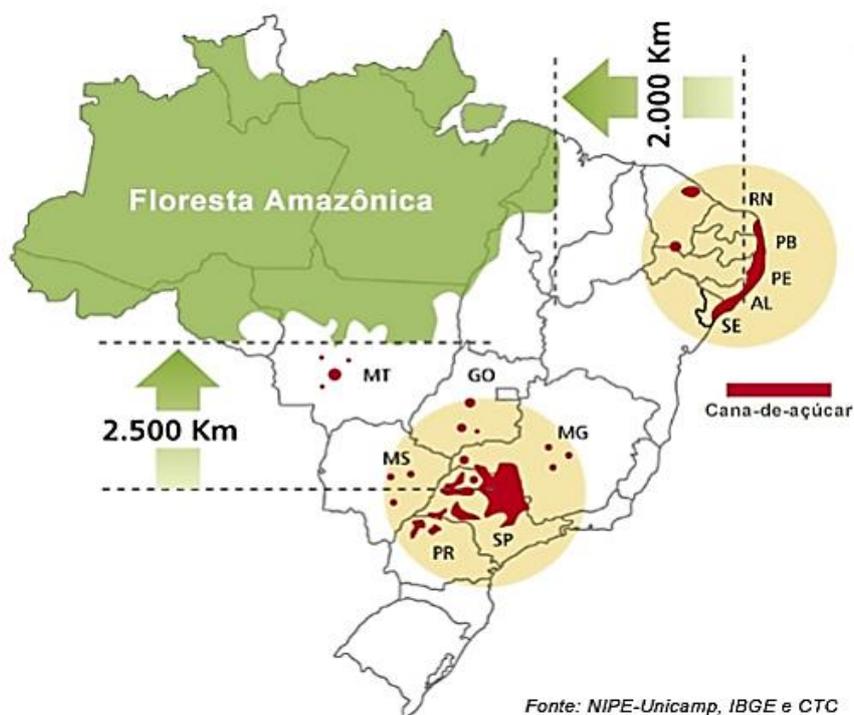
Ano	Capacidade Instalada (GL/ano)	Em Construção (GL/ano)	Capacidade Total (GL/ano)	Produção (GL/ano)	Total de Usinas Instaladas	Número de Plantas em Construção / Expansão	Número de Estados com Plantas
1999	6,4	0,3	6,7	5,5	50	5	17
2000	6,6	0,3	7,0	6,1	54	6	17
2001	7,3	0,3	7,6	6,7	56	5	18
2002	8,9	1,5	10,4	8,1	61	13	19
2003	10,2	1,8	12,1	10,6	68	11	20
2004	11,7	2,3	14,0	12,9	72	15	19
2005	13,8	2,9	16,6	14,8	81	16	18
2006	16,4	7,5	23,9	18,5	95	31	20
2007	20,8	23,2	44,0	24,7	110	76	21
2008	29,9	21,0	50,8	35,2	139	61	21
2009	47,2	7,8	55,0	41,4	170	24	26
2010	49,3	5,4	54,7	50,3	189	15	26
2011	53,3	2,1	55,4	52,7	204	10	29
2012	56,4	0,5	57,0	50,0	209	2	29
2013	56,2	0,2	56,4	50,4	211	2	28
2014	56,3	0,6	57,0	-	210	7	28

Fonte: RFA Renewable Fuels Association, 2014

Isso significa que a produção de proteína vegetal desidratada (DDGS) e outros insumos alimentares também aumentaram, praticamente na mesma proporção, uma vez que representam 47 % do volume de milho, em base seca. A **Figura 1.16** mostra a produção e a rentabilidade do etanol nos EUA, no período de 2001 a 2009, enquanto na **Tabela 1.10** está apresentada a evolução da capacidade instalada para a produção de etanol nos EUA, no período de 1999 a 2014.

### 5.3. AMEAÇA AO BIOMA AMAZÔNICO

Ameaças ao bioma amazônico e de conflitos entre o uso da terra e a produção de energia foram colocadas em destaque pela opinião pública internacional. Todavia, a **Figura 1.17** mostra que a quase totalidade das usinas sucroalcooleiras estão situadas a



**Figura 1.17. Localização das usinas de cana no Brasil**

mais de 2.000 km da Amazônia Legal.

Toda a recente expansão das plantações de cana ocorreu nas regiões sul, sudeste e, mais recentemente, centro-oeste. Em 2012 foram colhidos 590 milhões de toneladas de cana em uma área plantada de cerca de 9 Mha (Conab, 2015), sendo 50 % destes destinados à produção de açúcar e 50 % à de etanol. Comparativamente, a área de grãos (milho, soja, trigo etc.) é de 60 Mha e a área de pastos (gado bovino) é de 200

Mha.

No momento, o uso da terra não se mostra uma grande barreira para expansão da oferta de etanol para o mercado interno, com possibilidade de atender ao mercado global, uma vez decidido que os biocombustíveis são uma alternativa válida de mitigação do aquecimento global.

Segundo Pinguelli Rosa (2013), as emissões devido à mudança do uso indireto da terra (ILUC) no Brasil não podem ser atribuídas ao aumento da produção de biocombustíveis, porque o desmatamento e a produção de etanol apresentaram tendências opostas durante quase dez anos.

A vasta superfície do Brasil, quase todo localizado no trópico úmido, oferece um excelente local para a produção de biomassa em larga escala para uso energético. Estima-se haver uma área de 102 Mha disponíveis para expansão da agricultura e silvicultura, que hoje, somadas ocupam apenas 63 Mha (Rede Agro, 2012, apud Villela, 2015). A cana-de-açúcar ocupa apenas 9 Mha, sendo que metade se destina à produção de etanol e a outra metade à de açúcar. Os ganhos de produtividade nessa cultura foram muito importantes, desde o início do Pro-álcool, passando de pouco mais de 2.000 L/ha de etanol e 45 L/tc, em 1975, para quase 7.000 L/ha de etanol e 70 L/tc, em 2010, respectivamente, e a produtividade agrícola cresceu de 45 t/ha para 75 t/ha (BNDES, 2008).

Cenários do governo brasileiro preveem uma demanda interna de 63 bilhões de litros de etanol em 2020, que poderiam ser atendidos com uma área adicional de 10 Mha de cana-de-açúcar para etanol (hoje, são 9 Mha, em que metade é para açúcar), que é compatível com a terra degradada que pode vir a ficar disponível para a agricultura (Pinguelli Rosa, 2013).

No entanto, no exterior, questiona-se o fato de o Brasil ser um importante produtor de alimentos e poderia vir a substituir terra boa da produção de alimentos para plantio de cana. Uma preocupação sem fundamento, segundo estudo do CTBE-ICONE<sup>15</sup> (Nassar e Harfuch, 2012).

Em 2012, o CTBE e o ICONE criaram um modelo para oferta e demanda de produtos agrícolas e uso da terra no Brasil, chamado *Brazilian Land Use Model*

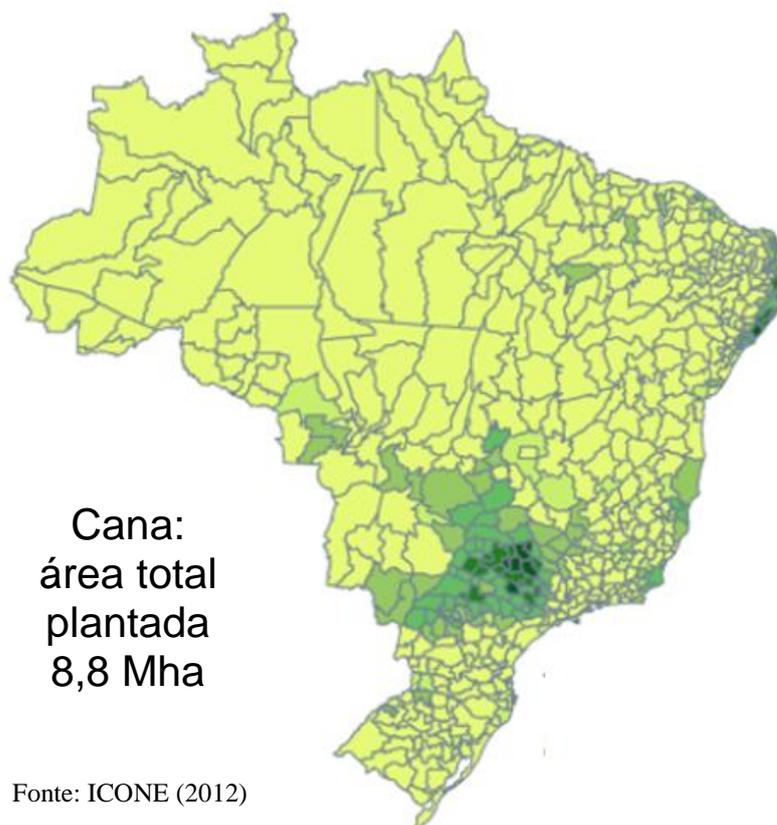
---

<sup>15</sup> CTBE - Centro de Tecnologia do Bioetanol e ICONE - Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais

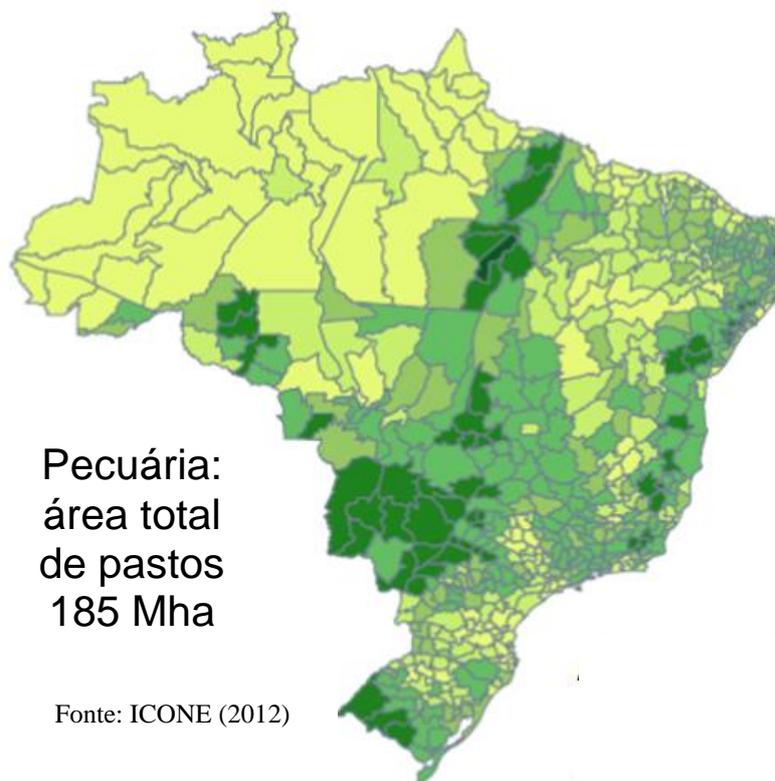
(BLUM). Este modelo indica que o avanço nas áreas nativas não vai ocorrer por biocombustíveis, mas por alimento.

*“A área onde há mais competição por terra e a remuneração é melhor para o agricultor é o cerrado, o que pode causar impacto nas matas nativas. Mas a intensificação da agropecuária no futuro deve levar a uma demanda menor por área nova em relação ao passado”* (Nassar e Harfuch, 2012).

O crescimento do canavial deve continuar a se dar na Região Sudeste, principalmente em áreas de pastagem de criação de gado bovino, e na Região Centro-Oeste, onde deve substituir áreas tradicionais de plantio de grãos e de pastos. Em 1996, foram produzidos 6 Mt de carne, em 184 Mha. Dez anos depois, a produção foi de 9 Mt de carne na mesma área total. O rebanho, no período, saltou de 158 milhões para 206 milhões. Com o ganho de produtividade na pecuária, terras serão disponibilizadas para agricultura. A densidade populacional, em cabeças de gado por hectare, passou de 0,86 para 1,12. Observe-se que em um hectare podem ser produzidos, anualmente, com a tecnologia atual, 6.500 litros de etanol convencional. As **Figuras 1.18 e 1.19** possibilitam comparar as extensões e as localizações das terras, em 2009, destinadas à pastagem para a criação de bovinos e daquelas destinadas à plantação de cana-de-açúcar.



**Figura 1.18. Área plantada com cana-de-açúcar em 2009**



**Figura 1.19. Área total de pastos para pecuária em 2009**

O desmatamento acumulado da Amazônia Legal no período entre 2004 e 2014 é mostrado na **Tabela 1.11**. Com 12,8 Mha poderiam ser produzidos 80 bilhões de litros de etanol – quase a produção mundial. Caso fossem utilizados para plantio de milho, a produção brasileira poderia praticamente duplicar.

**Tabela 1.11 – Evolução do desmatamento da Amazônia Legal entre 2004 e 2014**

Estado	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Acre	728	592	398	184	254	167	259	280	305	221	312
Amazonas	1.232	775	788	610	604	405	595	502	523	583	464
Amapá	46	33	30	39	100	70	53	66	27	23	23
Maranhão	755	922	674	631	1.271	828	712	396	269	403	246
Mato Grosso	11.814	7.145	4.333	2.678	3.258	1.049	871	1.120	757	1.139	1.048
Pará	8.870	5.899	5.659	5.526	5.607	4.281	3.770	3.008	1.741	2.346	1.829
Rondônia	3.858	3.244	2.049	1.611	1.136	482	435	865	773	932	668
Roraima	311	133	231	309	574	121	256	141	124	170	233
Tocantins	158	271	124	63	107	61	49	40	52	74	48
<b>Amazônia Legal (km<sup>2</sup>)</b>	<b>27.772</b>	<b>19.014</b>	<b>14.286</b>	<b>11.651</b>	<b>12.911</b>	<b>7.464</b>	<b>7.000</b>	<b>6.418</b>	<b>4.571</b>	<b>5.891</b>	<b>4.871</b>
<b>Amazônia Legal (Mha)</b>	<b>2,78</b>	<b>1,90</b>	<b>1,43</b>	<b>1,17</b>	<b>1,29</b>	<b>0,75</b>	<b>0,70</b>	<b>0,64</b>	<b>0,46</b>	<b>0,59</b>	<b>0,49</b>
<b>Acumulado a partir de 2004 (Mha)</b>	<b>2,78</b>	<b>4,68</b>	<b>6,11</b>	<b>7,27</b>	<b>8,56</b>	<b>9,31</b>	<b>10,01</b>	<b>10,65</b>	<b>11,11</b>	<b>11,70</b>	<b>12,18</b>

Fonte: INPE - PRODES 2015

O principal responsável pelo desmatamento ainda é a pecuária extensiva, que estimula a exploração inicial da floresta para retirada de madeiras nobres, transformando num momento subsequente a área em pasto.

Decididamente, esse não seria o caminho para o desenvolvimento sustentável, com o desmatamento da Amazônia ainda atingindo cerca de 4.900 km<sup>2</sup>, em 2014, o equivalente a dez vezes a área do reservatório da usina de Belo Monte, que já é motivo de polêmicas internacionais intermináveis.

Desde 2012, o Greenpeace mantém uma campanha para levar ao Congresso Nacional um "Projeto de Lei de Iniciativa Popular pelo Desmatamento Zero", onde fica proibido o corte raso de mata nativa e não serão mais emitidas autorizações para novos desmatamentos. A legislação atual permite o desmatamento de 20 % de floresta amazônica e até 80 % de florestas em outros biomas brasileiros (Greenpeace, 2015). Legais ou não, os impactos destes desmatamentos nas mudanças climáticas vêm sendo sentidos pela população de todo o planeta.

A partir destes dados, pode-se supor que a prioridade tenha sido para a pecuária extensiva e para os combustíveis fósseis nas políticas dos últimos anos. A capacidade instalada de etanol ficou ociosa e a produção caiu, enquanto a demanda de gasolina subiu, sendo necessariamente atendida pela importação, pois não há como ampliar a produção nas refinarias brasileiras. E continuará assim, pois a expansão programada está destinada para produção de diesel.

O retrato do desenvolvimento brasileiro também não é bom devido ao estímulo do consumo de combustíveis fósseis, que prejudicou severamente os biocombustíveis, contribuindo para ampliação das emissões de gases de efeito estufa.

O próximo capítulo trata das questões teóricas referentes ao desenvolvimento econômico e social, à relevância da inovação e da tecnologia e à importância da participação do Estado, através de Políticas Públicas, para as novas tecnologias e a sustentabilidade.

## CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO

### INTRODUÇÃO AO MARCO TEÓRICO

---

O modelo industrial que está sendo proposto nesta tese, para o aproveitamento integral da cana-de-açúcar, possui diferentes partes interessadas, os *stakeholders*, e exige a interação de atividades tão diversificadas quanto o setor agroindustrial, os fabricantes de implementos agrícolas e de equipamentos industriais, o setor químico, o setor de combustíveis, o setor de óleo e gás, a indústria automobilística, os órgãos de monitoramento florestal e uso da terra, as instituições de acompanhamento das mudanças climáticas, universidades e centros de pesquisa, dentre outros.

A viabilidade de implementação de um modelo que envolva tantos atores e de atividades tão diversas exige a coordenação do Estado, através de políticas para inovação, ciência e tecnologia e meio ambiente, além de uma política industrial, considerando a relevância do tema para questões como oferta de combustíveis, segurança energética, emissão de gases de efeito estufa, produção de alimentos, uso da terra, desenvolvimento tecnológico e balança comercial.

Este capítulo está dividido em duas partes e, na primeira, faz uma revisão da literatura sobre o desenvolvimento, na acepção plena da palavra, destacando:

- ➔ a visão *cepalina* da relação entre o Centro e a Periferia, cujo período mais marcante foram os anos 1970;
- ➔ a fragilidade estrutural dos países periféricos (Terceiro Mundo, "em desenvolvimento", BRICS etc.), em relação ao grande efeito dinâmico do desenvolvimento dos países Centrais (Primeiro Mundo, "desenvolvidos", OCDE etc.), que é o conhecimento e a apropriação desse conhecimento pela sociedade; e
- ➔ as analogias que podem ser observadas entre o fenomenal crescimento dos BRICS, neste início de Século XXI, com os "milagres econômicos" da Periferia *cepalina*.

A segunda parte discorre sobre o papel do Estado para corrigir e agir nas externalidades das atividades econômicas, que são geradas pela inovação, pela tecnologia e pelo meio ambiente, justificando, assim, o uso dos instrumentos de políticas públicas para a implementação do modelo proposto nesta tese.

## **PARA COMANDAR A NATUREZA É PRECISO OBEDECÊ-LA**

---

Nas palavras de Ignacy Sachs (2007), a ameaça ambiental polariza as atenções. Ele pergunta por quanto tempo ainda o planeta continuará a subestimar a crise representada pelo déficit crônico e crescente das oportunidades de trabalho decente, pelas desigualdades sociais abismais e também crescentes e pela exclusão das benesses da civilização a uma parcela significativa da população mundial.

A situação se agrava de ano para ano no “planeta favela”, com centenas de milhões de refugiados do campo candidatos a uma urbanização que dificilmente ocorrerá. Cabe a discussão para fazer acontecer um novo ciclo de desenvolvimento rural, gerador de oportunidades de trabalho digno e que, ao mesmo tempo, ofereça boas condições de vida e acesso à educação, saúde e cultura.

Esperar que esse processo ocorra pelo jogo irrestrito das forças de mercado seria em vão. Numa fase de intensiva promoção dos biocombustíveis, é importante desenhar políticas públicas, e que estas aproveitem o grau de liberdade circunstancialmente existente para direcionar a bioenergia e a indústria dos biocombustíveis com base em critérios ambientais e sociais que transcendam o custo/benefício tradicional.

Segundo Chesnais (2013), de qualquer modo, nada vai surgir a tempo, dada a dimensão e a velocidade das ameaças. Uma necessidade urgente é a de questionar e romper com os dois principais pilares de sustentação do pensamento dominante:

- ❖ o homem ver a si mesmo como "dono e senhor da natureza", um conceito desenvolvido a partir do pensamento de Descartes (Francis Bacon foi muito mais prudente e sábio com esse tema e postulava: "a natureza, para ser comandada, deve ser obedecida"); e
- ❖ os melhores motores possíveis para a atividade econômica e o bem-estar social serem produzidos para o lucro, propriedade privada, acumulação de riqueza e competição.

Os desafios da sustentabilidade vão muito além da gestão dos recursos naturais. A construção de um modelo sustentável de desenvolvimento passa por garantir a capacidade de inovar e a autonomia na pesquisa científica e tecnológica dos países (Sachs, 2002).

A primeira parte deste Capítulo aborda a questão do desenvolvimento e de como foi a relação dos países Centrais e dos países Periféricos, nos anos 1970, em temas como inovação, tecnologia, energia e meio ambiente. Hoje, a relação dos países da OCDE com os BRICS guarda muitos elementos da teoria *cepalina* Centro-Periferia daquela época. O importante para os países do Terceiro Mundo, endereçados como BRICS ou não, é buscar a maximização dos valores estruturais do desenvolvimento, seja na inovação, seja na tecnologia, e não repetir a frustração do passado, de crescer sem apresentar o retorno justo à sociedade, na forma de desenvolvimento.

## **PARTE I: DESENVOLVIMENTO, SUBDESENVOLVIMENTO E A NOVA RELAÇÃO CENTRO-PERIFERIA**

### **1. PREBISCH, O CENTRO E A PERIFERIA**

---

Quando o economista argentino Raúl Prebisch lançou a tese desenvolvimentista “Centro-Periferia”, em 1949, na Cepal, procurava explicações e soluções para a América Latina, em bases alternativas àquelas da teoria econômica ortodoxa. Existiria um sistema de relações econômicas internacionais, que funcionava como uma espécie de constelação, na qual os países industrializados estariam no Centro e a América Latina ficava na passiva Periferia. O Centro era produtor de manufaturas e historicamente responsável pelo desenvolvimento tecnológico, cabendo à Periferia fornecer matérias-primas e recursos naturais abundantes.

Prebisch ([1949] 2011) baseava seus argumentos em evidências empíricas que revelavam uma desigualdade muito grande entre os produtores e exportadores de bens manufaturados e os produtores e exportadores de *commodities* primárias, manifestada nas diferenças de elasticidade de demanda desses dois tipos de bens e na tendência à deterioração dos termos de troca das *commodities* primárias. Esse fenômeno realimentava a lógica do sistema num ciclo vicioso, onde a dependência da Periferia era cada vez maior, não apresentando condições endógenas de reversão dessa situação.

Esse modelo, voltado para o exterior, com a concentração do desenvolvimento tecnológico e de seus frutos no setor exportador dos países periféricos, reforçou uma estrutura social heterogênea, na qual uma grande parte da população ficou à margem do processo. Surgiu, portanto, a necessidade de diferenciar **crecimento econômico** de **desenvolvimento econômico** – esse último voltado para análise de mudanças

estruturais que transcendem a questão do crescimento, como as condições socioambientais e tecnológicas. Além disso, constatou-se que a simples transferência de tecnologia não gera conhecimento e capacitação para o desenvolvimento tecnológico posterior, autônomo e endógeno (Rodríguez, 2009).

Prebisch propunha a industrialização via substituição de importações, a fim de contrabalançar a tendência à deterioração dos termos de troca e a baixa elasticidade de demanda dos bens primários, além de absorver o grande contingente de mão-de-obra de baixa produtividade e os que fossem marginalizados pelo progresso tecnológico nos setores exportadores e na agricultura.

Mas o processo de industrialização da Periferia, além de tardio, ocorreu em épocas de crise nas economias centrais, o que acentuou a tendência de a Periferia imitar o Centro e crescer à sua imagem e semelhança. Apesar de todas as semelhanças nos problemas dos países do Terceiro Mundo entre si, os estudos econômicos frequentemente são referenciados aos critérios e experiências dos países Centrais e desses estudos não se pode esperar soluções que digam respeito diretamente à Periferia (Prebisch, 1984, [1949] 2011).

Assim, procedeu-se à adoção de tecnologias, ideias, estilos de vida, ideologias e modelos institucionais do Centro na estrutura social da Periferia, mas que não acompanharam a evolução do Centro, revelando contradições e mutações importantes neste processo de adoção. O crescimento econômico acentuou ainda mais as disparidades de renda e de riqueza entre as classes sociais na América Latina, frustrando as expectativas originais.

## **FURTADO, O DESENVOLVIMENTO E O SUBDESENVOLVIMENTO**

---

Celso Furtado aprofundou e difundiu o pensamento estruturalista cepalino inaugurado por Prebisch. Acerca das estruturas subdesenvolvidas, em uma de suas obras mais importantes, *Desenvolvimento e Subdesenvolvimento* ([1961] 2009), observa que desde a Revolução Industrial, após três grandes movimentos de expansão capitalista da economia mundial, o impacto dessas expansões sobre as estruturas arcaicas variou ao sabor das circunstâncias locais e do tipo e da intensidade da penetração do capital. No entanto, em todas, o resultado comum foi a criação de estruturas híbridas, onde uma parte tendia a se comportar como um sistema capitalista e a outra a se manter arcaica, numa dualidade que caracteriza o fenômeno do subdesenvolvimento contemporâneo.

Nas palavras de Furtado:

*"O subdesenvolvimento é, portanto, um processo histórico autônomo e não uma etapa pela qual tenham, necessariamente, passado as economias que já alcançaram grau superior de desenvolvimento" (p. 161).*

A etapa superior do subdesenvolvimento é alcançada quando se diversifica o núcleo industrial e a expansão da capacidade produtiva pode ser atendida por esse núcleo. Furtado afirma que esse fato não implica na mudança de orientação na economia e que seu elemento dinâmico passa a ser um núcleo industrial ligado ao mercado interno. Este núcleo industrial permanece se desenvolvendo em função da substituição de importações e seu elemento dinâmico é induzido pela demanda externa *"e não nas inovações introduzidas nos processos produtivos, como ocorre nas economias industriais totalmente desenvolvidas"* (Furtado, [1961] 2009 p. 170).

Ainda segundo o autor, o fenômeno do subdesenvolvimento está na sua forma mais complexa quando a economia apresenta três setores:

- ❖ o primeiro, de subsistência;
- ❖ o segundo, voltado para a exportação; e
- ❖ o terceiro, como um núcleo industrial, ligado ao mercado interno, suficientemente diversificado na produção das máquinas e equipamentos que necessita para manter seu crescimento econômico.

Esse terceiro setor se desenvolve em função da substituição de bens importados e está em permanente concorrência com eles. Como consequência, a indústria deste setor busca ofertar um produto similar ao importado e implementar métodos de produção competitivos com os fabricantes estrangeiros.

O resultado prático disso é que as inovações incorporadas aos processos são aquelas que levam a estruturas de custos e preços semelhantes aos exportadores internacionais e não às inovações que permitem a absorção do setor de subsistência, o primeiro setor, e que levariam à mudança da estrutura ocupacional.

*"Explica-se, deste modo, que uma economia onde a produção industrial já alcançou elevado grau de diversificação e tem uma participação no produto que pouco a distingue da observada em países desenvolvidos apresente uma estrutura ocupacional*

*tipicamente pré-capitalista e que grande parte de sua população esteja alheia aos benefícios do desenvolvimento" (p. 172).*

Para Furtado (1961), ficam evidentes a íntima interdependência entre a evolução da tecnologia nos países industrializados e as condições históricas do seu desenvolvimento econômico. Essa percepção da tecnologia se apresenta sedimentada e incorporada aos equipamentos industriais, mas resulta de um longo processo de decantação.

A superação da "condição periférica" significava, na opinião da maioria dos intelectuais ilustres dos primeiros dias da Cepal (Prebisch, Furtado, Medina Echavarría, Noyola Vazquez Ahumada, Pinto e Osvaldo Sunkel, entre outros), ter um modo próprio de introdução do progresso técnico, para distribuir renda e interagir com o mundo. Esses autores defendiam que era necessário desenvolver uma teoria autônoma capaz de compreender a natureza do subdesenvolvimento da região e as vicissitudes de seu desenvolvimento socioeconômico.

## **2. NEOCLÁSSICOS E INTERVENCIONISTAS**

---

Na visão dos economistas neoclássicos, o progresso técnico consiste na elevação dos níveis de produtividade real da força de trabalho, pela incorporação de métodos e técnicas mais eficientes, tendo como consequência natural a elevação da renda e da qualidade de vida da população. Assim, o fruto do progresso técnico tenderia a ser repartido pela sociedade, seja na forma de menores preços, seja na forma de rendas mais altas.

Os países produtores de bens primários se apropriariam disso através das suas vantagens comparativas na divisão internacional do trabalho e não necessitariam da industrialização ou do progresso técnico.

Segundo Demsetz (1993), o foco neoclássico está vinculado à teoria dos preços e alocação de recursos, que por sua vez tem origem no debate entre mercantilistas e defensores do livre mercado sobre o papel do Estado na economia. A visão liberal se apoiava na “mão invisível” de Adam Smith, que já no Século 18 apontava para a característica autorregulada do sistema de preços.

A necessidade de combater aqueles que, a exemplo de Marx, evocavam a necessidade de planejamento central para evitar o caos econômico levou os liberais a

formularem quais seriam as condições necessárias para o sistema de preços funcionar de forma a substanciar os argumentos de Smith. Tais condições foram formalizadas no modelo de competição perfeita, o modelo de coordenação pelo mercado

O papel do Estado era restrito à manutenção da lei e da ordem e a cumprir funções sociais básicas, como educação e saúde pública. No tocante à coordenação da atividade econômica, a indústria era deixada ao sabor das forças não reguladas da oferta e da demanda.

Bresser Pereira (1976) vê a economia neoclássica como um modelo matematicamente rigoroso, fruto da imaginação e da inteligência de economistas brilhantes, mas que não corresponde à realidade nem fornece instrumentos eficientes de política econômica para que possa nela intervir. Na verdade, era sob muitos aspectos mais uma peça de sistema ideológico alienado e conservador de justificativa do liberalismo econômico, do *laissez-faire*. Um mundo perfeito, em que as forças do mercado, através de seus mecanismos automáticos de autoajuste, garantiriam pleno emprego, eficiência máxima da produção, maximização da satisfação dos consumidores e dos lucros dos *shareholders* e distribuição ótima da renda entre os proprietários dos fatores de produção.

O irrealismo dos princípios da teoria neoclássica pode ser constatado, dentre outras, nas seguintes premissas (Tigre, 1998):

- o mercado, embora possa apresentar situações transitórias de desequilíbrio, tende a estabelecer condições de concorrência e informações perfeitas;
- as possibilidades tecnológicas são usualmente representadas pela função de produção, que especifica a produção correspondente a cada combinação possível de fatores;
- as tecnologias estão disponíveis no mercado, seja através de bens de capital ou no conhecimento incorporado pelos trabalhadores; e
- a racionalidade perfeita dos agentes é assumida, diante de objetivos de maximização de lucros.

John Maynard Keynes, até então um dos mais eminentes economistas de seu tempo, publica *General Theory of Employment, Interest and Money* (1936) e revoluciona a teoria neoclássica. Segundo Keynes, o sistema econômico capitalista

estava longe de assegurar automaticamente o pleno emprego e o desenvolvimento econômico sem que ocorressem crises crônicas de duração indefinida, como apregoados pelos neoclássicos.

Ele desmascara o *laissez-faire*, colocando que, se o sistema econômico é deixado por sua própria conta, inexoravelmente, tende à crise crônica de subconsumo e ao desemprego. Desta forma, criticando a teoria neoclássica e propondo um modelo alternativo, Keynes devolveu a economia à realidade.

No entanto, Keynes não se preocupou em situar o sistema capitalista dentro de uma perspectiva histórica, nem em examinar as condicionantes sociais e tecnológicas que agem sobre o comportamento econômico dos indivíduos. A economia, na medida em que é uma ciência social, envolve inúmeros aspectos não-econômicos.

Sua teoria econômica, uma formulação genial, segundo Bresser Pereira, destina-se aos países capitalistas desenvolvidos. Dificilmente se aplica a um país subdesenvolvido, onde o comportamento do tipo *homo economicus* não prevalece, onde o mercado não é integrado, onde o sistema financeiro é incipiente. Mas a desmistificação do "mercado perfeito" abriu novas alternativas para a atuação do Estado.

E são exatamente centradas no papel do Estado que economistas estruturalistas concebem as políticas de desenvolvimento dos países do Terceiro Mundo e que Prebisch divide em quatro temas: industrialização, comércio exterior, tecnologia e acumulação de capital.

## **2.1. A CEPAL E O ESTRUTURALISMO**

---

Na formulação da teoria estruturalista *cepalina*, Prebisch argumenta que as condições inadequadas de crescimento na periferia, restringindo a industrialização e o progresso técnico, exigem a coordenação do Estado para superá-las, pois, nessas condições, as forças de mercado são incapazes de viabilizar o crescimento.

A análise da Cepal examina a integração produtiva, social, institucional e internacional específica da América Latina e do Caribe na sua qualidade de "periféricos", em oposição às características das economias "centrais", observada a partir da perspectiva de desenvolvimento. A abordagem teve origem nos três textos

fundamentais de Prebisch, na Cepal<sup>16</sup> (Prebisch, [1949, 1950 e 1951] 2011), que foi aprofundada durante as duas décadas seguintes pelo autor e alguns de seus seguidores, onde se destaca Celso Furtado.

Em comparação com os países centrais (os produtores de bens industriais), a estrutura socioeconômica da região tinha as seguintes características:

- ❖ especialização nos produtos do setor primário e baixa diversidade produtiva (complementaridade intersetorial e reduzida integração vertical);
- ❖ diferentes níveis de produtividade setorial e oferta ilimitada de trabalho e salários próximos à renda de subsistência; e
- ❖ estrutura institucional (Estado, agricultura e comércio) ligeiramente inclinada para o investimento e o progresso técnico.

A industrialização foi uma resposta à recessão dos anos trinta e da Segunda Guerra Mundial e que progrediu de forma espontânea, sem apoio das políticas de fomento. Essa foi a fórmula para a superação da pobreza nos países Centrais e também foi a fórmula que criou o fosso crescente entre a Periferia e o Centro (Fiori, 2001).

As três características acima mencionadas do subdesenvolvimento e da "natureza periférica" da América Latina são os aspectos essenciais para as análises tradicionalmente exploradas pela Cepal: progresso técnico; crescimento do emprego; distribuição de renda; erradicação da pobreza; integração internacional no domínio das relações "Centro-Periferia"; e planejamento das implicações políticas. Ao examinar o quadro econômico recente, Bielschowsky (2009) destaca o fato de que esses aspectos ainda são importantes e continuam presentes na análise da Cepal, indicando que o cenário pouco se alterou.

## **2.2. COMO FICOU A PERIFERIA?**

---

O crescimento experimentado pelos países em desenvolvimento neste início do Século XXI, encontra na teoria prebischiana Centro-Periferia grande utilidade para seu entendimento, assim como foi para a análise das relações dos países desenvolvidos com a América Latina na década de 1970. O fato de a Periferia ter recuperado trajetórias de

---

<sup>16</sup> O desenvolvimento econômico da América Latina e alguns de seus principais problemas (1949), que Albert Hirschman chamou de Manifesto Latino-Americano; Crescimento, desequilíbrio e disparidades: interpretação do processo de desenvolvimento econômico (1950); e Problemas teóricos e práticos do crescimento econômico (1951).

crescimento acima da média mundial não elimina a necessidade de responder questões mais profundas:

- onde crescer?
- para quem crescer?
- por que crescer?
- como crescer?

O estabelecimento de uma indústria baseada em mão-de-obra e recursos naturais baratos não vem resultando na esperada solução dos problemas econômicos e sociais da Periferia. A dinâmica do modelo não é guiada pela tradicional dualidade entre matérias-primas e produtos industrializados, como há 40 anos, mas pelos determinantes sistêmicos da competitividade.

A industrialização que se espalhou para a Periferia estava voltada para processos produtivos intensivos em recursos naturais e energia, indústrias energo-intensivas, também chamadas “Indústrias de Chaminé”.

Em todo o mundo, essa base industrial está associada a problemas de poluição ambiental em todos os seus níveis:

- globais – por serem responsáveis pela intensificação do efeito estufa e pela degradação da camada de ozônio;
- transfronteiriços – como as chuvas ácidas e poluição de recursos hídricos; e
- locais – a degradação da qualidade ambiental dos solos, dos corpos hídricos e da atmosfera.

Por essa razão, os movimentos sociais do Centro passaram a pressionar crescentemente seus governos para que tais atividades fossem controladas ou mesmo banidas de seu território.

Segundo Young e Lustosa (2003, p.208),

*“essas restrições ambientais para atividades “sujas” nos países industrializados, combinadas à intensificação do comércio internacional, permitiu a expansão de indústrias mais poluentes para a Periferia, que gradualmente passou a exportar, além das tradicionais commodities primárias, commodities manufaturadas de baixo conteúdo tecnológico e intensiva em recursos ambientais – recursos naturais, energia e poluição – caracterizando uma nova*

*divisão internacional do trabalho. Ou seja, embora algumas indústrias ambientalmente complicadas tenham sobrevivido no Centro, as pressões sociais por um ambiente mais limpo, aliadas ao domínio do desenvolvimento tecnológico, inclusive de tecnologias mais saudáveis ao meio ambiente, permitiu que a indústria do Centro diminuísse consideravelmente sua participação na poluição total”.*

### **2.3. ROTA DE OCUPAÇÃO**

---

D'Avignon (2001), abordando a ocupação locacional das indústrias no Brasil, iniciada nos anos 1970, constata que a localização preferencial das atividades dinâmicas, especializadas, intensivas em tecnologia, ficava no eixo Rio-São Paulo, junto aos meios técnico-científicos maduros, enquanto os padrões locacionais das atividades extrativistas ou de bens primários buscavam a proximidade com as matérias-primas.

O autor expande esse raciocínio para a especialização das atividades econômicas no mundo, onde o "*consumo energético por valor agregado da economia decresce nas economias ditas desenvolvidas, enquanto o mesmo índice cresce nos países ditas em desenvolvimento*". E conclui sugerindo a existência de uma especialização clara dos países periféricos por produtos de baixo valor agregado e intensivos em energia, enquanto os países centrais se especializam nos bens de alto valor agregado com baixo consumo de energia e de recursos naturais (D'Avignon, 2001. p.223).

Conforme o conceito desenvolvido por Milton Santos (1997), segundo o qual a ocupação do espaço deriva das características do meio técnico-científico existente ("rota de ocupação"), a implantação de novos empreendimentos nos países da Periferia tende a ser realizada com as tecnologias já disponíveis e já usadas em larga escala, caso não haja condicionantes ambientais e sociais que exijam a ruptura desses padrões tecnológicos para que possam vir a operar nos países em desenvolvimento.

Segundo Torres (1996), a rápida e tardia industrialização do Brasil deu-se, na década de 1970, através de atividades de grande impacto ambiental, como as indústrias química, petroquímica, metal-mecânica, papel e celulose, metalúrgica, siderúrgica e madeireira, em consonância com o conceito da "rota de ocupação" de Milton Santos.

Assim, a transferência para a Periferia dessas atividades energo-intensivas,

ainda pôde prolongar a vida útil de tecnologias e equipamentos, desenvolvidos e fabricados nos países centrais, em função das legislações ambientais e trabalhistas menos rigorosas que no Centro.

A Periferia, além de passar a produzir e exportar *commodities* de baixo valor agregado, também passou a conviver com elevados níveis de poluição industrial, devido aos processos e métodos adotados, revelando:

- ❖ a distribuição desigual dos frutos do progresso na Periferia, ficando as camadas mais abastadas com parcelas maiores da renda e da riqueza geradas;
- ❖ a exclusão ambiental, pois as áreas poluídas ficam desvalorizadas, incentivando sua ocupação pela população de baixa renda, que não têm representação institucional nem organização suficientes para evitar problemas ambientais, agravando o quadro;
- ❖ a especialização relativa em produtos de baixo dinamismo tecnológico, sem romper com o desequilíbrio fundamental na inserção no comércio internacional.

A expansão de atividades industriais foi uma nova forma de a Periferia ser incluída na divisão internacional do trabalho, mas a partir de vantagens competitivas “espúrias” (baixos salários, fraca regulamentação ambiental, subsídios nos custos de recursos naturais), e não de competitividade “autêntica” de suas empresas (Rodríguez, 2009).

Como afirmam Young e Lustosa (2003, p.210),

*“não se superou, portanto, o fenômeno da deterioração dos termos de troca como causa do desenvolvimento desigual entre Centro e Periferia. Hoje, há pouca diferença entre os produtos primários tradicionais e as commodities industriais básicas, de baixo conteúdo tecnológico e elevada demanda de energia e recursos naturais, onde a capacidade de inovação (e, conseqüentemente, a possibilidade de “fazer preços”) é bastante limitada”*

Em contrapartida, os países do Centro mantêm o controle sobre os mercados dinâmicos, com bens de alto valor agregado, tecnologia de ponta, grande diferenciação de produto, mediante o fluxo contínuo de inovações que permite, simultaneamente, barreiras à entrada e a permanente apreciação dos preços (D'Avignon, 2001).

A teoria desenvolvimentista de Prebisch, no pós-guerra (1949), antecipava como se dava a relação entre modelos econômicos que vieram a se consolidar nas décadas seguintes. O Centro industrializado e a Periferia pré-industrial. O momento subsequente foi de maturação da industrialização, em diversas regiões do Centro, e o surgimento de sociedades pós-industrializadas. Este conceito foi apresentado por Daniel Bell, em *The coming of post-industrial society*, de 1967, tomando como referência o comportamento da sociedade americana, que depois seria estendido a diversas outras economias centrais, e por Alain Touraine, em *La société post-industrielle*, de 1969.

### **3. PÓS-INDUSTRIALIZAÇÃO**

---

Da mesma forma que a teoria de Prebisch ajuda a explicar muitos dos modelos de desenvolvimento adotados pela Periferia na década de 70, a pós-industrialização do Centro traz sugestões sobre os motivos que levaram à maciça transferência da expansão do parque fabril dos bens de baixo valor agregado para os BRICS', a partir dos anos 90.

A sociedade industrial teve início em meados do século XVIII. Foi impulsionada pela revolução industrial do século XIX e não chegou ao final do século XX. Ao longo desses 200 anos, a civilização experimentou, em comparação aos períodos anteriores, um progresso vertiginoso em diversos setores (tecnológico, social e político), que foi mais rapidamente incorporado por determinadas nações, formando as chamadas sociedades industrializadas (Touraine, 1984).

Diversos autores abordam o tema e dessa literatura podem ser citadas algumas das características de organização dessa sociedade industrial (Hegedus, 1973; Toffler, 1980; Landes, 1994; De Masi, 1999; Valle, 2014):

- **ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO:** concentração de grandes massas de trabalhadores assalariados em unidades fabris, financiadas e organizadas pelo capital, em função de um modo de produção industrial; trabalhadores do setor secundário são maioria em relação aos dos setores primário ou terciário; racionalização progressiva e aplicação da ciência na organização do trabalho; divisão social do trabalho, com crescente, capilar e programada fragmentação técnica;
- **ORGANIZAÇÃO ESPACIAL:** separação espacial entre trabalho e habitação e entre família e atividade profissional; progressiva substituição da grande família pela família nuclear; urbanização e escolarização das massas; reforma de espaços em função dos produtos; mobilidade geográfica e social;

- ORGANIZAÇÃO SOCIAL: redução das desigualdades sociais; rígida hierarquia entre os países, em função do PIB, do controle das matérias-primas e dos meios de produção; conflitos entre duas classes sociais distintas, facilmente reconhecíveis e contrapostas: empregados e empregadores;
- ORGANIZAÇÃO INDUSTRIAL: produção em massa e consumismo; homem sincronizado com as máquinas e não mais com os ritmos e tempos da natureza; a contribuição da indústria é a mais importante na formação da renda nacional;
- ORGANIZAÇÃO ECONÔMICA: fé no progresso irreversível e no bem-estar crescente; homem subjugando a natureza; só existe um “caminho vencedor” e é ele que deve ser encontrado; e
- ORGANIZAÇÃO DA PRODUÇÃO: projetar nacionalmente quaisquer sistemas industriais; aplicação das descobertas científicas ao processo produtivo; produtividade e eficiência como únicos meios de otimizar recursos e fatores de produção; destinar a cada produto um local (fábrica) e tempos precisos de produção – *benchmarking*.

Segundo Edward Shils (1959, 1961), se considerarmos a individualidade de cada nação, podem ser identificados três fenômenos na fase mais madura dessas sociedades industriais:

- ❖ convergência progressiva entre os países independentemente de seu regime político, pois tanto o socialismo, quanto o capitalismo são duas espécies do mesmo gênero, a sociedade industrial;
- ❖ crescimento das classes médias na sociedade, gerando conflitos crescentes entre a burguesia e o proletariado, e da tecnoestrutura nas empresas, modificando a configuração capitalista-operário; e
- ❖ difusão do consumo de massa e da sociedade de massa, permitindo que a massa de cidadãos se incorpore à coisa pública e à gestão do poder.

A sociedade pós-industrial é um prolongamento da sociedade industrial, não uma ruptura. A transição para a sociedade pós-industrial caracteriza-se, entre outros fatores, pelo predomínio numérico dos trabalhadores do setor terciário, a “nova classe”, que R.H. Tawney chamara de “*brain workers*” (DE MASI, 1999).

Segundo Bell (1967), podemos analisar uma sociedade segundo três de seus

aspectos: estrutura social (economia, tecnologia e sistema ocupacional); organização política (regula a divisão do poder e garante a arbitragem de conflitos); e cultura (campo dos símbolos e dos significados).

A abordagem de Alain Touraine (1969) mais claramente enfatiza as participações sociais e culturais, bem como os conflitos do novo tipo de sociedade. A mera acumulação de capital não responde unicamente pelo crescimento, que depende de fatores sociais cada vez mais diversos, e das contribuições indiretas à produção, como a educação e a informação dos consumidores, por exemplo.

O conceito de sociedade pós-industrial diz respeito essencialmente às mudanças na estrutura social, às transformações que se produzem na vida econômica e na estrutura profissional e, por fim, às novas relações que se estabelecem entre a teoria e a prática, entre a ciência e a tecnologia.

As cinco dimensões que definem a sociedade pós-industrial, segundo Bell, são:

1. setor econômico: passagem de uma economia produtora de bens para uma economia de serviço;
2. distribuição da ocupação: a proeminência de uma classe de profissionais qualificados e técnicos;
3. princípio axial: o caráter central do conhecimento teórico como fonte de inovações e de formulação de políticas para a sociedade;
4. perspectiva temporal: controle da tecnologia e valorização tecnológica; e
5. processos decisórios: criação de uma nova “tecnologia intelectual” – o conhecimento está na base de todas as sociedades, que sobrevivem graças às inovações e ao crescimento, e é o saber teórico que se tornou a matriz da inovação.

A **Tabela 2.1** apresenta as principais características de cada uma dessas dimensões, na transição entre uma sociedade pré-industrial e uma pós-industrial, passando pela etapa industrializada.

Enfim, os reflexos dessas duas teorias aqui sumarizadas, Centro-Periferia e Pós-Industrialização, se dão na sociedade como um todo, seja sobre as relações trabalhistas e os direitos intelectuais, seja sobre a preservação ambiental ou a equidade.

As sociedades pós-industrializadas se comportaram com uma agenda positiva em relação às questões energéticas e ambientais ao longo das últimas décadas. Mas as

consequências para a Periferia do século XXI, são a reprodução do comportamento (des)estrutural, como há 40 anos.

**Tabela 2.1. Dimensões das sociedades segundo o estágio de desenvolvimento**

ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO	PRÉ-INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	PÓS-INDUSTRIAL
SETORES ECONÔMICOS	PRIMÁRIO E EXTRATIVO	PRODUÇÃO DE BENS	TERCIÁRIO, QUATERNÁRIO E QUINÁRIO
OCUPAÇÕES	CAMPONESES, MINEIROS, PESCADORES, TRABALHADORES NÃO-QUALIFICADOS	TRABALHADORES SEMI-QUALIFICADOS, ENGENHEIROS	PROFISSIONAIS QUALIFICADOS, TÉCNICOS E CIENTISTAS
TECNOLOGIA	MATERIAIS BRUTOS	FONTES DE ENERGIA	INFORMAÇÕES
ESTRATÉGIA	COMPETIÇÃO COM A NATUREZA	COMPETIÇÃO COM A NATUREZA CONSTRUÍDA	COMPETIÇÃO ENTRE INDIVÍDUOS
METODOLOGIA	SENSO COMUM E EXPERIÊNCIA	EMPIRISMO E EXPERIMENTAÇÃO	CARÁTER CENTRAL DA TEORIA (MODELOS, SIMULAÇÕES, TEORIA DA DECISÃO, ANÁLISE SISTÊMICA)
PERSPECTIVA TEMPORAL	ORIENTADO PARA O PASSADO	ADAPTAÇÃO E PROJEÇÕES	PREVISÕES E ORIENTAÇÃO PARA O FUTURO
PRINCIPIO AXIAL	TRADICIONALISMO	DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (CONTROLE PÚBLICO DAS DECISÕES DE INVESTIMENTO)	CENTRALIZAÇÃO DO CONHECIMENTO TEÓRICO
PAÍSES (ANOS 70)	ÁSIA, ÁFRICA, AMÉRICA LATINA	EUROPA OCIDENTAL, UNIÃO SOVIÉTICA, JAPÃO	ESTADOS UNIDOS
PAÍSES (SEC XXI)	ÁFRICA, AMÉRICA LATINA (PARTE)	EUROPA ORIENTAL, UNIÃO SOVIÉTICA, ÁSIA, BRASIL, ARGENTINA, CHILE	ESTADOS UNIDOS, JAPÃO, EUROPA OCIDENTAL

Fonte: Elaboração própria, a partir Bell, 1967

Como já descrito pela relação "Centro-Periferia", não se superou, portanto, o fenômeno da deterioração dos termos de troca como causa do desenvolvimento desigual entre Centro e Periferia:

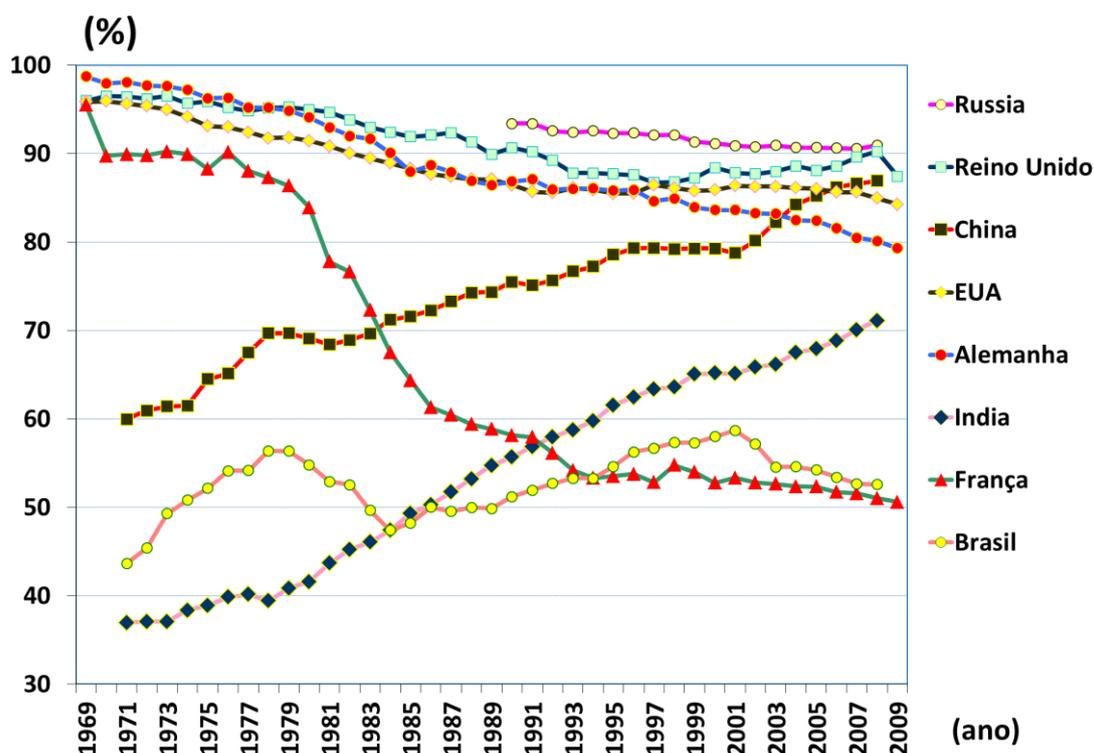
*"... os países do Centro mantêm o controle sobre os mercados dinâmicos, com bens de alto valor agregado, tecnologia de ponta, grande diferenciação de produto, mediante o fluxo contínuo de inovações que permite, simultaneamente, barreiras à entrada e a permanente apreciação dos preços"* (Young e Lustosa, 2003, p. 210).

Estes mesmos princípios dirigem o Papel dos Estados, quer ele seja da OCDE, quer seja no Terceiro Mundo, no apoio às Políticas Ambientais, Políticas Tecnológicas, Políticas de Ciência e Tecnologia e Políticas Industriais, considerando o caráter estratégico desses temas para o desenvolvimento econômico, e não apenas no crescimento econômico.

## 4. Os BRICS E A NOVA PERIFERIA

Os países Centrais vêm reduzindo a participação de combustíveis fósseis nas suas matrizes energéticas desde a primeira crise do petróleo, em 1971. Os países da OCDE foram gradativamente reduzindo as fontes fósseis, que caem de um patamar de mais de 95 %, para a faixa entre 80 % e 90 %, a partir dos anos 1990, destacando-se que o petróleo foi maciçamente direcionado para uso no setor de transportes (World Bank, 2010).

A França foi o país mais ousado, por ter implantado um gigantesco programa nuclear, desde o segundo choque do petróleo, em 1977, e conseguiu reduzir o consumo dos combustíveis fósseis para cerca de 50 % na sua matriz energética (**Figura 2.1**), mesmo enfrentando todo tipo de preconceito da sociedade à energia nuclear.



Fonte: Elaboração própria, a partir de World Bank, 2012

**Figura 2.1. Evolução da participação de combustíveis fósseis nos BRICS e países da OCDE**

O caminho inverso, seguem Índia e China, cuja demanda de infraestrutura necessária para o crescimento econômico é diretamente associada ao aumento do consumo de combustíveis fósseis. Por mais que estes países invistam em fontes

renováveis, ainda será insuficiente para impedir o crescimento da participação dos combustíveis fósseis na matriz, por terem o carvão mineral como principal insumo energético dentro de seus territórios e devido ao modelo de desenvolvimento adotado por ambos, que segue o padrão preconizado por Prebisch para a Periferia dos anos 1970: "trabalho-intensivo; energia-intensivo; emissor-intensivo", mas agora com um novo perfil na pauta de exportações, composta por semi-acabados, manufaturados de baixo valor agregado e *commodities* semi-industrializadas.

A **Tabela 2.2** apresenta indicadores referentes a países selecionados da OCDE e dos BRICS, usados pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2014) em função da oferta total de energia primária (OTEP), da emissão de CO<sub>2</sub> e da geração de riqueza (PIB).

**Tabela 2.2. Indicadores energéticos e ambientais de países selecionados**

INDICADORES	OTEP/PIB	CO <sub>2</sub> /OTEP	CO <sub>2</sub> /PIB
ano base: 2011	(tep/1000 USD)	(t CO <sub>2</sub> /tep)	(t CO <sub>2</sub> /USD)
MUNDO	0,25	2,39	0,60
OCDE	0,14	2,33	0,32
<b>BRASIL</b>	<b>0,24</b>	<b>1,51</b>	<b>0,36</b>
RÚSSIA	0,77	2,26	1,75
ÍNDIA	0,57	2,33	1,32
CHINA	0,65	2,92	1,90
ÁFRICA DO SUL	0,47	2,60	1,23
EUA	0,17	2,41	0,40
JAPÃO	0,10	2,57	0,26
FRANÇA	0,11	1,30	0,15
ALEMANHA	0,10	2,40	0,25
CORÉIA	0,25	2,26	0,56
ESPANHA	0,11	2,15	0,23
CANADÁ	0,20	2,10	0,43
HOLANDA	0,11	2,25	0,25
NORUEGA	0,09	1,35	0,12
GRÃ-BRETANHA	0,08	2,36	0,19

OTEP: OFERTA TOTAL DE ENERGIA PRIMÁRIA

Fonte: Elaboração própria, a partir de IEA, 2014

Desses indicadores podemos observar:

- a oferta total de energia primária necessária para agregar US\$ 1.000 à economia de um país (OTEP/PIB);
- a magnitude da participação de combustíveis fósseis na oferta total de energia primária (CO<sub>2</sub>/OTEP); e

- a quantidade emitida de CO<sub>2</sub> para gerar uma unidade do produto interno bruto (CO<sub>2</sub>/PIB).

Dois aspectos podem ser destacados do quadro:

- ❖ a participação das fontes fósseis na oferta total de energia primária (CO<sub>2</sub>/OTEP) é equivalente quer seja um país do 1º, do 2º ou do 3º Mundo, com exceções para Brasil, França e Noruega, pela disponibilidade de energia hidráulica ou nuclear, cuja emissão de CO<sub>2</sub> é muito inferior à dos combustíveis fósseis; e
- ❖ na geração de uma unidade de riqueza (PIB), os países centrais necessitam, pelo menos, cinco vezes menos energia que os BRICS e emitem, pelo menos, seis vezes menos CO<sub>2</sub>, (excluindo-se o Brasil, que possui uma matriz energética com alta participação de fontes renováveis);

A motivação para redução do consumo de energia fóssil pelos países Centrais foi, na maioria dos casos, econômica, mas também estratégica, buscando reduzir a dependência do petróleo. O aspecto ambiental veio como consequência e se tornou um aspecto bastante valorizado pela sociedade nos Países Centrais.

#### **4.1. A ESTRATÉGIA DOS PAÍSES CENTRAIS**

---

As crises do petróleo da década de 70 trouxeram importantes lições aos países Centrais, principalmente do ponto de vista estratégico, pois, em sua maioria, importadores líquidos de energia.

O modelo de desenvolvimento a ser seguido por estes países precisava ser desvinculado das necessidades energéticas e o caminho já havia sido apontado por Bell (1967), nas cinco dimensões da pós-industrialização – direcionar as atividades industriais energo-intensivas para países com abundância de recursos naturais, característica dos países do Terceiro Mundo.

De fato, o crescimento de riqueza apresentado pelos países Centrais no período 1975-2010 está dissociado do aumento do consumo de energia, principalmente da energia destinada à atividade industrial, que se reduz mesmo em valores absolutos, como mostram os gráficos das **Figuras 2.2 e 2.3**. Outro aspecto importante a destacar, é a redução da participação de carvão e petróleo no setor industrial, ampliando a importância do gás natural e da geração termonuclear. Além disso, o uso do petróleo

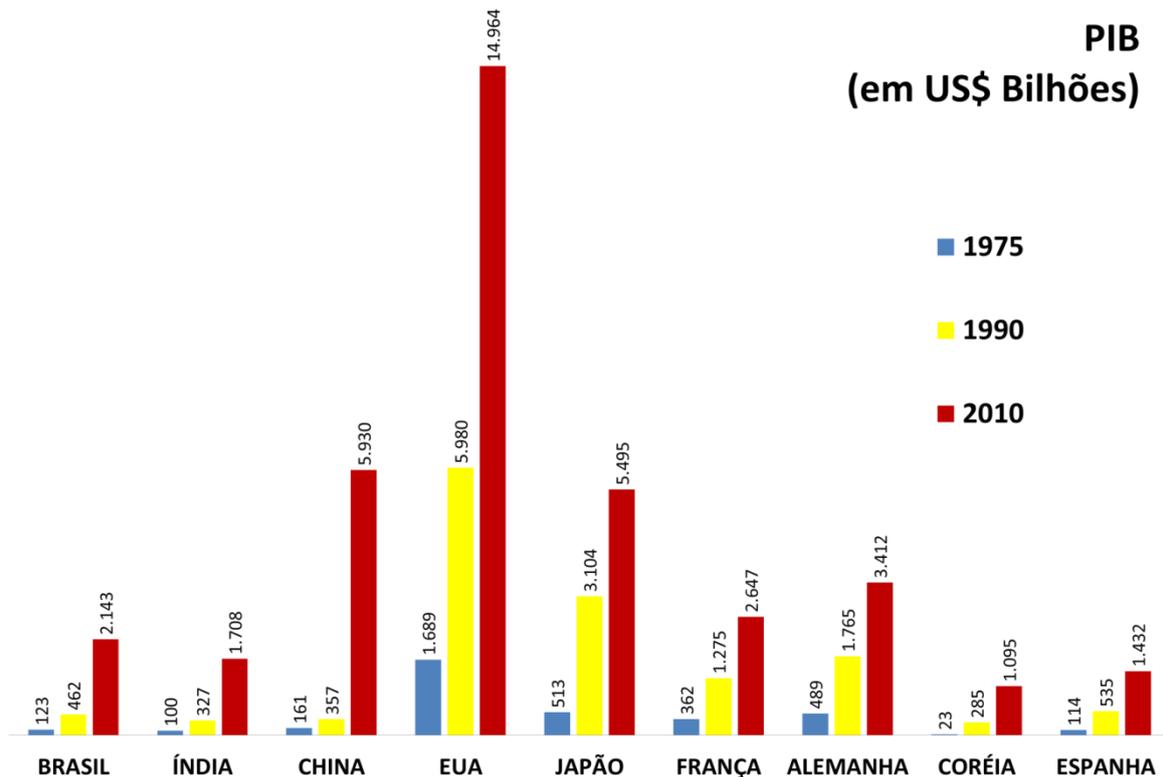
passa a ser majoritariamente direcionado ao setor de transportes.

Na **Figura 2.2** tem-se a evolução do PIB, entre 1975 e 2010, de países Centrais e países em desenvolvimento selecionados. Na **Figura 2.3**, pode ser observado que o consumo de energia no setor industrial permanece em níveis praticamente constantes para os países da OCDE, e até se reduzindo, ao longo desses 35 anos, apesar de o crescimento do PIB ser significativo.

Por outro lado, os países da Periferia apresentam um crescimento explosivo de consumo de energia na indústria, voltada para atender às suas demandas internas de infraestrutura e à produção dos energo-intensivos e bens de consumo demandados pelos mercados dos países Centrais.

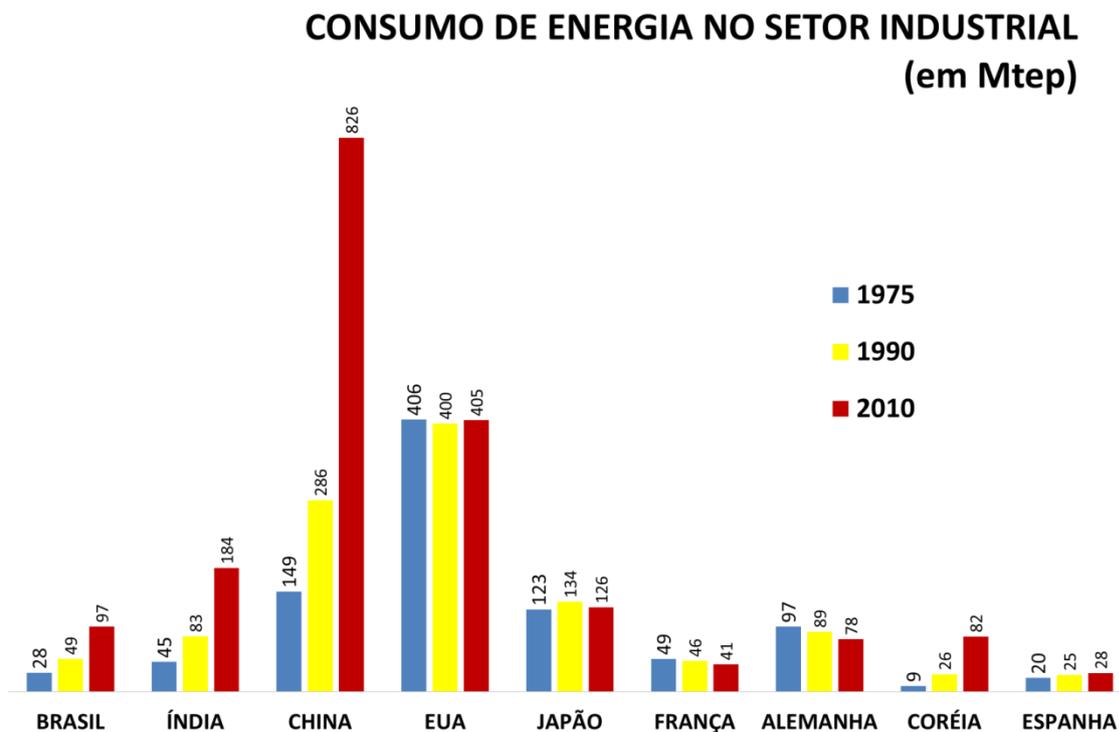
Esta nova matriz dos países Centrais atende aos seus movimentos sociais, que pressionaram crescentemente os governos até que tais atividades fossem controladas ou mesmo banidas de seus territórios.

Embora algumas indústrias ambientalmente controversas tenham sobrevivido nos países Centrais, como a nuclear, as pressões sociais em defesa do meio-ambiente e o desenvolvimento de tecnologias limpas, permitiu que as indústrias desses países diminuíssem consideravelmente suas participações na emissão global de gases de efeito estufa.



Fonte: Elaboração própria a partir de Word Bank, 2015

**Figura 2.2. Evolução do PIB em países selecionados 1975, 1990 e 2010**



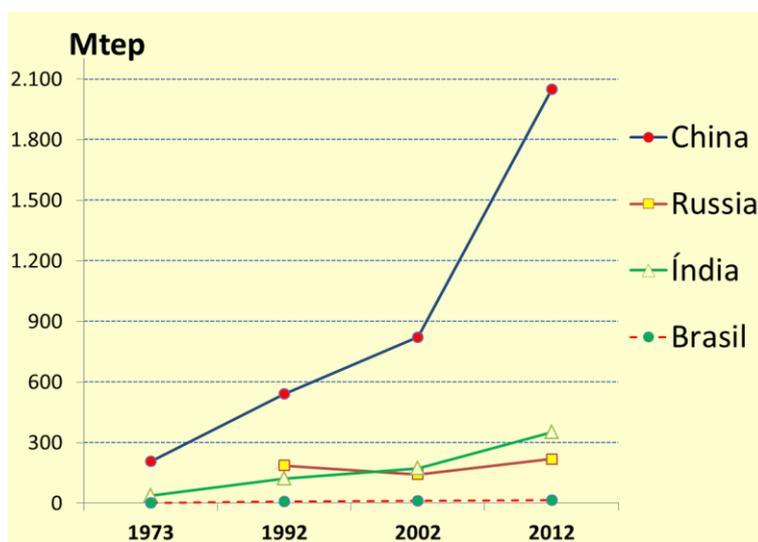
Fonte: Elaboração própria a partir de Word Bank, 2015

**Figura 2.3. Consumo setorial de energia em países selecionados 1975, 1990 e 2010**

## 4.2. O RESCALDO NO TERCEIRO MUNDO

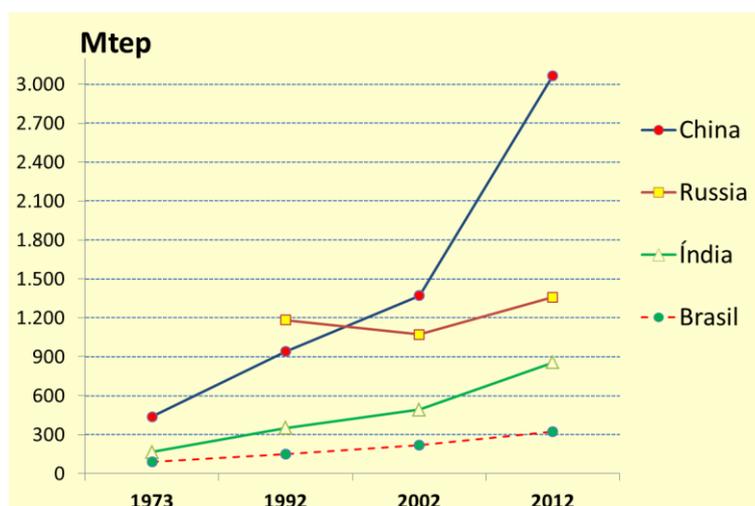
No caso da Periferia, escassa em infraestrutura e abundante em matérias-primas e energia, o fenômeno se inverte. As questões socioambientais são toleradas em nome do crescimento econômico, mesmo que isso não signifique efetivamente “desenvolvimento”. A oferta de energia é estimulada pelas políticas públicas destes países, através de subsídios e renúncias fiscais e tributárias, mesmo em se tratando de energias fósseis, a fim de atrair atividades energo-intensivas “banidas” dos países Centrais, e acaba por promover uma verdadeira guerra fiscal entre os países do Terceiro Mundo. Este cenário foi primeiramente observado nas décadas de 70 e 80 e, agora, se repete, no início deste século.

As **Figuras 2.4 e 2.5** apresentam a evolução, desde a década de 70 até os dias atuais, da oferta de energia primária total e de carvão mineral dos quatro principais países dessa Neoperiferia. O Brasil vem mantendo a matriz energética de melhor perfil, com fontes de baixa emissão e alta participação de renováveis. Índia e China, por outro lado, como já mencionado, apresentam crescimentos explosivos no consumo de combustíveis fósseis, principalmente o carvão, em especial, nos últimos 10 anos.



Fonte: Elaboração própria, a partir de IEA (2014)

**Figura 2.4. BRICS: Evolução da oferta de energia primária - carvão mineral**



Fonte: Elaboração própria, a partir de IEA (2014)

**Figura 2.5. BRICS: Evolução da oferta de energia primária total**

A **Tabela 2.3** apresenta a evolução da geração termofóssil mundial no século XXI, onde se destaca o crescimento de Índia e China, que passaram a produzir mais de 30 % da energia elétrica procedente de combustíveis fósseis. O crescimento desta forma de geração no Brasil, tradicionalmente uma matriz hídrica, deve-se à instalação de diversas usinas térmicas emergenciais após o "apagão" do sistema elétrico, do final de 2001 ao início de 2002. Além disso, a expansão da geração hidroelétrica passou a ser feita com usinas do tipo "fio d'água", levando também a mais investimentos em termoelétricas.

**Tabela 2.3. Evolução da geração termofóssil de energia elétrica (TWh)**

	2000	2006	2011	2011/ 2000	2011/ 2006	2011/ 2000 a.a.	2011/ 2006 a.a.
Brasil	28	39	57	99%	46%	8,2%	7,7%
Rússia	544	621	668	23%	8%	1,9%	1,3%
Índia	439	573	786	79%	37%	6,6%	6,2%
China	1.041	2.225	3.607	246%	62%	20,5%	10,4%
África do Sul	182	223	229	26%	3%	2,2%	0,4%
<b>BRICS</b>	<b>2.235</b>	<b>3.682</b>	<b>5.346</b>	<b>139%</b>	<b>45%</b>	<b>11,6%</b>	<b>7,5%</b>
Mundo - BRICS	7.090	8.261	8.837	25%	7%	2,1%	1,2%
BRICS - In - Ch	755	883	954	26%	8%	2,2%	1,3%
Mundo - In - Ch	7.845	9.145	9.791	25%	7%	2,1%	1,2%
In + Ch	1.480	2.799	4.393	197%	57%	16,4%	9,5%
<b>Mundo</b>	<b>9.325</b>	<b>11.943</b>	<b>14.184</b>	<b>52%</b>	<b>19%</b>	<b>4,3%</b>	<b>3,1%</b>

Fonte: Elaboração própria com base em Energy Information Administration - EIA, 2013

Neste cenário global, a Índia e a China são os dois principais responsáveis pelo crescimento vigoroso da economia, do consumo de recursos naturais e das emissões de gases de efeito estufa, com destaque para a China, que foi objeto de comentários de Celso Furtado, ainda na década de 1980, conforme a seguir.

### **4.3. O CASO CHINÊS**

---

*"O primeiro contato com a China será sempre uma experiência desnorteante para nós, ocidentais. Particularmente para quem se interessa pelo que os homens construíram e destruíram na ânsia de fazer esse mundo que aí está"* (Furtado, [1980], 2014 p. 613).

O primeiro olhar de Celso Furtado para o "gigante adormecido" ainda não poderia captar as transformações econômicas e culturais que estavam a caminho.

A política de Mao consistiu em assegurar trabalho a uma imensa população rural, com uma organização social onde os camponeses assumiam a própria subsistência. O econômico, o social e o cultural são enfocados conjuntamente num sistema de autogoverno comunal (Furtado [1980], 2014 p. 615).

E segue colocando que essa autossuficiência (contar com as próprias forças) foi uma maneira de *"estimular a plena utilização da capacidade de trabalho da massa camponesa e de desestimular o uso da renda monetária dos camponeses na cidade, onde a oferta de bens manufaturados era escassa"* (Furtado [1980], 2014 p. 615).

Bem diferente do que assistimos nos dias de hoje. Àquela época, a China permanecia numa redoma adiabática, sem necessitar trocas com o mundo "exterior". O nível tecnológico era modesto, para os padrões da OCDE, mas tudo podia ser produzido localmente. A defasagem tecnológica tinha como contrapartida o uso da mão-de-obra na sua plenitude, de inegável alcance social, com esferas próprias para o econômico e o social:

*"A experiência religiosa teve nesse país seu elemento principal no culto aos mortos, servindo essencialmente para unificar a família e não para consolidar o poder político. Confúcio (500 a. C.) expressa isso muito bem quando procura instilar na organização da sociedade os mesmos princípios em que se funda a família: hierarquia, conservadorismo, cooperação"* (Furtado [1980], 2014 p. 614).

Celso Furtado retorna à China em 1983 e observa que o novo "princípio unificador" passou a ser o "atraso". Os chineses não se imaginavam subdesenvolvidos ou dependentes, mas só atrasados. Tudo o que lhes faltava era a modernização!

Faz parte da mística chinesa eles se considerarem culturalmente o "Centro do Mundo", o "Império do Meio", além de uma suposta posição de "única superpotência econômica, política, tecnológica, social e cultural do planeta". A China sempre foi um sistema cultural que extraía das próprias raízes o fundamental e agora pensam o país como um entre outros, numa civilização planetária, onde a sua pouca expressão é devida ao atraso tecnológico.

Essa percepção de Celso Furtado já nos primeiros movimentos da "modernização chinesa" podem ser, trinta anos depois, consideradas atuais. *"Se existe um princípio unificador, este é o da consciência da especificidade cultural chinesa"* (Furtado [1980], 2014 p. 618).

Segundo Maluf (2009), a raiz comum entre desenvolvimento e modernidade evidencia-se nas promessas de rupturas e profundas transformações que ambas as noções carregam, a primeira (desenvolvimento) constituindo-se numa das materializações possíveis da segunda (modernidade), com a ideia de progresso conferindo um sentido positivo a ambas. O conhecido enunciado de Marx sobre o advento da sociedade burguesa moderna, *"tudo o que é sólido desmancha no ar"* (retomado por Marshall Berman, 1986), traz um conceito sobre a vida moderna, onde diz que seus processos são radicalmente contraditórios na sua base, pois as forças industriais e científicas são acompanhadas de sintomas de decadência. Nesses termos, as estratégias de desenvolvimento vivenciadas pelos países constituem processos de modernização.

As reformas introduzidas a partir da morte de Mao, em 1976, foram lideradas por Deng XiaoPing, que abriu a economia, mas manteve o regime totalitário, controlando efetivamente as decisões por meio da forte intervenção do Estado, sem democracia, como ainda é. Foram realizadas inúmeras "privatizações", ao final dos anos 1980, permitindo a entrada controlada de capital estrangeiro, e criadas Zonas Econômicas Especiais, ZEE. A partir da criação dessas, vieram o crescimento brutal do fluxo de capitais, do investimento direto estrangeiro (IDE ou FDI), do superávit comercial, da industrialização e da importância da China no comércio mundial, como vem ocorrendo há 25 anos.

Nos aspectos jurídicos, Lisboa (2010) entende que o desenvolvimento da China é motivo de controvérsias, pois lá o direito é entendido como característica de uma sociedade imperfeita. Apesar da Constituição, as leis são consideradas formas secundárias das normas reguladoras da vida. Na China, há a supremacia do interesse coletivo sobre o individual: os deveres estão acima dos direitos. Os direitos humanos são violados na China, devido a este paradoxo. O nível de importância dado pelo governo chinês ao crescimento econômico contrasta com o constante desrespeito dos direitos humanos, apesar de estarem assegurados pela sua própria Constituição. Infelizmente, o desrespeito é tolerado mesmo pelas democracias que mantêm relações comerciais com a China.

No entanto, esse modelo financeiramente tão bem-sucedido, ainda carrega questões estruturais graves, como as referentes ao meio-ambiente, aos direitos trabalhistas, ao direito de patentes, aos direitos civis, à exploração do trabalho infantil, à corrupção e à democracia.

#### **4.4. NEM TUDO DEU ERRADO**

---

As exceções ao fracasso generalizado do Terceiro Mundo em aproveitar amplamente o ciclo de investimentos nas suas economias ficam para Coreia e Espanha, que foram “industrializados”, nos anos 70-80, segundo a mesma estratégia de transferência energia-intensiva para o Terceiro Mundo, e hoje fazem parte da OCDE. Muitos desses setores industriais passaram a fazer seus planos de expansão na América Latina, nos Tigres Asiáticos (que na época eram Gatos Asiáticos) ou países europeus recentemente democratizados e atraídos para a CEE.

Pelo menos Coreia de Sul e Espanha souberam aproveitar a oportunidade, tendo consequências bastante diversas dos demais: apesar de terem ampliado suas atividades industriais energia-intensivas e apesar de não possuírem as características de abundância em recursos naturais e energia, tinham como atrativo as localizações, próximas do Japão e da CEE, respectivamente. A estratégia desses dois países foi fortalecer os investimentos em ciência, tecnologia e inovação e trouxeram resultados que mudaram o perfil socioeconômico destas nações, situando-as, hoje, como sociedades industrialmente maduras.

No caso coreano, suas firmas estabeleceram uma relação de complementaridade com as japonesas nos anos 1980, até que em 1985, com a

supervalorização do iene em relação ao dólar americano (50 %) e o rápido aprendizado tecnológico das firmas coreanas, foram criadas inúmeras oportunidades no mercado internacional de eletrônicos e automóveis, consolidando marcas como Samsung e Hyundai no mercado global (Canuto, 1994).

A Coréia do Sul absorveu, também, grandes investimentos no setor metal-mecânico, em grandes conglomerados industriais (os *chaebols*) que, posteriormente, assumiriam também as principais instituições financeiras do país, num processo semelhante aos dos *keiretsus*, no Japão.

Segundo a análise de Young e Lustosa (2001), países como o Brasil conferiram a continuidade do modelo prebischiano, portanto não é surpresa que o crescimento industrial tenha se concentrado em setores com maiores emissões por unidade de produto:

*“A motivação inicial do processo de ISI (Industrialização por Substituição de Importações) era baseada na percepção de que o crescimento de uma economia periférica não poderia ser apenas sustentado em produtos diretamente baseados em recursos naturais (extração mineral, agricultura, ou outras formas de aproveitamento de vantagens comparativas absolutas definidas a partir da dotação de recursos naturais). Contudo, embora o Brasil tenha avançado na consolidação de uma base industrial diversificada, esse avanço esteve calcado no uso indireto de recursos naturais (energia e matérias-primas baratas), ao invés de expandir-se por meio do incremento na capacidade de gerar ou absorver progresso técnico – chave para o crescimento sustentado, mas que ficou limitado a algumas áreas de excelência. Essa concentração em atividades intensivas em emissão aumentou ainda mais a partir da consolidação dos investimentos do II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND), que resultou em forte expansão de indústrias de grande potencial poluidor – especialmente dos complexos metalúrgico e químico/petroquímico – sem o devido acompanhamento de tratamento dessas emissões” (Young e Lustosa, 2001, p. 234-235).*

#### **4.5. CRESCIMENTO OU DESENVOLVIMENTO?**

---

Uma questão importante a ser abordada é saber como diferenciar o crecimento econômico; da renda das famílias; e do consumo, do desenvolvimento econômico; da qualidade de vida; do grau de escolaridade; da segurança pública; da saúde pública; da mobilidade urbana; cultural; e socioambiental.

O senso comum é confundir o crescimento do PIB com desenvolvimento econômico. Os mercados financeiros e as instituições de crédito resumem toda a sociedade ao resultado que seus indivíduos trouxeram para o aumento da renda. E essa visão é difundida pelas mídias e pelos gestores públicos.

O conceito de desenvolvimento, como usado e implementado em todo o mundo desde o fim da Segunda Guerra Mundial, como uma medida da produção material do setor industrial, hoje em dia, é totalmente ligado à narrativa do crescimento e apoiado por instituições internacionais cujo único objetivo parece ser a defesa dos interesses dos mercados e/ou das instituições financeiras (Cuvillier, 2015). A situação dos chamados países em desenvolvimento, e de todo o mundo, na verdade, exige uma preocupação mais precisa para os aspectos ambientais e humanos, caso aspirem um "desenvolvimento sustentável".

Cuvillier (2015) contesta o significado de desenvolvimento, tal como é entendido até agora e apresenta propostas do decrescimento como alternativas para um verdadeiro desenvolvimento, ecológica e socialmente sustentáveis. São necessárias novas instituições, ou reestruturação dos já existentes, para permitir o movimento do decrescimento e implementar ações voltadas para o desenvolvimento com base na participação das sociedades locais.

Segundo Gilding (2011) manter uma população 40 vezes superior ao início da Revolução Industrial, só será possível com o fim do crescimento econômico como o conhecemos. O crescimento baseado na expansão do consumo de bens materiais está no seu capítulo final. Não há mais como pretender que a economia mundial continue a crescer.

Lara Resende (2012) discutiu o crescimento e colocou que sem ele não há como digerir o excesso de endividamento que, então, paralisava as economias dos países mais avançados. O crescimento das economias periféricas, liderado pela China, é a esperança de que o excesso de endividamento das economias centrais possa ser

digerido, mas, segundo Lara Resende, o crescimento recente da China tem todas as características de mais uma bolha. A parada súbita da economia chinesa seria desastrosa para uma saída harmoniosa do impasse em que a economia mundial se encontra.

As economias modernas passam por crises cíclicas, sempre ameaçadas pela insuficiência de demanda, mas não há mais como contar com o crescimento da demanda de bens materiais para crescer. O crescimento pode não ser mais a opção de saída para a crise (Gilding, 2011).

Como alerta Lara Resende, em momento nenhum, entretanto, essa possibilidade é examinada no desenho das alternativas. O limite físico do ecossistema pode ter sido atingido, ou estar muito próximo, mas o mecanismo psicológico de autoengano, de negação dos fatos, segue inabalável. O fim do crescimento exige uma nova abordagem para a superação de uma crise que, tudo indica, será longa. Infelizmente, não há ainda nem sinal de que esta nova abordagem esteja em gestação.

Segundo Padilha (2006), na sociedade de consumo, as estratégias publicitárias e a obsolescência planejada mantêm os consumidores presos em uma espécie de armadilha silenciosa, num modelo de crescimento econômico pautado na aceleração do ciclo de acumulação do capital (produção-consumo-mais produção). Trata-se de uma sociedade descartável, que não deseja bens duráveis e reutilizáveis (Mészáros, 1989), tendo a publicidade como instrumento central de suas escolhas, que a convence da "necessidade" do supérfluo, e que Bauman (2008) chama de "economia do engano".

Para Latouche (2009), a publicidade induz o desejo do que não temos e o desprezo do que já usamos, criando e recriando a insatisfação e a tensão do desejo frustrado.

A publicidade mantém acesa a chama do consumo e da taxa decrescente do valor de uso dos bens e mercadorias, fazendo dos consumidores vítimas de uma armadilha invisível. O consumo é considerado o motor do crescimento econômico – entendido como algo sempre bom e necessário – baseado num paradigma produtivista-consumista.

O movimento do decrescimento econômico, que tem no economista francês Serge Latouche um dos principais expoentes, entende que o PIB não pode mais continuar sendo visto como uma taxa que deva sempre crescer. Um crescimento infinito num planeta é finito. Para ele, a expressão "decrescimento" busca enfatizar o abandono

ao crescimento ilimitado, que traz consequências desastrosas para o meio ambiente e para a raça humana (Latouche, 2009).

Segundo este movimento do decrescimento econômico, a nova lógica a ser construída é alcançar a felicidade a partir de menos trabalho e menos consumo. Não faz sentido falar em desenvolvimento sustentável – que seria mais um *slogan* capitalista - sem falar em preservação da natureza, em mais presença e menos presente, em mais laços humanos e em menos bens de consumo. A produção de tecnologias verdes ou programas de reciclagem não resolvem essa gama de problemas que se sustentam nos pilares da obsolescência planejada.

## **5. A NEOPERIFERIA**

---

O ciclo de desenvolvimento do novo grupo de países da Periferia, os BRICS' e seus satélites, caminha para reproduzir os erros cometidos pelo Terceiro Mundo e apontados pela teoria desenvolvimentista *cepalina*. Aspectos oriundos do debate sobre desenvolvimento sustentável, como equidade e preservação ambiental, exigências maiores para os processos de transformação produtiva e o uso de fontes e tecnologias menos poluidoras precisariam ser equacionados por estes países.

Ainda permanecem válidas, para o cenário atual destes neoperiféricos, as conclusões de Young e Lustosa, em 2003. A revalidação da análise Centro-Periferia exige a inclusão de elementos socioambientais, culturais e institucionais, visto que o objetivo fundamental não é meramente o crescimento econômico, mas o desenvolvimento sustentável.

Essa reconfiguração não pode ser baseada na dicotomia matérias-primas *versus* produtos manufaturados, mas sim na capacidade endógena de desenvolvimento tecnológico. Isso significa que certos fatores não devem ser aceitos como determinantes da competitividade dos BRICS, como as abundâncias de recursos naturais e de mão-de-obra desqualificada e barata. Não se pode cair, de novo, na armadilha de confundir crescimento econômico com desenvolvimento autêntico: o primeiro é condição necessária, mas não suficiente para o último.

A recente industrialização de Índia e China seguiu o padrão da Revolução Industrial de 100 anos atrás, no mesmo caminho perverso do ponto de vista sócio-energético-ambiental, apesar do grande sucesso econômico-financeiro-comercial.

Segundo Sachs (2009), muitos ainda creem nas virtudes do mimetismo e pensam que os países do Terceiro Mundo poderão reproduzir a transição da economia rural, com predominância agrária, para a economia urbana, com predominância industrial, seguindo a trajetória da Europa Ocidental de hoje. Como se as condições não tivessem mudado. A partir da segunda metade do século XIX, milhões de camponeses europeus atravessaram o Atlântico para se estabelecer nas Américas. O autor, então, duvidava que existisse quem aceitasse os fluxos decuplicados de refugiados dos campos asiáticos, africanos e latino-americanos. Hoje, em 2015, assistimos às massas de refugiados africanos e asiáticos rumo aos Países Centrais sendo rechaçadas, confirmando a posição do autor.

O termo mimetismo, da biologia, usado por Sachs simboliza com propriedade a relação descrita entre o Centro e a Nova Periferia. O mimetismo ocorre quando uma espécie adquire características que evoluíram especificamente para se assemelhar com as características de outra espécie, numa evolução convergente. Essa semelhança confere vantagens, tais como proteção contra predação, para os organismos mimetizados (a Periferia) ou mesmo para os miméticos (o Centro). A Nova Periferia mimetizada interage diretamente com o mimético do Centro e é iludida por sua similaridade.

Sachs (2009) ainda questiona a modernidade *"das florestas de arranha-céus erigidos a preço exorbitante e à custa do desenvolvimento rural em Shangai e em várias metrópoles dos países emergentes, mediante proezas técnicas tão espetaculares como inúteis"*. E faz um paralelo com as torres de San Gimignano, na Toscana, que os nobres construíram na Idade Média. Seu único objetivo era mostrar que podiam se permitir essa despesa, perfeitamente inútil, ao oferecerem uma torre mais alta que as vizinhas.

Finalmente, como sintetizado por Adolfo Gurrieri sobre a relação Centro-Periferia, *"a satisfação das necessidades do Centro é o princípio ordenador do sistema global e isso influi decisivamente no modo como a Periferia se desenvolve e no papel que cumprem"* (apud Prebisch, 2011 p. 19).

O papel assumido pelo comércio exterior, a penetração nas atividades econômicas locais, o envolvimento da população, o volume e a forma de participação dos investimentos diretos estrangeiros (IDE), a tecnologia adotada, a oferta e a demanda dos mercados internos são dirigidos por esse princípio ordenador do sistema global.

Isso era válido para a Periferia latino-americana de Prebisch e não se deve ter a ilusão de estar acontecendo de outra forma com a Neoperiferia. Cometem-se os mesmos erros e esperam-se resultados diferentes.

## **6. CONCLUSÃO DA PARTE I**

---

Nesta primeira parte, foram destacadas as especificidades do desenvolvimento na ótica dos países Centrais e dos países do Terceiro Mundo. A percepção *cepalina* da relação Centro-Periferia encontra diversos elementos comuns com a onda de crescimento liderada pelos BRICS.

Os países Centrais reduzem a dependência ao petróleo (o carro elétrico transfere do petróleo para o carvão, via eletricidade, a fonte principal de energia do setor de transportes) e maximizam o aproveitamento de tecnologias limpas e de fontes renováveis, investindo cada vez mais no conhecimento e na inovação. Por outro lado, o crescimento acelerado do uso de combustíveis fósseis, notadamente o carvão mineral, abundante e principal recurso energético de Índia e China, não será capaz de fazer frente aos esforços mundiais de redução de emissão de gases de efeito estufa.

O modelo ocidental de consumo que foi "exportado" para as economias asiáticas vem, além de criar uma numerosa população de novos consumidores locais, abastecendo os mercados dos países Centrais com bens e produtos intermediários, bem como retribuindo financeiramente os investidores e empresas do Primeiro Mundo. Ou, nas palavras de Gurrieri (apud Prebisch, 2011), ordenando o sistema global e determinando o papel do Terceiro Mundo.

O enriquecimento dessas economias neoperiféricas não sepulta questões ambientais negligenciadas, focos de trabalho escravo e trabalho infantil, aumento da desigualdade social, frágil proteção aos direitos intelectuais, práticas comerciais questionáveis, elevados índices de corrupção, insipientes instituições democráticas, que são alguns pontos associados ao desenvolvimento a serem firmemente atacados, paralelamente ao ciclo de crescimento vertiginoso.

A estratégia de transferência energo-intensiva para a Periferia funcionou de forma eficiente no caso brasileiro, mas – como o Brasil se apropriou desse movimento? quais os desdobramentos destes ciclos de investimentos em *commodities* para a economia e para a população brasileira?

Estes resultados ainda não podem ser claramente percebidos ou podem ter caráter efêmero, mas surgem algumas respostas para as questões de Prebisch sobre o papel da Periferia na relação com o Centro, mas agora com novo elenco de países, que podem vir a constituir uma Neoperiferia.

- Onde crescer? Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul;
- Para quem crescer? para atender aos países centrais;
- Por que crescer? para se industrializar e atender à demanda dos países centrais;
- Como crescer? investindo em infraestrutura, insumos básicos, recursos naturais e bens de baixo conteúdo tecnológico e/ou baixo valor agregado.

Esse quadro reforça a importância de políticas públicas para que os países em desenvolvimento possam se apropriar estruturalmente dos investimentos no conhecimento, seja tecnológico, científico ou ambiental, e proporcionar o retorno adequado à sociedade, como abordado a seguir.

## **PARTE II: POLÍTICA TECNOLÓGICA E POLÍTICA AMBIENTAL**

### **1. A HERANÇA EVOLUCIONISTA**

---

Há relativo consenso na literatura evolucionista de que políticas intervencionistas setoriais são tanto mais necessárias quanto maior o atraso econômico de um país (Dosi, 1982; Lundvall, 1992 [apud Garcez, 2000]). Nestas condições é possível estabelecer, com maior facilidade, as atividades prioritárias a serem implementadas nos países menos desenvolvidos, a partir de um referencial relativamente preciso dos paradigmas tecnológicos dominantes nos diferentes setores, que servem como um guia para a ação pública.

Segundo Rodríguez (2009), as situações de atraso vigentes nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento se caracterizam pela ausência de elos centrais na estrutura produtiva e institucional, que requerem uma ação estruturante e indutiva do Estado. Uma condição para o sucesso nessa empreitada é a redefinição dos modelos das relações público-privada, com mercados regulados por um Estado desenvolvimentista enxuto, porém atuante e capaz de proteger a sociedade das “falhas do mercado” [Sachs, (1993, 2007)].

Como norma geral, as ações focalizadas em atividades ou indústrias selecionadas se justificam, tanto nos casos dos países avançados quanto nos casos dos em desenvolvimento ou subdesenvolvidos (Gadelha, 2001). Neste sentido, as políticas seletivas setoriais se tornam necessárias quando possuem um impacto sistêmico na estrutura econômica, elevando (ou preservando) o nível das oportunidades tecnológicas existentes, sem o que dificilmente seria possível justificar a intervenção pública em atividades muito particulares e que apresentam alto risco de insucesso.

#### **1.1. POLÍTICAS INTERVENCIONISTAS**

---

A taxa e a direção de avanço tecnológico são influenciadas pelo mercado e pelos incentivos regulatórios e podem ter sua rentabilidade fortalecida através de políticas com base no incentivo econômico, tanto como sugerido pela teoria quanto nas evidências empíricas. Na ausência de políticas fortes, os investimentos no desenvolvimento e na difusão de novas tecnologias tendem a ser menores do que seria desejável pela sociedade (Jaffe, 2004).

Como afirma Guellec (2010), a busca da inovação traz um risco inaceitável

para os investidores privados. A lógica é que um fracasso num projeto pode ser compensado por um sucesso neste mesmo projeto, mas não pode ser compensado pelo sucesso de projetos futuros, por causa do desaparecimento da empresa. O investidor externo estará sempre sujeito à assimetria de informação, pois não sabe como estimar o valor do projeto inovador e, portanto, estará susceptível a receber dados errados ou insuficientes, ou não captura o real valor de projetos bem-sucedidos.

Os investimentos em inovação são particularmente arriscados. O custo é muitas vezes incerto e levanta a questão: "Quanto tempo a pesquisa vai levar?" Além disso, mesmo o conhecimento do mercado não prevê como reagirão os novos consumidores e como será a difusão da inovação.

O horizonte de tempo de pesquisa é muitas vezes longo (em média, um fármaco leva 10 anos para ser disponibilizado para o mercado). E o período entre a invenção e a difusão, que é o período entre a concretização da descoberta e o marketing, é um salto no escuro. A probabilidade de sucesso técnico de um projeto é estimada entre 52 % e 68 %, mas o sucesso comercial vai apenas de 8 % a 29 % (Jaffe, 2004).

A influência do desenvolvimento tecnológico nos setores de energia e meio ambiente permeia as discussões de política energética e ambiental em todo o mundo. Pensava-se que a solução dos problemas ambientais seria creditada às novas tecnologias, diminuindo localmente o total das emissões ou as emissões por unidade de produto. No entanto, essas mesmas tecnologias foram execradas e consideradas como fontes de aumento da poluição, uma vez que, no longo prazo, o aumento das emissões globais acompanharam a par e passo o contínuo aumento da produção.

Assim, para modelar problemas ambientais de longo prazo, como as mudanças climáticas, os efeitos das mudanças tecnológicas devem ser amplos e percebidos em horizontes também de longo prazo. Para o investidor privado, esse longo prazo significa risco elevado e indesejado.

O progresso técnico não se propaga no vácuo. Intervenções através de políticas ambientais, como limite de emissão de carbono, créditos de carbono ("*cap and trade*") e taxação de emissões, são instrumentos que podem definir como as novas tecnologias serão desenvolvidas e quão rapidamente e profundamente vão se difundir.

No entanto, a visão neoclássica, de que o processo de mudança tecnológica é caracterizado apenas por imperfeições do mercado, distorce a análise da política

tecnológica e da política ambiental, aumentando a probabilidade de que essas medidas, em vez de dirigidas à redução de emissões por si só, possam oferecer uma resposta mais completa para os problemas ambientais, que tem ainda origens econômicas, sociais, geográficas e políticas.

## **1.2. As Visões NEOCLÁSSICA E EVOLUCIONISTA**

---

Essas e outras questões, que afetam tanto a política tecnológica, quanto a política ambiental, podem ser analisadas segundo duas correntes das políticas derivadas do pensamento schumpeteriano: neoclássica e evolucionista.

Pode-se dizer que a maior diferença entre a corrente neoclássica e a evolucionista está relacionada à heterogeneidade, incerteza e dependência da trajetória a ser seguida, que é elaborada de maneira mais sofisticada e explícita nos modelos evolucionistas. Todavia, todos esses detalhamentos nem sempre estão claramente expostos, resultando na assimetria de informações (Mulder, 2001).

Nelson e Winter (1974; 1982) apontam que a força dos neoclássicos, atribuída à sua simplicidade, é uma ilusão, pois o equilíbrio estático proposto por eles não existe numa economia em constante movimento, na qual os cenários e variáveis mudam permanentemente. Dosi e Nelson (1994), numa reflexão simples e objetiva, relatam que a corrente neoclássica se aplica a situações nas quais os atores envolvidos são todos conhecidos, racionais e passíveis de medição, enquanto que a linha evolucionista é uma resposta a situações em que essa previsibilidade está ausente.

Essa discussão está sempre presente na formulação de políticas públicas, delineando qual papel cabe ao Estado, qual cabe ao setor privado e qual o retorno para a sociedade.

## **2. FALHAS DE MERCADO**

---

Na visão neoclássica, se o mercado não entregar os resultados que a comunidade considera desejável, caracteriza-se uma falha de mercado e há, potencialmente, espaço para intervenção pública.

As falhas de mercado associadas à poluição ambiental interagem com as falhas de mercado associadas à inovação e difusão de novas tecnologias e, combinadas, fornecem robustos argumentos para uma carteira de políticas públicas que promovam a redução das emissões, bem como o desenvolvimento e adoção de tecnologias

ambientalmente corretas (Jaffe, 2004).

As principais falhas de mercado apontadas por Giambiagi e Além (2008) seriam: externalidades; assimetria de informações; mercados incompletos; e custo das transações elevado.

#### ***a) Externalidades***

---

As externalidades acontecem quando os indivíduos ou firmas realizam suas ações levando em conta somente os benefícios e custos privados, o que remete ao pouco caso atribuído aos custos e benefícios sociais. Podem ser positivas ou negativas.

#### ***b) Assimetria de informações***

---

Os modelos de mercados competitivos se apoiam no pressuposto de que há perfeita informação. Conforme esse pressuposto, ofertantes e demandantes detêm perfeito acesso às informações necessárias para suas tomadas de decisões (preços, processos de produção, ...).

#### ***c) Mercados Incompletos (Incertezas)***

---

Quando um bem ou serviço não é ofertado em determinado mercado, mesmo que seu custo de produção seja menor que o preço ofertado pelos consumidores desejosos desse bem ou serviço, esse mercado é dito incompleto. Em contraposição a este conceito, existem os mercados ditos completos, capazes de ofertar todo e qualquer bem ou serviço que os consumidores desejarem, com custo de provisão abaixo daquilo que as pessoas estejam dispostas a pagar.

A existência dessa falha dá-se pelo fato de que, mesmo em se tratando de atividades de mercado, o setor privado pode não estar desejoso de assumir determinados riscos. Principalmente, no que diz respeito a países em desenvolvimento, na existência de um sistema financeiro e/ou de um mercado de capitais pouco desenvolvidos, que não forneçam o financiamento a longo prazo necessário ao esforço de desenvolvimento. Nesse caso, a intervenção do governo é importante para a concessão do crédito de longo prazo que financie os investimentos no setor produtivo. No Brasil, destacam-se os bancos públicos, como o BNDES.

Ainda em relação a países em desenvolvimento, conforme Giambiagi e Além (2008), também há casos em que a coordenação dos mercados se faz necessária, tendo a figura do Estado como planejador. Em determinadas situações, bancos, empresas e

demais agentes envolvidos nas atividades produtivas precisam estar em sintonia e isso exige uma estreita relação entre esses atores. Caso isso não ocorra, a presença do Estado é necessária para defender os interesses da sociedade e coordenar essas ações.

#### ***d) Custo das transações elevado***

---

Os custos de transação representam o dispêndio de recursos econômicos para planejar, adaptar e monitorar as interações entre os agentes, garantindo que o cumprimento dos termos contratuais se faça de maneira satisfatória para as partes envolvidas e compatível com a sua funcionalidade econômica.

Assim, a grande maioria das questões relativas à inovação, à tecnologia e ao meio ambiente precisa contar com a participação do Estado.

### **2.1. AMPLIANDO O RETORNO SOCIAL DA INTERVENÇÃO PÚBLICA**

---

As políticas públicas devem ter por objetivo facilitar a circulação do conhecimento, dando incentivos para os inventores divulgarem suas descobertas (patentes), para a construção de infraestrutura para este movimento (revistas, fóruns) e para promover a transferência de conhecimentos da inovação do setor público para o setor privado (Guellec, 2010).

O fluxo de informação tecnológica, que é o vetor de externalidades do conhecimento, não é um dado puramente técnico, fora do sistema econômico, que será imposto a todos os agentes (Cohendet, 1998). Isso depende do ambiente institucional em que se desenvolve e do comportamento dos agentes (Amable, 1997). A assimetria de informações limita o poder do Estado, pois nunca sabe bem a situação, se não estiver diretamente envolvido no projeto.

A intervenção do Estado no domínio da investigação não se limita a falhas do mercado. O Estado também é um grande consumidor de tecnologia, principalmente nos setores de defesa, saúde, meio ambiente ou de outras necessidades sociais (Caracostas e Muldur, 1998).

É muitas vezes difícil separar as necessidades do mercado das necessidades do Estado, devido à versatilidade e à transversalidade de algumas inovações: uma tecnologia desenvolvida para aviões militares, e, por conseguinte, paga pelo Estado, pode ser utilizada na aviação civil. (Guellec, 2010).

## **2.2. A "MÃO INVISÍVEL" E AS EXTERNALIDADES: TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE**

---

A poluição é uma externalidade e o poluidor colhe os benefícios derivados de poluir, impondo os custos da poluição sobre a sociedade. Por isso, o poluidor não para é incentivado a reduzir esses custos.

No caso da tecnologia, a situação é inversa. Uma empresa que implementa ou investe em uma nova tecnologia, normalmente cria benefícios para outros, enquanto incorre com todos os custos. Por conseguinte, a empresa não é incentivada a aumentar esses benefícios e investir em tecnologia (Jaffe, 2004).

→ Ambas as situações são falhas de mercado. Como a poluição cria uma externalidade negativa, a "mão invisível" age generosamente. Em contraposição, a tecnologia e a inovação criam externalidades positivas e, por isso, a "mão invisível" atua como óbice.

A externalidade positiva da inovação vem da natureza de bem público que possui o saber, a ciência, o conhecimento. A inovação cria externalidades positivas na forma de "*spillovers* de conhecimento" para as empresas e de "*spillovers* de valor" para os usuários da nova tecnologia.

No tratamento das externalidades, a teoria evolucionista é mais adequada à complexidade contemporânea, o que, necessariamente, envolve a sociedade, e os benefícios e os inconvenientes tecnológicos e ambientais de suas atividades. A natureza da visão neoclássica, quanto à tecnologia e ao meio ambiente, é focada na empresa e no que ocorre dentro dos seus muros.

Como já apresentado, o fundamento da política ambiental se baseia na ideia de que as consequências potencialmente nocivas das atividades econômicas sobre o meio-ambiente constituem uma "externalidade", um efeito economicamente significativo para uma atividade, cujas consequências serão sentidas pela sociedade ou por um grupamento social que não controla essa atividade econômica nem tampouco suas externalidades.

Por exemplo, a mesma fábrica que gera empregos, produz bens, paga impostos e remunera seus acionistas, também pode poluir o ar, a água, a terra ou trazer impactos para a saúde dos moradores da região onde se localiza o empreendimento. Isso impõe um custo à sociedade que não é percebido dentro do sistema produtivo daquela fábrica. Trata-se de uma "externalidade negativa".

Um veículo numa grande e congestionada área metropolitana está proporcionando maior velocidade e conforto (nem sempre...) para o deslocamento de seus ocupantes, gerando uma externalidade positiva para eles, enquanto as emissões de gases de efeito estufa, referentes aos combustíveis fósseis que impulsionam o veículo, geram uma externalidade negativa.

Segundo Jaffe (2004), as políticas ambientais tentam neutralizar esse desequilíbrio, aumentando o incentivo para que uma determinada atividade minimize essas externalidades negativas. As escolhas políticas para conseguir isso podem ser pela:

- internalização dos custos ambientais, onde os poluidores tomam suas próprias decisões quanto a pagar pelo seu consumo de "insumos ambientais"; ou
- pela imposição de um limite para o nível de poluição ambiental gerada.

No curto prazo, o raciocínio é que a criação de uma política ambiental eficiente requer uma comparação do custo marginal de redução da poluição com o benefício marginal de um ambiente mais limpo. No entanto, o retorno social de qualquer política ambiental, tecnológica, energética ou industrial deve ser o principal fator a ser considerado.

### **2.3. RETORNOS CRESCENTES DINÂMICOS**

---

As externalidades ambientais e do conhecimento, acima discutidas, há muito tempo estiveram no centro dos debates econômicos sobre política tecnológica. Mais recentemente, começam a ser percebidas algumas outras falhas de mercado que podem agir na adoção e difusão de novas tecnologias.

Por uma série de razões, o custo ou valor de uma nova tecnologia para um usuário depende de quantos outros usuários adotam a tecnologia. Em geral, quanto mais pessoas usam a mesma tecnologia, melhor será para um usuário. Este benefício associado à escala global de adoção de tecnologia, tem sido por vezes referido como **retornos crescentes dinâmicos**, que podem ocorrer através de mecanismos identificados como *learning-by-using*, *learning-by-doing* ou **redes de externalidades**.

A ideia de que os consumidores batem na porta do inovador bem-sucedido para adquirir a sua mais nova realização não reflete a realidade. A difusão de uma nova tecnologia é gradual, já que é preciso tempo para que os potenciais usuários aprendam a

nova tecnologia, a experimentem, adaptem-na às suas condições e, finalmente, se convençam de sua superioridade.

Um mecanismo importante neste processo de aprendizagem é a observação da adoção da nova tecnologia por outros. O usuário de uma nova tecnologia cria uma externalidade positiva para os outros, através da geração de informações sobre sua existência, suas características e o desempenho da nova tecnologia. Esse mecanismo é, muitas vezes, chamado de *learning-by-using*.

Pelo lado da oferta, em contrapartida, o *learning-by-doing* descreve como os custos de produção tendem a cair à medida que os fabricantes ganham experiência de produção. Se acontecer o "spillover" desse conhecimento e outros fabricantes se beneficiarem disso, sem que haja compensação, significa a geração de uma externalidade negativa adicional.

Por fim, a existência de **externalidades de rede**, que ocorre quando um produto se torna tecnologicamente mais valioso para um usuário individual à medida que outros usuários adotam um produto compatível (como com redes de telefonia e informática).

Estes fenômenos auxiliam na compreensão do sistema tecnológico existente, prevendo como esse sistema pode evoluir, de modo a predizer o potencial efeito de alguma política ou evento.

## **2.4. INCERTEZA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

---

Segundo Jaffe (2004), a inovação e a difusão de novas tecnologias caracterizam-se por falhas adicionais de mercado relacionadas a informações incompletas e, como em qualquer investimento, são caracterizadas pela incerteza. Os investimentos em inovação possuem uma incerteza associada particularmente grande.

Além disso, informações sobre a perspectiva de sucesso no desenvolvimento de uma tecnologia são assimétricas, no sentido que aquele que está desenvolvendo a tecnologia está em melhor posição para avaliar o seu potencial do que aquele que está investindo e que está de fora.

Uma empresa tentando levantar capital e atrair investidores para financiar o desenvolvimento de novas tecnologias, vai, portanto, encontrar investidores céticos sobre os retornos prometidos e, geralmente, susceptíveis a exigir um prêmio compatível

com os riscos do investimento.

Nesse contexto, as enormes incertezas que cercam os impactos da mudança climática, a magnitude da reação política a essas mudanças e os desejados retornos do investimento em P&D, agravam este problema (Jaffe et Stavins, 1994).

Como já mencionado anteriormente, a mudança tecnológica, em relação ao meio ambiente, ocorre no nexo de duas distintas e importantes falhas de mercado: a poluição representa uma externalidade negativa; e a nova tecnologia gera externalidades positivas.

Assim, na ausência de políticas públicas, uma nova tecnologia para a redução das emissões é, a partir de uma perspectiva analítica, duplamente desprovida de mercados. Isso sugere que a eficácia da política ambiental depende de suas consequências para o progresso técnico. Como um dragão querendo morder a própria cauda.

### **3. AÇÃO DO ESTADO - INTERVENÇÃO PÚBLICA: JUSTIFICATIVAS E LIMITES**

---

A missão do Estado, no quadro acima, é garantir que o investimento em pesquisa terá o retorno social adequado, maior do que o nível atingido no equilíbrio esperado do retorno exclusivamente privado. O Estado tem três principais linhas de ação para esse fim (Guellec, 2010):

- criar ou investir em um sistema público de inovação;
- incentivar as empresas a investirem, aumentando o retorno privado através de subvenções e benefícios fiscais;
- limitar as imperfeições do mercado (política de concorrência, leis de patentes, regulação dos mercados financeiros).

#### **3.1. SISTEMA PÚBLICO DE INOVAÇÃO: INFRAESTRUTURA PÚBLICA DE PESQUISA**

---

Sem resultados econômicos imediatos, a pesquisa não consegue encontrar financiamento privado. Isso se aplica a áreas inteiras das ciências humanas (filosofia, antropologia, teoria econômica...) e às áreas das ciências duras (como astronomia e matemática), mas também em pesquisa básica, mesmo das demais ciências. Se o Estado não fizer, quem o fará? Essas áreas compreendem setores que desenvolveram muita

pesquisa básica até o século XIX e, após as guerras mundiais, passaram a constituir sistemas públicos de pesquisa fundamental, como o CNRS – *Centre National de la Recherche Scientifique*, fundado em 1939, na França, e o NSF - *National Science Foundation*, fundado em 1950, nos EUA.

Guellec (2010) relata que a II Guerra Mundial mostrou a importância da tecnologia para a guerra, o que levou os Estados a investirem pesadamente nisso. O sistema público de inovação também teve como objetivo atender às necessidades coletivas de um custo demasiado elevado para os investidores privados, como a energia nuclear.

Uma dificuldade adicional para traçar a linha entre o que o Estado e o que as empresas devem fazer é eliminar a distinção entre a pesquisa básica (ciência) e pesquisa aplicada (tecnologia). Descobertas fundamentais no campo da genética ou matemática podem resultar, em apenas alguns anos, em produtos altamente rentáveis, como vacinas ou softwares (Guellec, 2010). A discrepância maior é quantificar o que o Estado e o que os investidores privados entendem como "alguns anos".

## **3.2. AUMENTO DO RETORNO PRIVADO**

---

Steinmueller (2010) apresenta alguns modelos de políticas tecnológicas para inovação, com atuação diversificada e efeitos integrados, das quais podem ser destacadas duas categorias, uma voltada para a oferta de novas tecnologias e, outra, para a demanda dessas novas tecnologias, incentivando as empresas a investirem.

### **3.2.1. Pelo Lado da Oferta**

---

As políticas que incentivam a oferta de novas tecnologias baseiam-se, em grande medida, na concepção do fluxo linear da inovação, ou seja, partem da constatação de que estímulos contínuos à pesquisa e ao desenvolvimento científico tendem a aumentar as inovações do sistema (*technology push*). Deste modo, ao incentivar o aumento das atividades científicas, essas políticas pretendem aumentar o ritmo e a direção da mudança tecnológica (Steinmueller, 2010). Destacam-se aqui três tipos:

- i. políticas tecnológicas horizontais;
- ii. estratégias de sinalização das incertezas; e

- iii. instrumentos financeiros temáticos.

#### **i) Políticas Tecnológicas Horizontais**

As políticas tecnológicas horizontais são consideradas de implementação relativamente simples e têm potencial para atingir grande número de atores. Normalmente, seu objetivo é incentivar o aumento de gastos em P&D das empresas e, desta forma, aumentar a produtividade global da economia. Nesse sentido, os **incentivos fiscais** são importantes mecanismos, como créditos tributários e subsídios, por exemplo, e englobam, mas não se restringem a.

- ❖ **créditos fiscais** - o Estado pode subvencionar as pesquisas nas empresas através de financiamento com créditos fiscais das empresas, com a justificativa de que os benefícios sociais da inovação vão compensar o custo fiscal da operação. O estado busca, com esse mecanismo, reduzir o custo da pesquisa para a empresa, de modo a aumentar o rendimento privado.
- ❖ **empréstimos a fundo perdido** - o Estado pode fornecer, a empresas inovadoras, empréstimos em condições favoráveis. Estes empréstimos, ditos "a fundo perdido", são reembolsáveis apenas em caso de sucesso do projeto.
- ❖ **políticas focadas** - Steinmueller (2010) chama a atenção para o escopo dessas políticas, alertando sobre a possibilidade de comportamentos oportunistas de empresas em políticas de grande abrangência. O benefício da redução de alíquotas de imposto sobre gastos com inovação poderia ser obtido por empresas cujas atividades correntes já fossem consideradas como atividades de P&D, o que não levaria, portanto, ao aumento dos gastos em P&D. Sugere, assim, que políticas tecnológicas focadas poderiam obter maior sucesso.

Guellec e Van Pottelsberghe (2001) fazem duas críticas a esses programas:

- o Estado substitui, em parte, o mercado na seleção de tecnologias; e
- os administradores públicos que escolhem os "vencedores" não têm, necessariamente, a informação relevante para essa escolha.

Nos casos em que as empresas são subsidiadas pelo Estado em projetos que seriam feitos de outra forma pela empresa, o efeito de alavanca fiscal se anula.

O Estado também pode subsidiar indiretamente empresas, reduzindo de seu imposto uma parcela dos gastos em pesquisa. No sistema francês, por exemplo, as

empresas podem excluir até 50 % de sua renda a partir da diferença entre a pesquisa que eles fizeram no ano em curso e a média dos dois anos anteriores. O objetivo do crédito fiscal para pesquisa é reduzir, "ex post", os custos de pesquisa para as empresas e, assim, incentivá-las a conseguir mais do que iriam fazer espontaneamente (Guellec, 2010).

## **ii) Incertezas: Estratégias de Sinalização**

Como apresentado por Steinmueller (2010), as estratégias de sinalização objetivam influenciar as expectativas tecnológicas dos tomadores de decisão privados, diminuindo as assimetrias de informação que, eventualmente, existam no ambiente de negócios. Segundo o autor, em um contexto no qual a informação é assimétrica e a incerteza é significativa, deve ser considerado o apoio a projetos de demonstração.

Assim, ao gerar parâmetros técnicos e econômicos em escala que represente confiabilidade, uma planta de demonstração de E2G, operacionalmente ativa, poderia ter o efeito de sinalizar informações para os agentes interessados em investir nesta nova tecnologia.

De fato, a maior parte das políticas públicas para a inovação acaba gerando algum tipo de sinalização. Programas com temas bem definidos e que estimulem a competição, por exemplo, podem funcionar como mecanismo de sinalização, visto que deixam claro quais são as prioridades e as visões de longo prazo do país.

## **iii) Instrumentos Financeiros - Financiamento temático**

Outro tipo de política tecnológica importante e amplamente usada pelos EUA é o financiamento temático. Como definido por Steinmueller (2010), esse termo é abrangente e pode contemplar diversos programas, sendo o modelo dominante entre as políticas tecnológicas voltadas à oferta. A característica principal desse tipo de política é a predefinição de temas, para os quais os candidatos elegíveis são convidados a submeter propostas de programas de P&D. Segundo esse autor, a principal vantagem desse tipo de política tecnológica é o foco, que pode levar em conta aspectos setoriais, regionais, sociais e tecnológicos.

Nos EUA, vários Departamentos (equivalentes a Ministérios, no Brasil) elaboram e conduzem programas de financiamento temático. Entre eles, destacam-se o Departamento de Energia (DOE), o Departamento de Defesa (DOD) e o Departamento de Agricultura (USDA). Apesar de existir alguma redundância entre os programas

desses Departamentos, a complementaridade é o aspecto que melhor define a relação entre eles.

#### Financiamento à Inovação

A questão de como financiar a inovação é a chave. Por seus riscos e incertezas, as fontes de financiamento habitualmente não estão na forma de empréstimos ou dívidas. No caso da inovação, os empréstimos têm uma assimetria em relação ao risco: o credor tem muito a perder e pouco a ganhar.

Estudos empíricos comprovam que as inovações são geralmente autofinanciadas, ou seja, na maioria dos casos, os recursos aplicados pelas empresas têm retorno financeiro (Himmelberg e Petersen, 1994).

No entanto, nem os bancos privados, nem o mercado de títulos, nem o mercado de ações consideram o investimento em inovação um risco razoável a ser corrido. Só os fundos de capital de risco ou os mercados financeiros especializados aceitam participar destes fundos de tecnologia, que foram inicialmente criados no Massachusetts Institute of Technology - MIT, nos EUA, no pós-guerra (Rabeharisoa, 1992). A Nasdaq é um "*spillover*" desses fundos.

#### Políticas de apoio indireto às empresas inovadoras

Os novos negócios baseados em tecnologia, *startups*, são particularmente visados. Permitir a renovação da base industrial e manter a pressão competitiva sobre as grandes empresas ajuda a impulsionar a inovação (Guellec, 2010).

Os pequenos e novos têm menos acesso aos mercados de capitais e a recursos privados e públicos. A abordagem tradicional dos governos é fornecer ajuda direta à inovação, sendo reembolsável se bem-sucedido.

No entanto, a política pode incentivar a criação e o desenvolvimento dos mercados financeiros, especialmente adequados para as novas empresas inovadoras, onde elas podem captar recursos. Os exemplos de referência global são a Nasdaq, nos EUA, e do Nouveau Marché, na França.

O tratamento fiscal de "*stock options*" é um contrato entre a empresa e os empregados, que dá aos empregados uma opção de compra sobre as ações da empresa em determinada data e por um preço fixo. As opções de ações têm a vantagem, para as pequenas empresas, de permitir oferecer remunerações potencialmente mais altas para pesquisadores e gestores de alto nível. Além disso, esses contratos estabelecem fortes

incentivos para os empregados, sabendo que sua remuneração depende, em grande parte, dos resultados (Guellec, 2010).

### **3.2.2. Pelo Lado da Demanda**

---

Como argumentado por Steinmueller (2010), o processo da difusão tecnológica não é necessariamente automático. Pelo contrário, é comum haver alguma resistência por parte de possíveis usuários no processo de adoção da tecnologia. Como resultado, torna-se lento o ritmo da difusão da inovação.

Além disso, a aceitação da inovação pelo mercado pode não ser imediata, visto que o custo e/ou preço do produto ou serviço podem ser temporariamente superiores ao custo/preço de tecnologias substitutas que já existem. Mesmo havendo aumento correspondente da qualidade do produto ou serviço, esse pode não ser adotado devido a distorções na percepção e/ou diferenças de valorização individual pelos eventuais usuários.

Essa situação pode ocorrer com o etanol celulósico, uma vez que este combustível tem maior potencial para redução dos impactos ambientais em comparação com os combustíveis tradicionais existentes. A difusão tecnológica do etanol celulósico precisa ocorrer em dois níveis indissociáveis. No primeiro nível, os produtores de etanol incorporam as novas tecnologias em seus processos produtivos. No segundo nível, é necessário que os usuários finais de combustíveis consumam o etanol 2G. Nesse caso, pode haver um custo significativo de mudança associado à incerteza e ao risco advindos de assimetrias de informações ao mercado (Dias et al., 2012; Luo et al., 2009a,b apud Milanez, 2015).

O setor energético possui uma série de características que necessitam ser levadas em consideração, destacando-se:

- ❖ **MERCADO REGULADO:** o cliente não possui escolha. Mesmo em países com tradição econômica de pouca interferência de mercado, como os EUA, existem regras rígidas sobre as características do produto, definindo quem pode produzir, em que circunstâncias, quem pode distribuir etc.
- ❖ **INTERVENÇÕES DOS GOVERNOS:** as intervenções no mercado de energia por parte dos governos vêm sendo constantes e muitas vezes perniciosas. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2013) estima que os subsídios governamentais aos combustíveis fósseis aumentaram de US\$ 311 bilhões, em 2009, para US\$ 544

bilhões, em 2012.

Novas tecnologias no setor energético, normalmente, competem com tecnologias já bem estabelecidas, com custos baixos e ampla base instalada, de maneira que o maior problema a ser enfrentado pelas inovações no setor é o de atingir a escala necessária. No setor de energia, é necessário que se leve em conta o suprimento de tecnologia, mas também a criação de demanda para este tipo de tecnologia e elementos organizacionais que sejam propriamente alinhados para ligar os dois (Peters et al., 2012; Weiss; Bonvillian, 2009; Ye; Paulson; Khanna, 2014 apud Milanez, 2015).

No caso do E2G, pode-se considerar que o processo de difusão das tecnologias de produção ainda nem começou. De propriedade de empresas que também desenvolvem as tecnologias de produção, as plantas pioneiras de E2G começaram a produzir seus primeiros litros de etanol em 2014. Ainda que conhecidas, as etapas físicas, químicas e biológicas da produção, devem sofrer alterações e evoluções na passagem para a escala industrial. Há um longo processo de aprendizagem a ser percorrido, durante o qual deverão ser superados substanciais riscos e incertezas para que a difusão ocorra satisfatoriamente (Milanez, 2015).

Se, por um lado, há problemas observados no processo de difusão tecnológica, por outro, há razões para acreditar que o aumento do ritmo da difusão tecnológica deverá ser benéfico socialmente. Dentre elas, destacam-se:

- a própria aprendizagem, que tende a levar a reduções consistentes de custos e, portanto, a aumentos do bem-estar social; e
- o aumento da produtividade para seus usuários ou para outras partes da economia, o que pode acelerar o crescimento econômico e também o bem-estar social.

No caso do E2G, há também a dimensão ambiental a ser fortemente considerada. O produto apresenta impactos ambientais expressivamente menores, principalmente quando comparado aos seus substitutos de origem fóssil ou mesmo outros biocombustíveis (Dias et al., 2012; Luo et al., 2009a,b apud Milanez, 2015).

Assim, a difusão da produção e do uso do E2G representaria passo importante na luta contra as mudanças climáticas e outras categorias de impacto ambientais relevantes, como o uso da terra e de recursos fósseis.

### Subsídios à Adoção de Novas Tecnologias

A oferta de subsídios a eventuais usuários de uma nova tecnologia é um dos instrumentos mais conhecidos e utilizados pelos formuladores de políticas públicas. Segundo Steinmueller (2010), a oferta de subsídios à adoção de tecnologia é equivalente à redução do preço do bem ou do serviço a ser adotado, o que levaria ao aumento do consumo.

Gretz et al. (2010 apud Pereira, 2013) enxergam papéis distintos e complementares das políticas de incentivos tributários e de subvenção no fomento à inovação. Segundo os autores, enquanto o primeiro tipo de política deve ser usado para aumentar os investimentos em P&D, os *subsídios* devem ser usados para diversificar a composição de P&D realizado pelas empresas.

### Mandatos de Uso ou Mistura Obrigatória

No que tange especificamente aos biocombustíveis, os mandatos que obrigam seu uso são empregados por diversos países. Esse instrumento estimula a demanda ao mesmo tempo em que reduz as incertezas de mercado. De fato, a lógica nesse tipo de medida é a formação de um mercado que, com o tempo, tende a se consolidar e se expandir, o que acelera a curva de aprendizado das empresas e contribui para a difusão mais rápida dessas novas tecnologias.

### O Proálcool "Made in USA"

Nos EUA, em 2005, por meio do *Energy Policy Act*, foi criado o *Renewable Fuel Standard* (RFS), um dos principais programas federais de apoio aos biocombustíveis em geral e, mais recentemente, aos celulósicos. Gerido pela Agência de Proteção Ambiental (EPA), o RFS tem como objetivo garantir um consumo mínimo de combustíveis renováveis. Em 2007, foi expandido por meio do *Energy Independence and Security Act*, dando origem ao RFS2.

No RFS2, os combustíveis renováveis devem ser inseridos em quantidades crescentes a cada ano, chegando a 136 bilhões de litros em 2022. Como ilustração, esse valor representaria em torno de 25 % do consumo americano de gasolina, atualmente, em torno de 500 bilhões de litros por ano. Também ficou determinado que deveriam ser consumidos não apenas biocombustíveis convencionais, como o etanol de milho, mas também biocombustíveis avançados, como os celulósicos e o diesel de biomassa. Essa classificação de biocombustíveis é definida por meio de critérios de redução de emissões de gases de efeito estufa.

O RFS2 considera que biocombustíveis celulósicos são aqueles derivados de qualquer material celulósico, hemicelulósico ou de lignina que, por sua vez, sejam derivados de biomassa renovável e que reduzam as emissões de gases de efeito estufa em, pelo menos, 60 % quando comparados aos substitutos fósseis. Em 2022, deverão ser consumidos 60 bilhões de litros de biocombustíveis celulósicos nos EUA, cerca de 12 % do total de gasolina consumida atualmente.

Limitação das imperfeições dos mercados

### **Encomendas públicas**

O Estado é um grande promotor e grande cliente da ciência e da tecnologia. No setor aeroespacial, nas atividades de defesa, nas questões ambientais e como um produtor de bens e serviços (como energia e telecomunicações, p.ex.). Algumas dessas atividades de P&D são atendidas por laboratórios públicos, mas outra parte é encomendada às empresas privadas, que trabalham em seus laboratórios com recursos do setor público (Guellec, 2010).

Por que o Estado faz essa terceirização da pesquisa, ao invés de fazê-lo sozinho? Uma razão é a existência de habilidades específicas em uma determinada empresa, o que pode ser mais eficiente para atender certas necessidades públicas. Além disso, pode permitir que a concorrência entre as empresas reduza os custos. Por fim, os contratos públicos podem ser usados como uma alavanca da política tecnológica.

Este tipo de instrumento tem, no entanto, dois perigos para a política de tecnologia:

- ❖ o favorecimento grandes empresas em detrimento das micro, pequenas e médias empresas (grandes empresas têm acesso mais fácil aos principais doadores de ordem pública); e
- ❖ a influência do Estado na gestão dos "parceiros", pois os requisitos de contratos públicos, como no setor de defesa, são muito diferentes daqueles em mercados competitivos.

### **Cooperação em Pesquisa**

O Estado pode permitir ou até mesmo incentivar as empresas a trabalhar em conjunto em projetos de pesquisa de interesse comum, de forma a internalizar suas externalidades. As empresas encontram muitas vantagens neste tipo de operação, pois reduzem o custo da pesquisa; podem beneficiar das competências específicas dos seus

parceiros; e podem reduzir o risco através da partilha com os outros.

Segundo Guellec (2010), a cooperação é recomendada apenas nas fases a montante (investigação pré-competitiva) para impedir a criação de um monopólio coletivo, que inclui impor preços mais elevados.

### **Patentes**

A patente é um direito da propriedade intelectual de uma invenção. O titular de concessão de patente tem o monopólio sobre a invenção, durante um período limitado, definido de acordo com cada país.

O inventor pode usar a invenção ou vender licenças a outras empresas. Acontece que, em muitos casos, a invenção não é usada, ou porque não tem nenhum valor, ou porque seu único uso é evitar que concorrentes tenham acesso à tecnologia. Guellec (2010) estima que 50 % das patentes não levam à aplicação industrial.

A patente é necessariamente uma solução imperfeita. Na verdade, promove simultaneamente a inovação e a disseminação do conhecimento. A inovação é estimulada pelo monopólio, mas isso é contrário à transmissão do conhecimento.

A tendência geral, desde o início dos anos 1980, é um reforço significativo do sistema de patentes em todos os países. É esta tendência benéfica? É claro, em qualquer caso.

## **4. CONCLUSÃO DA PARTE II**

---

As assimetrias tecnológicas agem, ao mesmo tempo, como uma barreira ao acesso dos imitadores às novas tecnologias e como um novo incentivo à inovação para aqueles (empresas, organizações ou países) que estão liderando o processo tecnológico. O hiato temporal entre inovadores e imitadores está diretamente relacionado à sustentação do fluxo de inovações pelos inovadores e à fragilidade das condições necessárias para inovar nos países imitadores.

Por contraditório que possa parecer, a distância entre o saber detido pelos países inovadores e o saber dos países imitadores assegura a supremacia daqueles que controlam o andamento das transformações, mesmo quando o crescimento da economia está favorável aos imitadores. Se o crescimento econômico não transborda para a sociedade e para o conhecimento, as bases para o desenvolvimento socioambiental estruturado e sustentável serão frágeis ou efêmeras.

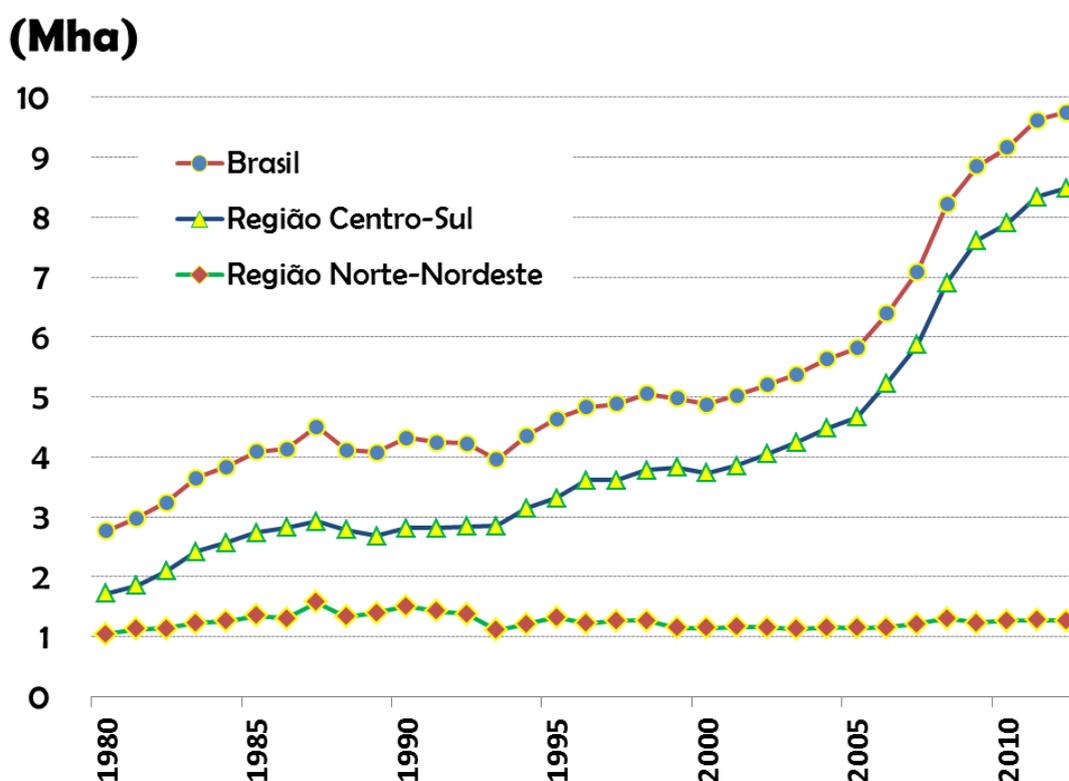
As intervenções do governo brasileiro, através do Proálcool, a partir de 1975, foram decisivas para que esse programa e essa política sejam considerados, até hoje, como o que obteve melhores resultados no setor de combustíveis em todo o mundo. Naquela época os focos eram a balança de pagamentos brasileira e a vulnerabilidade energética ao petróleo, mas os investimentos para desenvolvimento dos motores a álcool e para o aumento da produtividade agrícola e industrial da cana foram muito bem-sucedidos. Apesar de o setor ter passado por período de dificuldades nos anos 1990, a retomada do crescimento da produção foi realizada com recursos do setor privado no início dos anos 2000. Não foram necessárias novas intervenções, pois a tecnologia agrícola e industrial já havia encontrado seu próprio caminho, estruturada pelo Proálcool.

No caso americano, o RSF e o RSF2 visando reduzir a dependência do petróleo e melhorar as condições ambientais, com menores emissões veiculares, introduziram o mandado de 10 % de mistura de etanol na gasolina. Os resultados da política estão sendo atingidos e a resposta da indústria americana foi extremamente rápida. O desafio atual é a meta de adicionar um percentual de etanol celulósico à gasolina.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 1. PANORAMA SETORIAL

Após o encerramento do Proálcool, em 1987, o setor sucroalcooleiro permaneceu se expandindo, mas essa expansão foi, principalmente, em função da já tradicional produção de açúcar, que estimulou o crescimento da área plantada de cana, independentemente da situação do mercado de etanol, especialmente na região Centro-Sul do Brasil (**Figura 3.1**).



Fonte: Conab, 2014

**Figura 3.1. Evolução da área plantada de cana no Brasil**

Apesar de os preços do petróleo terem permanecido abaixo dos US\$ 20 por barril nesse período, o que poderia reduzir o preço da gasolina no Brasil e dificultar ainda mais a colocação do etanol nas bombas, a conjuntura internacional e a balança comercial brasileira mantiveram o preço dos combustíveis em níveis elevados no mercado interno.

Entretanto, a partir de 1998, a produção de etanol hidratado foi abruptamente reduzida. Em apenas três safras, passou de 10 bilhões para 5 bilhões de litros, em 2001 (ver Figura 1.7). Paralelamente, a produção de carros a álcool foi praticamente encerrada e a frota foi se reduzindo. A indústria sucroalcooleira se direcionou para a produção de açúcar, cujos preços estavam em alta, e de etanol anidro, cujo percentual de adição na gasolina foi ampliado para reduzir as dificuldades conjunturais.

## **1.1. ETANOL ANIDRO E ETANOL HIDRATADO**

---

O etanol hidratado é produto obtido diretamente das colunas de destilação das usinas processadoras da cana. O etanol anidro, por sua vez, é produzido a partir do etanol hidratado, processado por desidratação, a fim de retirar a maior parte da água. Deste modo, o teor de água, que no etanol hidratado chega a cerca de 5 %, em volume, no etanol anidro situa-se em torno de 0,5 %, em volume.

Além dessa diferença de especificações, cabem explicitar os seguintes aspectos de mercado, a partir de uma análise simplificada, que considera este mercado dividido em duas parcelas: uma parcela "fixa", referente ao etanol anidro, que é adicionado compulsoriamente à gasolina automotiva (gasolina A), e uma parcela "variável", referente ao etanol hidratado, que é comercializado nos postos de combustíveis e está sujeito à concorrência da gasolina.

O preço do etanol anidro, bem como a quantidade a ser adicionada à gasolina são definidos pelo Governo Federal. Por outro lado, o teto para o preço do etanol hidratado na bomba é estabelecido pelo preço da gasolina, uma vez que o poder calorífico do etanol equivale a cerca de 70 % do poder calorífico da gasolina e, conseqüentemente, o consumo de um veículo "flex", usando etanol, tende a ser desfavorável em relação à gasolina.

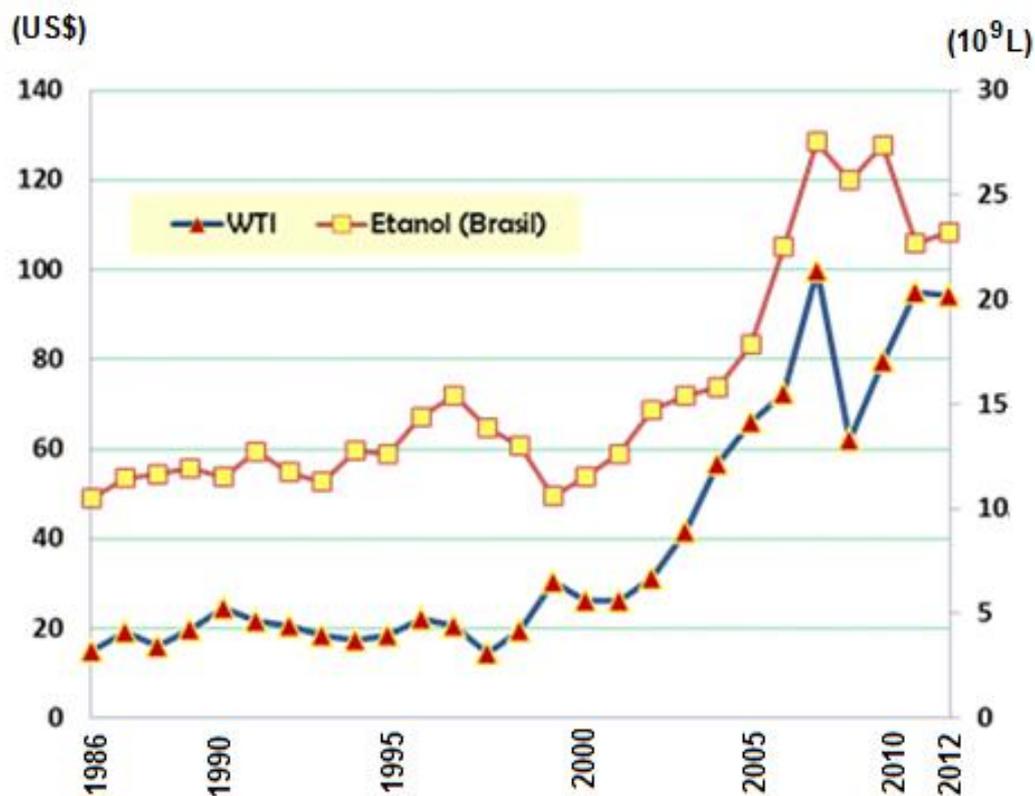
- Essa questão evidencia a fragilidade da oferta de etanol, que depende mais de preços da gasolina (controlados pelo Governo Federal) e dos preços do açúcar (uma *commodity* comercializada mundialmente), que de sua competitividade intrínseca, ponto central nessa tese.

## **1.2. PREÇO DA ENERGIA**

---

Observa-se na **Figura 3.2** que os preços da energia começaram a subir a partir de 2002, puxados pelo crescimento chinês e pelo preço do petróleo, o que elevou os

preços dos combustíveis e, por consequência, do etanol (USEIA, 2013 e Conab, 2014). Isso realimentou os investimentos no setor sucroalcooleiro, aumentando a produção.



Fontes: USEIA, 2014 e Conab, 2014

**Figura 3.2. Evolução do preço do barril de petróleo (WTI/FOB) e da produção de etanol no Brasil**

Uma característica interessante deste período, até 2009, foi a mudança do perfil dos investidores, com a entrada de grandes grupos empresariais. Além disso, algumas usinas ensaiaram a modernização de suas plantas, adquirindo caldeiras mais eficientes e vendendo o excedente de energia elétrica para a rede. Mas o setor ainda era composto, quase que totalmente, por grupos familiares (usineiros). Um histórico mais completo vem mais a seguir.

A partir de 2006, três fatos atraíram novos interessados para o setor:

- ❖ tecnologia de motores "flex" – a consolidação de uma frota de veículos que poderia optar pelo etanol ou pela gasolina reabriu o mercado do etanol hidratado, criado pelo Proálcool e agonizante desde a virada do século;

- ❖ leilões de energia da cogeração para o Proinfa<sup>17</sup> (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) – os contratos de compra e venda de energia por 20 anos pela Eletrobrás reduziram os riscos dos investimentos; e
- ❖ legislação americana de biocombustíveis – a obrigatoriedade de adição de etanol à gasolina nos EUA dá vantagens ao etanol brasileiro, pela melhor pegada de carbono, em comparação com o etanol de milho americano, e favorece a exportação para os EUA.

Assim, a expansão do setor a partir de 2005/2006 aconteceu com a participação efetiva de fundos de investimento e de *tradings*, em um modelo de usina que buscava eficiência energética nos processos e incorporava um terceiro produto ao açúcar e ao etanol: a bioeletricidade. Muitas dessas unidades eram "destilarias autônomas", ou seja, não produziam açúcar.

Num segundo momento, empresas de petróleo, como Shell (Raízen) e Petrobrás, também entraram pesadamente no setor, buscando etanol e bioeletricidade já planejando alcoodutos para o escoamento da produção. Paralelamente, ocorreu um movimento de consolidação, com os principais grupos econômicos adquirindo usinas de grupos menores, grandes grupos formando *joint-ventures*, como a Raízen (Cosan e Shell), ou a entrada de empresas, como Brasken e da Odebrecht (ETH) no setor de etanol.

### **1.3. HISTÓRICO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL**

---

O aproveitamento da cana se inicia logo após o descobrimento do Brasil, em 1502, com a construção dos "engenhos de açúcar" (que deram origem ao termo "senhores de engenho") e de seus "alambiques anexos", que faziam aguardente de cana. Muitos desses alambiques é que deram início à produção de álcool comercial e, mais recentemente, no século 20, de álcool combustível. O emprego sistemático do etanol, como combustível, teve origem ainda antes da Segunda Guerra Mundial.

---

<sup>17</sup> O Proinfa foi instituído pela Lei nº 10.438, de 2002, com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por fontes alternativas. O Programa previa a instalação de 3.300 MW de capacidade, a serem incorporados ao Sistema Elétrico Integrado Nacional (SIN), sendo 1.100 MW de fontes eólicas, 1.100 MW de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 1.100 MW de biomassa (cogeração). A energia produzida seria adquirida pela Eletrobrás, com contratos para 20 anos de fornecimento. O prazo para o início de funcionamento desses empreendimentos se encerraria em 30 de dezembro de 2010. Até 31 de dezembro de 2011, foram implantados 119 empreendimentos, (41 eólicas, 59 PCHs e 19 térmicas a biomassa) totalizando uma capacidade instalada de 2.650 MW, compreendendo 964 MW em usinas eólicas, 1.153 MW em PCHs e 533 MW em plantas de biomassa (Eletrobrás, 2014).

Ao longo desses anos, a indústria passou por alguns ciclos de desenvolvimento característicos, todos conduzidos por políticas públicas que vieram a formatar o modelo de negócios atual<sup>18</sup>, conforme a seguir.

- 1921 a 1925 – DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA PARA O "ÁLCOOL COMBUSTÍVEL" – no início dos anos 1920, o Instituto Nacional de Tecnologia, então uma unidade ligada ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio denominada "Estação Experimental de Combustíveis e Minérios", desenvolve os princípios tecnológicos para o uso do etanol como combustível automotivo, chegando à etapa piloto, com um veículo percorrendo o trecho Rio-São Paulo, em 1925 (**Figura 3.3**).



Fonte: Acervo INT

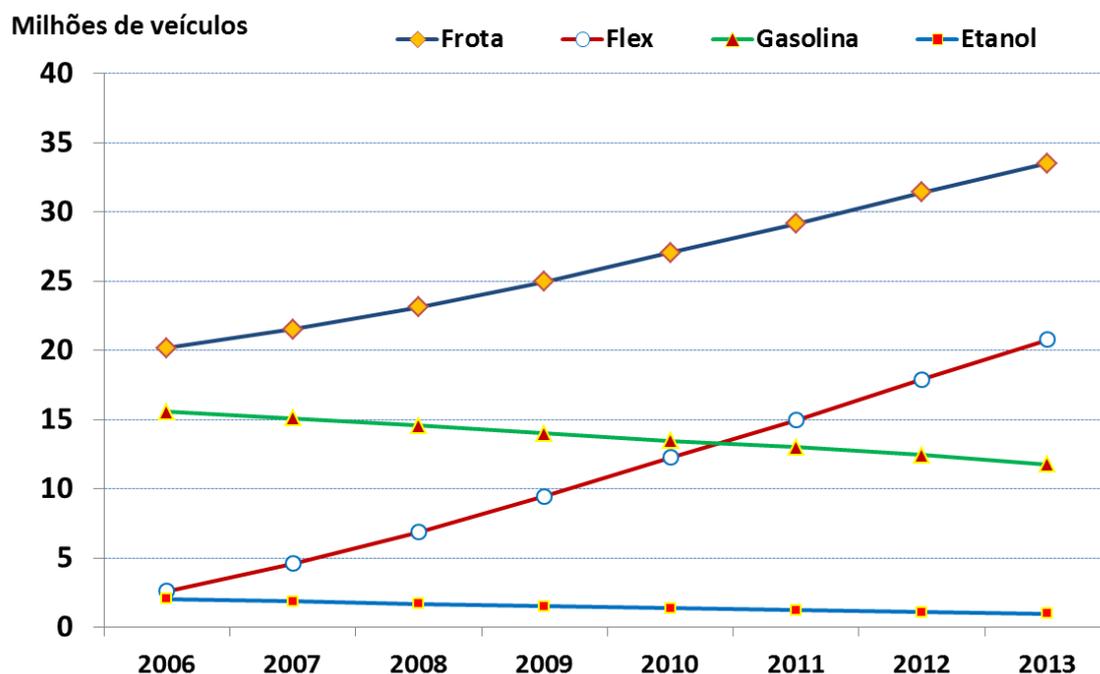
**Figura 3.3. Automóvel a álcool, 1925, com tecnologia desenvolvida pela Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (EECM)**

- 1934 a 1975 - USINAS DE AÇÚCAR – predomínio da estrutura familiar (os chamados "usineiros"). Teve início a produção do "etanol motor" anidro, adicionado à gasolina automotiva. Os motores pioneiros movidos a etanol foram desenvolvidos em universidades.

<sup>18</sup> Elaborado a partir de RODRIGUES, 2008 e CAVALCANTI, 2013

- 1976 a 1980 - PRIMEIRA FASE DO "PROÁLCOOL" – ênfase no etanol hidratado, como substituto da gasolina, mas ainda com objetivos modestos (o primeiro veículo movido exclusivamente a álcool chegou ao mercado em 1978).
- d 1981 a 1986 - INTENSIFICAÇÃO DO "PROÁLCOOL" – a produção de etanol saltou do patamar de 4 bilhões de litros, na safra 1981/82, para a faixa de 12 bilhões de litros, na safra 1986/87. A proporção de carros a álcool, no total de automóveis de ciclo Otto (passageiros e de uso misto) produzidos no país, aumentou de 27 %, em 1980, para 76 %, em 1986.
- 1987 a 1996 – REDUÇÃO DA AÇÃO DO ESTADO E ESTAGNAÇÃO DA PRODUÇÃO – apesar dos preços muito baixos do petróleo no mercado internacional (o contrachoque do petróleo, de 1986, levou os preços do barril a caírem de US\$ 30 a US\$ 40 para US\$ 12 a US\$ 20), que desestimulava investimentos no aumento da oferta de etanol, a conjuntura econômica interna mantinha sua "competitividade" (balanças comercial e de pagamentos deficitárias e manutenção de incentivos aos carros a álcool). Como já existia uma grande frota de veículos a álcool, a demanda se manteve equilibrada. Esse cenário levou a uma grave crise de abastecimento, na entressafra 1989/90.
- 1997 a 2001 - QUEDA BRUSCA DE PRODUÇÃO DE ETANOL – isso ocorreu, por um lado, pela atratividade dos preços do mercado internacional de açúcar e, por outro, pela quebra de confiança do consumidor no abastecimento de etanol (levando a indústria automotiva a abandonar a produção de carros a álcool, em 2000). O mercado de álcool foi liberado em todas as suas fases (produção, distribuição e revenda) com preços determinados por oferta e procura. A exportação de açúcar passou de 1 Mt, em 1990, para 10 Mt, dominando o mercado internacional.
- 2002 a 2008 - RECUPERAÇÃO DA PRODUÇÃO E DOS INVESTIMENTOS – o aumento dos preços da energia e a tecnologia dos motores "flex" reestimularam o setor (**Figura 3.4**), trazendo novos tipos de investidores, mais interessados nos biocombustíveis e na bioeletricidade e menos no açúcar. Grandes grupos petrolíferos (Petrobrás e Shell) e petroquímicos (Brasken / Odebrecht / ETH), grandes fundos de investimento internacionais (Brenco) e *traders* de grãos (Dreyfus, ADM, Bunge, Cargill) aportam recursos em *greenfields* de etanol. A produção salta de 12 bilhões de litros, na safra

2002/2003, para 27 bilhões de litros, em 2008/2009.



Fonte: Elaboração própria, a partir de Anuário Anfavea (2013)

**Figura 3.4. Evolução da frota de veículos ciclo Otto, no Brasil**

- 2008 até os DIAS ATUAIS – NOVA POLÍTICA PÚBLICA REDUZ ATRATIVIDADE DO SETOR – a crise financeira mundial, ao final de 2008, levou o governo brasileiro a usar o preço da gasolina como instrumento de sustentação da inflação (dentro das metas acordadas com os agentes financeiros) e, além disso, manter a dinamização da economia. Contudo, no ponto de vista dos preços ao consumidor, o valor energético do etanol é 30 % inferior ao da gasolina e sua competitividade está vinculada a isso. Assim, os preços depreciados da gasolina desestimularam o consumo do etanol.

Atualmente, os oito maiores grupos do setor sucroalcooleiro têm capacidade de processar 40% da cana colhida, em 76 unidades, cerca de 20% do total de usinas (Tabela 3.1). A média de moagem desses oito grupos é de 3,2 Mtc por unidade produtiva. Por outro lado, a capacidade de moagem das mais de 300 unidades restantes é de cerca de 350 Mtc, ou seja, média da ordem de 1,0 Mtc por usina.

**Tabela 3.1. Capacidade de moagem de cana e participação de mercado dos oito principais grupos sucroalcooleiros em 2015**

Grupo	Número de Unidades	Capacidade de Moagem	Participação de Mercado
		(Mtc)	(%)
Raízen (Cosan e Shell)	24	65,0	10,7
Odebrecht Agroindustrial	9	40,0	6,6
Biosev (Louis Deyfus)	11	36,4	6,0
Guarani (Tereos)	7	23,0	3,8
Santa Terezinha	9	22,5	3,7
Bunge	8	21,0	3,4
São Martinho	4	22,0	3,0
Noble	4	17,0	2,8
Subtotal	76	246,9	40,0

Fonte: Elaboração própria, a partir de sites dos grupos empresariais em setembro, 2015

#### **1.4. MODELOS DE USINA ATUAIS**

A grande maioria das plantas em operação optaram pela flexibilidade, onde podem ser produzidos tanto açúcar quanto etanol, e são denominadas "destilarias anexas". Contudo, há também plantas dedicadas só à produção de açúcar (ou usinas de açúcar, mais antigas, hoje, em pequeno número) e plantas dedicadas só à produção de etanol (mais modernas e focadas na logística do combustível, pois o comércio de açúcar é bastante diferente), chamadas "destilarias autônomas".

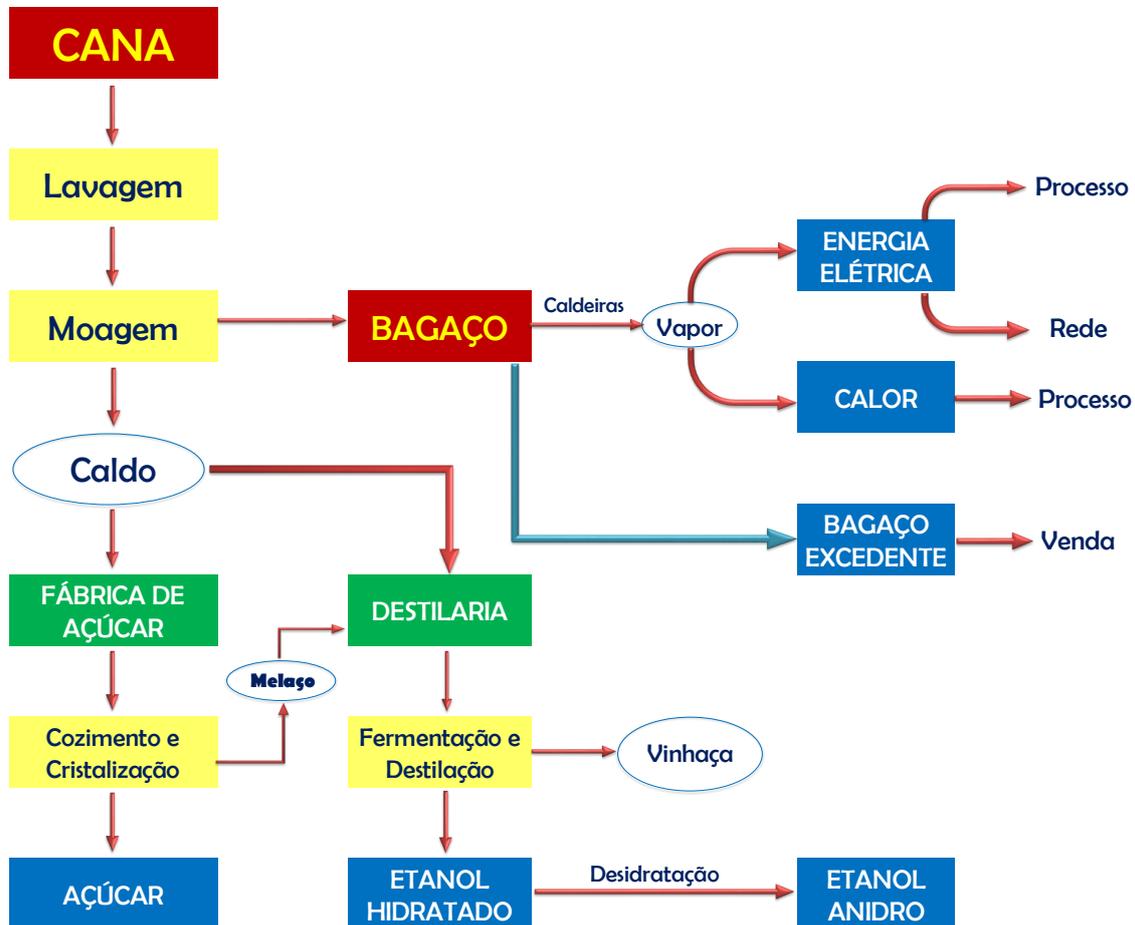
A **Figura 3.5** mostra o fluxograma simplificado de uma unidade típica.

O processo de produção de açúcar e etanol inclui três principais atividades:

- lavagem da cana, com uso de 5.000 litros de água por tonelada de cana (reaproveitados);
- moagem da cana para extração do caldo (gerando bagaço para uso nas caldeiras); e
- encaminhamento do caldo à cristalização, na fábrica de açúcar, e/ou à fermentação, na destilaria.

O bagaço é fundamental para o processo, pois permite a autossuficiência energética das usinas, tanto na geração de calor, como de eletricidade. Apesar disso, é utilizado de forma pouco eficiente nas usinas que não vendem energia para a rede, pois

é uma forma de evitar seu acúmulo ao final da safra.



Fonte: Elaboração própria

**Figura 3.5. Fluxograma de operação de uma planta flexível**

Observe-se que a palha não faz parte desse sistema, pois é deixada no campo durante a colheita mecanizada. A energia disponível na palha poderia ser aproveitada, quer nas caldeiras, produzindo calor e eletricidade, quer para a produção do etanol celulósico.

A reformulação aqui proposta da estrutura industrial sucroalcooleira inclui, necessariamente, o aproveitamento da palha e a otimização energética das usinas.

A seguir são descritas as principais características da cana-de-açúcar e das operações agrícolas e industriais na produção de açúcar e etanol.

## **2. A CANA**

---

A cana é uma gramínea de ciclo longo, isto é, uma vez plantada permanece produzindo durante cinco ou seis safras, pelo menos. O longo ciclo produtivo do setor sucroalcooleiro, desde a formação dos canaviais até a comercialização do açúcar e do álcool, dura cerca de 30 meses e demanda grande necessidade de financiamentos e capital de giro.

As variedades de cana atualmente utilizadas têm um período útil em torno de 10 anos, após o qual se inicia um processo de degenerescência atribuído a condições biológicas desfavoráveis tais como queda de fertilidade e condições físicas desfavoráveis do solo e efeito cumulativo de moléstias e pragas. A prática de alternar espécies em um mesmo solo aumenta a produtividade da cultura. De um modo geral, as áreas de plantio precisam ser renovadas a cada seis ou sete anos, dependendo da região, do clima e das variedades utilizadas. Isso significa que entre 12 % e 16 % das áreas ocupadas pelos canaviais precisam ceder espaço, a cada ano, para outras culturas, para que a terra possa respirar e se renovar, evitando-se, simultaneamente, a disseminação de pragas e doenças.

O ciclo da cana está dividido em dois períodos distintos, o do crescimento vegetativo e o de armazenamento da sacarose. Vários fatores influem na maturação da cana, entre eles, o clima e o solo. Em climas quentes e alta umidade relativa do ar, a cana se desenvolve vegetativamente, em baixas temperaturas e umidade, e atinge a maturação por paralisação do crescimento, quando ocorre o aumento da sacarose e a diminuição dos açúcares redutores. O solo, a adubação nitrogenada, ou aplicação de vinhaça, podem retardar a maturação. Solos porosos, secos e bem drenados oferecem amadurecimento mais rápido que solos compactos e úmidos.

A temperatura ideal para o cultivo é na faixa de 21 °C a 23 °C, com luz e umidade abundantes (mínima de 1.200 mm anuais, a maior parte no crescimento). O plantio da cana nos estados do Centro-Sul se dá nos meses de janeiro a março e nos meses de setembro a outubro. Em Pernambuco, acontece no período de junho a setembro e, em Alagoas, de setembro a dezembro. Em todas as regiões, a primeira colheita é prevista para um período entre 16 meses a 18 meses. Após isso acontece a rebrota, seguida da soca e ressoça.

A safra agrícola dura aproximadamente sete meses e acontece, na região sul,

entre maio e novembro, e nas regiões norte/nordeste, de setembro a abril. O aprimoramento genético das espécies e o manejo dos canaviais tem tornado possível estender o período da safra.

A produtividade média de um canavial é definida em função da variedade de cana plantada, do clima, do solo e das técnicas cultivares. No nordeste brasileiro, a produtividade varia de 55 t/(ha.ano) a 60 t/(ha.ano) e, na região centro-sul, atinge até 90 t/(ha.ano).

A qualidade da cana está relacionada à quantidade de sacarose que contém, sendo que nos colmos estão 75 % a 80 % do caldo, com teor médio de sacarose entre 13 % e 18 %.

Os açúcares redutores (glicose e frutose) são substâncias que facilitam a recuperação da sacarose, pois diminuem sua solubilidade (a presença destes açúcares em quantidades anormais indica que a cana não atingiu a maturação plena ou está deteriorada). A sacarose é o principal componente orgânico tanto para a produção de açúcar, quanto para de etanol.

A tecnologia do etanol celulósico pode vir a estimular o desenvolvimento de espécies com teores de sacarose/celulose diferenciados, privilegiando a celulose, diferente do que ocorre hoje. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de espécies tem gerado resultados excepcionais para o setor sucroalcooleiro brasileiro. Através do uso de técnicas convencionais, mais de 500 variedades comerciais foram desenvolvidas, sendo variedades mais produtivas, mais resistentes às doenças, mais adaptadas a novos ambientes de produção e com crescentes teores de ATR - açúcar total recuperável - principalmente sacarose (Embrapa, 2014).

Apesar da posição de vanguarda tecnológica, liderados pela excelência das pesquisas da Embrapa, inclusive no desenvolvimento de espécies geneticamente modificadas, os mecanismos e leis para licenciamentos ambientais não são ágeis, o que é apontado, por Farina (2014), como entrave ao setor.

Destaca-se que a Embrapa é um exemplo de sucesso da participação do Estado no apoio à inovação, com reconhecimento mundial, numa empresa onde os recursos públicos vêm fazendo um papel diferencial para a capacitação da agricultura brasileira.

As atividades de plantio e colheita usam máquinas e implementos agrícolas semelhantes aos de outras culturas, como tratores, arados, grades e tanques, todos com

baixo grau de especificidade.

As principais máquinas específicas para a cana-de-açúcar são as colheitadeiras, os cultivadores e subsoladores, dos fabricantes Massey Ferguson, Valmet, New Holland, John Deer, Case e Catterpillar.

Outros insumos fundamentais nessa etapa são os fertilizantes, produzidos pelas empresas Manah, Copas, Iap, Ipiranga, Solo Rico, Fertibras e Fertiza.

A atratividade do processamento da cana é determinada pela distância entre a área da colheita e a unidade de esmagamento (onde estão as moendas), definindo uma especificidade locacional, tanto pelos custos de transporte quanto pela velocidade de deterioração da cana cortada. Tipicamente, uma usina possui três tipos de fornecedores (cabendo um terço do fornecimento para cada um):

- integração vertical - a própria usina é dona da terra;
- arrendamento do canavial pela usina;
- produtores independentes com canavial próprio.

A coordenação e o manejo dos canaviais, próprios ou de terceiros, é um ponto sensível no negócio da cana, pois a usina deve buscar estabelecer um forte vínculo com os canaviais localizados próximos à usina, firmando contratos por um prazo mínimo de 5 anos, para ter garantia de fornecimento.

## **2.1. FASE AGRÍCOLA**

---

A fase agrícola pode ser resumida em seis etapas: planejamento; preparo; plantio; cultivo; colheita; e transporte. Nas fases de plantio e colheita encontram-se métodos e procedimentos específicos da cultura da cana-de-açúcar, assim como as principais máquinas e equipamentos utilizados, sendo as demais genéricas, com práticas semelhantes às utilizadas em outras culturas.

A seguir são descritas essas etapas e quais as principais atividades realizadas [BNDES Setorial 35 (2012), CGEE (2007) e Rodrigues, A. (2008)].

a) PLANEJAMENTO. Nessa fase procede-se à escolha dos principais componentes da produção (variedades adequadas, adubos, defensivos, corretivos, fertilizantes, máquinas, equipamentos e serviços), estimativas de custo, levantamento topográfico, mapa georreferenciado e amostragem do solo. Os principais equipamentos

são o Sistema de Posicionamento Global (GPS) e o Sistema de Informações Geográficas (GIS).

b) PREPARO. A fase de preparo envolve quatro atividades:

- gradagem: destinada à eliminação de soqueiras, pastagens e compactação superficial do solo e à melhoria da aração e da infiltração de água;
- correção, destinada à aplicação de calcário, para adequar o pH do solo e prover cálcio e magnésio;
- aração ou subsolagem, destinada à descompactação total do solo, melhorando a capacidade de infiltração e retenção de água e a formação das raízes das plantas; e;
- adubação, destinada à recomposição da fertilidade do solo, com a utilização de macro e micronutrientes, além de fertilizantes orgânicos do originados no processo industrial, como vinhaça e torta de filtro. Os principais equipamentos são: grades aradoras; tratores de pneus ou esteiras; aplicadores espalhadores; subsoladores; sulcador adubador; carretas (para aplicação torta de filtro).

c) PLANTIO. No caso de plantio mecanizado, utiliza-se uma máquina plantadora específica, que, abastecida das gemas, abre o sulco, dosa o adubo, distribui os toletes com três gemas, aplica o defensivo agrícola (fungicida) e finaliza com o cobrimento das mudas. A plantadora recebe as mudas de cana do viveiro, que foram colhidas mecanicamente por colhedoras adaptadas (com kit de emborrachamento para não danificar as gemas). Os principais equipamentos são: pulverizadores; aviões agrícolas, plantadora e colhedora adaptada para colheita de gemas

d) CULTIVO. Esta etapa envolve três atividades:

- fertiirrigação, realizada em áreas mais próximas das usinas, que são preparadas para receber vinhaça e águas residuais. Tem por principal objetivo fornecer a quantidade adequada de potássio no solo para a lavoura;
- controle de plantas invasoras e de pragas. No primeiro caso, são utilizados herbicidas, aplicados por pulverizadores acoplados a tratores e, no segundo, inseticidas ou controles biológicos e mecânicos; e
- rotação de culturas e adubação verde, visando alternância do ciclo da cana com outras culturas (em geral, leguminosas), em média a cada quatro anos, com a reforma do canavial. Isso quebra o ciclo de algumas pragas, fixa nitrogênio ao solo, incorpora

material orgânico e gera receita com a venda de grãos. Os principais equipamentos são: aspersores tipo canhão; motobombas; tubulações para irrigação; pulverizadores; carretas; tratores; caminhões-tanque; grades aradoras.

e) COLHEITA. Esta fase é realizada após a maturação, quando atingido o teor máximo de sacarose da cana. Pode ser:

- manual, que requer incendiar o canavial antes da colheita, para queimar controladamente a palha e permitir o deslocamento e o trabalho dos cortadores de cana. O corte é feito rente ao solo, diferentemente das colhedoras, com melhor aproveitamento da cana (apesar da menor produtividade). As queimadas são ambientalmente condenáveis e estão sendo progressivamente proibidas. A cana é colhida inteira e recolhida para o transporte por caminhões ou em unidades de transbordo acopladas a tratores; ou

- mecanizada, realizada em terrenos com menos de 12 % de aclave por máquinas colhedoras, com propulsão própria e dois extratores de palha. A cana é picada e a palha “soprada” durante a colheita. A palha fica no campo e a cana é descarregada pela colhedora diretamente nos caminhões ou em unidades de transbordo acopladas a tratores. A colheita mecanizada é a tendência econômica e, até mesmo legal, do setor, mas a colheita manual ainda é importante pelo número de postos de trabalho que representa. Os principais equipamentos são: máquinas colhedoras; unidades de transbordo; tratores; caminhões.

f) TRANSPORTE. Os principais equipamentos dessa fase são: carretas (cana picada - colheita mecânica), carroceria tipo gaiola; cavalos mecânicos, caminhões Romeu e Julieta; rodotrens (duas carretas); treminhão (mais de duas carretas).

## **2.2. COMENTÁRIOS ADICIONAIS SOBRE A COLHEITA DA CANA**

---

A escolha do tipo de corte dos colmos depende de diversos fatores, como a disponibilidade de mão-de-obra, aspectos socioeconômicos, configuração do terreno onde está implantado o canavial e sistema de carregamento a ser utilizado, entre outros.

O corte manual é o modo mais tradicional de colheita da cana-de-açúcar, porém alvo de muitas polêmicas, pois requer tratamento prévio, seja pelo despalhamento manual (atividade raramente praticada) ou pela queima do canavial. É feito na parte superior (ponta) e na parte inferior (base do colmo), sendo que a ponta

deve ser cortada na altura da primeira folha verde, pois tem baixo teor de sacarose e alto teor de gomas e sais, indesejáveis ao processo. A base do colmo deve ser cortada o mais rente possível do solo para melhor aproveitamento da planta e, principalmente, para melhor brotação da soqueira (ou touceira, uma espécie de raiz da cana) e facilitação do combate a pragas.

A capacidade de corte de um "bóia-fria" chega a 5 tc/dia, com a cana previamente queimada, e metade disso, no caso da cana-crua. Além dessa condição inicial da cana, queimada ou não, outro fator que influi no rendimento dos cortadores é o porte da cana que está sendo colhida. Plantas eretas costumam facilitar a atividade, enquanto que as acamadas tornam o trabalho mais difícil, diminuindo o rendimento.

A queima do canavial também traz mudanças na composição da cana, devido às altas temperaturas atingidas, e pode ter aspectos negativos para seu processamento industrial. Para a produção de açúcar ou de etanol, recomenda-se que a cana queimada seja processada em, no máximo, 24 horas.

O combate às queimadas, todavia, não é motivado pela questão logística, mas sim por questões sociais e ambientais. As emissões de CO<sub>2</sub> e de particulados representam um aspecto bastante negativo e a legislação recente estabelece prazos para eliminação dessa prática (**Figura 3.6**).

Além disso, a perspectiva de utilização em larga escala da palha para a produção de energia, tanto na forma de bioeletricidade, quanto na forma de etanol celulósico, transformará a palha em matéria-prima para geração de energia e combustíveis.

A Unica (União da Indústria Sucroalcooleira) e a Orplana (Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil) assinaram um protocolo ambiental com o governo de São Paulo estabelecendo que em 2017, toda plantação de cana deverá ser mecanizada, ou seja, abolindo as queimadas. Nas áreas onde a colheitadeira consegue trabalhar, esse protocolo já vale para 2015, e na safra 2011/2012 a colheita mecânica no Estado de São Paulo foi de aproximadamente 75 %.

No entanto, os sistemas mecanizados ainda apresentam diversas questões polêmicas, como as apontadas a seguir.



Fonte: Rípoli, 2008

**Figura 3.6. Queima do canavial para colheita manual**

- ❖ O corte mecanizado pode proporcionar redução de cerca de 20 % dos custos de produção, mas ainda precisa ser aprimorado. As máquinas nacionais disponíveis ainda são, em sua maioria, precárias, apresentando baixo rendimento e grande frequência de manutenção.

- ❖ O corte mecanizado pode reduzir a longevidade do canavial, pois algumas máquinas não possuem corte eficiente, podendo chegar a cortar próximo a 50 cm acima da superfície do solo (o corte eficiente está por volta dos 20 cm). Portanto, durante o cultivo é necessário que o relevo da área seja uniformizado, facilitando, assim, o corte mecânico dos colmos.
- ❖ Cortar a cana em alturas elevadas deixa no toco uma quantidade importante de açúcar. Estudos revelam que o corte mecanizado pode gerar perdas de cerca de 800 kg de açúcar por hectare. Para que esse prejuízo seja minimizado, alguns fazem a colheita manual dos tocos.
- ❖ O corte mecanizado deve melhorar a precisão do corte dos ponteiros, pois isso melhora a qualidade da cana e diminui a quantidade de palha que segue para as moendas.
- ❖ O sistema de colheita mecânica deve atender às condições das plantações, tais como relevo e solos (com pedras e socos, solos secos e úmidos). Como não há oferta de implementos agrícolas adequados à lavoura tropical, as soluções disponíveis necessitam sofrer adaptações às condições brasileiras.

Existem dois conceitos de colheitadeiras para cana. O princípio da cana picada, desenvolvido na Austrália, e o sistema de colheita inteira, desenvolvido na Louisiana. Outros países que usam colheita mecanizada utilizam derivações destes princípios. (Rodrigues, 2007)

O sistema de colheita adotado no Brasil, atualmente, é o sistema australiano de colheita de cana picada. Rodrigues (2007) aponta como restrições desse sistema sua incompatibilidade com o plantio direto e sua incapacidade de colher eficientemente a palha, com qualidade e custo atrativos para sua integração ao processo de produção de etanol, além de compactação indesejada do solo. Além disso, a incapacidade da colhedora operar em terrenos com inclinação superior a 12 % determina que a expansão da cana-de-açúcar aconteça em áreas planas.

Apesar de exigirem elevado investimento, estes equipamentos apresentam baixa estabilidade direcional e ao tombamento e causam danos às soqueiras e ao solo. O tráfego intenso dos equipamentos de colheita e transporte nas entrelinhas de plantio representa, também, uma restrição importante deste sistema de colheita.

A implementação da colheita mecanizada requer o emprego de mão de obra

qualificada. Em regiões onde não há oferta desta mão de obra, são necessários anos de treinamento para a obtenção da produtividade esperada. A capacidade média de colheitadeiras em condições favoráveis de terreno, chega a 70 t/h.

### **2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PALHA**

---

Na colheita mecanizada, após a retirada da cana crua, a palha pode permanecer no campo por alguns dias, mas não muitos, pois isso pode gerar queimadas acidentais ou ainda retardar o período de rebrotamento. É recomendada a retirada de 50 % a 90 % da palha. A parcela que fica no campo favorece o controle de ervas daninhas e a fertilidade do solo.

Segundo o ESALQ (Piracicaba), a FEAGRI/UNICAMP e o CTC, três principais rotas têm sido estudadas na busca de soluções de colheita que permitam o recolhimento da palha, todas elas sem uso de queimadas, são elas:

- enfardamento – com o sistema de limpeza da colhedora funcionando normalmente, a palha que fica no chão é enfardada para ser transportada;
- sem limpeza – com os ventiladores do sistema de limpeza desligados, a palha é transportada junto com a cana para a usina, ocorrendo a separação da palha na estação de limpeza de cana (a seco) na usina;
- limpeza parcial – com o ventilador principal da colhedora operando em rotação reduzida e o ventilador secundário desligado, parte da palha é transportada com a cana para a usina e a separação da palha é feita na estação de limpeza da cana (a seco) na usina.

Na rota do enfardamento, a palha é, inicialmente, amontoada em fileiras contínuas após secar no campo e, posteriormente enfardada (**Figura 3.7**). Dois tipos de enfardadeiras estão comercialmente disponíveis, as de fardos cilíndricos e as de fardos circulares, capazes de compactar numa densidade entre 150 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup>.

Os custos operacionais desta atividade são determinantes para a adoção da palha como insumo às usinas. O desenvolvimento de implementos agrícolas que aumentem a operacionalidade desta atividade é de grande importância para o setor. Esse desenvolvimento não tem sido prioridade dos fabricantes de implementos agrícolas, em função da alta produtividade da cultura da cana por hectare em comparação com outras culturas. A quantidade colhida por área cultivada com grãos é bastante inferior àquela

com cana-de-açúcar, o que resulta em tamanhos das áreas cultivadas e colhidas superiores ao da cana e em uma maior necessidade de aumento da produtividade na atividade da colheita dessas plantas.



Fonte: Rípoli, 2008

**Figura 3.7. Enfardamento da palha no campo**

O CTBE, com apoio do BNDES, já desenvolve equipamentos para eliminar a condição de pisoteio intenso, praticado atualmente na colheita mecânica. Devem ser adotados sistemas alternativos, envolvendo, dentre outras, técnicas de controle de tráfego, cujo desenvolvimento e implantação não demandam pesquisa de fronteira e são factíveis a partir da engenharia e da capacidade atual de investimento por parte do setor canavieiro.

#### **2.4. COLHEITA MECANIZADA VERSUS EMPREGO**

---

As condições de trabalho nos canaviais são alvo de severas críticas, relacionadas à questão da colheita manual da cana-de-açúcar e, também, da maior importância para a competitividade futura do etanol brasileiro. A cana-de-açúcar é uma das atividades agrícolas que mais gera emprego por unidade de área cultivada. A perspectiva de certificação dos biocombustíveis quanto às questões socioambientais exerce pressão para a adoção de mecanização na lavoura de cana, reduzindo os atritos com a sociedade civil organizada.

A contrapartida dessa tendência será a redução do número de empregos gerados. Desta forma, a transição da colheita manual para a mecanizada deve ser objeto de planejamento e controle por parte das autoridades competentes. O vigoroso aumento da produção de cana em novas regiões do país pode vir a resultar na absorção da mão-de-obra eliminada, caso sejam concebidas e implementadas políticas de planejamento da qualificação profissional.

#### **2.5. FASE INDUSTRIAL: PROCESSAMENTO DA CANA**

---

A produção de etanol e de açúcar, do ponto de vista de processos, é muito semelhante em todas as usinas brasileiras. Há variações na potência e eficiência dos equipamentos, nos controles operacionais e, principalmente, nos níveis gerenciais. Existe uma boa integração entre as áreas agrícola e industrial das usinas, o que permite otimizar toda a cadeia produtiva, principalmente nas unidades mais bem gerenciadas. O sistema de remuneração da cana em vigor estimula o produtor independente a entregar a matéria-prima em boas condições.

Basicamente, uma unidade industrial pode ser dividida em cinco grandes grupos de processos: limpeza/moagem, tratamento do caldo, fábrica de açúcar, destilaria de etanol, energia e efluentes, conforme descritos a seguir.

### ***a) Limpeza e moagem***

---

Esta unidade tem a finalidade de limpar a cana e extrair o caldo com um mínimo de perda de açúcares, bem como reduzir a umidade final do bagaço. Quando obtida por corte manual, a cana é colhida inteira e lavada na própria mesa de recepção/alimentação. No caso de corte mecanizado, a cana picada não pode ser lavada, pois as perdas de sacarose seriam muito elevadas, podendo-se utilizar o sistema de limpeza a seco, baseado em jatos de ar, antes de admitida na mesa de alimentação.

Da mesa de alimentação, a cana é transportada por esteiras até os equipamentos de preparo, compostos por um ou dois conjuntos de facas rotativas, para picar a cana (quando inteira) e/ou nivelar a camada de cana na esteira, facilitando o trabalho do desfibrador, composto de um rotor com martelos oscilantes, e uma placa desfibradora. A cana é, então, pulverizada, abrindo-se as células que contêm os açúcares, o que facilita a extração desses açúcares pela moenda (pelo menos 82 % das células devem estar abertas para se conseguir uma boa eficiência de extração nas moendas).

Na saída do desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada pelo espalhador, seguindo por uma esteira de borracha de alta velocidade até a calha de alimentação forçada da moenda (chute Donnelly). A moagem consiste em fazer a cana passar entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida, extraíndo o caldo e deixando o bagaço, no final do processo, com um grau de umidade apropriado para ser usado como combustível nas caldeiras.

A moenda é formada por quatro a sete ternos em série. Após a passagem pelo primeiro terno, a proporção de caldo em relação à fibra cai de 7 para 2, tornando difícil a extração do caldo residual, aplicando-se, então um o artifício para extração, denominado embebição.

Normalmente, o caldo extraído no primeiro terno, por ser de melhor qualidade, é enviado diretamente para a fábrica de açúcar. O restante do caldo, extraídos por embebição, vai para a destilaria. A eficiência de extração de açúcares varia de 94,0 % a 97,5 % e a umidade final do bagaço situa-se em torno de 50 %.

### ***O BAGAÇO***

---

Após a extração do caldo, o bagaço, constituído de fibra (46 %), água (50 %) e sólidos dissolvidos (4 %), é transportado por esteiras rolantes para as caldeiras. O bagaço, numa quantidade que varia de 240 kg/tc a 280 kg/tc, e é o único combustível

utilizado nas caldeiras a vapor, produzindo toda energia necessária ao processamento de cana.

O vapor oriundo das caldeiras é expandido em turbinas de contrapressão, que por sua vez acionam os principais equipamentos mecânicos da usina (picadores, desfibradores, moendas, exaustores e bombas de água de alimentação das caldeiras), bem como os geradores de energia elétrica, que alimentam vários outros equipamentos da usina.

### ***b) Tratamento do caldo***

---

Os processamentos do caldo, na fábrica de açúcar e na destilaria, exigem um tratamento prévio, constituído por duas fases. Na primeira fase, são removidos os sólidos insolúveis (areia, argila, bagacilho etc.), cujos teores variam entre 0,1 % e 1,0 %, por meio de peneiramento. Na segunda fase, é feito um tratamento químico, cujo objetivo é remover as impurezas insolúveis não eliminadas na fase anterior e as impurezas coloidais e solúveis, por sedimentação. É necessário, ainda, fazer a correção do pH para evitar inversão e decomposição da sacarose.

Na fabricação do açúcar, é obrigatória, ainda, uma etapa de sulfitação, que tem como objetivos principais:

- inibir reações que causam formação de cor e a coagulação de coloides solúveis e promover a formação do precipitado de sulfito de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ); e
- diminuir a viscosidade do caldo e do xarope, das massas cozidas e dos méis, facilitando as operações posteriores de evaporação e cozimento.

### ***c) Fábrica de açúcar***

---

O processo de fabricação de açúcar se inicia por meio da concentração do caldo por evaporação. Em seguida, o xarope resultante é bombeado para os tachos de cozimento, para a cristalização do açúcar. O cozimento é feito em duas etapas: na primeira, destinada à evaporação da água residual do xarope para a cristalização da sacarose, cujo produto é uma mistura de cristais de sacarose com o licor-mãe, também chamado mel; na segunda etapa, ocorre a nucleação, onde são produzidos pequenos cristais de tamanho uniforme.

A separação dos cristais de sacarose do mel é feita por centrifugação, no qual são obtidos açúcar e melaço. O melaço, em torno de 20 % do caldo, não pode ser

utilizado para fabricação de açúcar refinado e é enviado para a fabricação de álcool, na destilaria, enquanto o açúcar é destinado ao secador para a retirada da umidade contida nos cristais. Após a secagem, o açúcar é levado ao silo para ser ensacado e estocado.

#### ***d) Destilaria: fabricação do etanol***

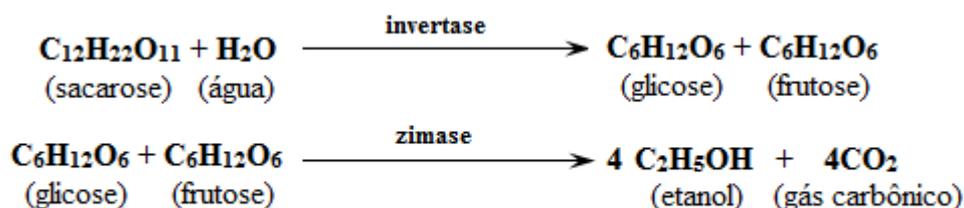
---

A forma mais simples de obtenção do etanol é através da fermentação das moléculas de açúcar, encontradas em vegetais como cana-de açúcar, milho, beterraba, batata, trigo e mandioca. Dentre todas as matérias-primas, a cana-de-açúcar é a de cultivo mais fácil e a mais produtiva, o que dá ao Brasil uma grande vantagem. A produtividade de etanol por hectare de cana é da ordem de 7.500 litros, enquanto, na mesma área, o milho, principal matéria-prima do álcool produzido por fermentação nos EUA, produz 3.000 litros do combustível por ano.

A fabricação do etanol é realizada em três etapas: fermentação; destilação e retificação; e desidratação.

##### Fermentação

Trata-se de uma técnica descoberta há milhares de anos e consiste em, basicamente, adicionar micro-organismos, como a invertase, e hidrolisar o caldo da cana (rico em sacarose) obtendo as moléculas de glicose<sup>19</sup> e frutose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), que posteriormente são decompostas em moléculas de etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) e de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), pela ação da enzima zimase.



Após limpo de impurezas, o caldo é levado a domas (tanques), no qual é adicionado um fermento com leveduras (fungos, sendo mais comum a levedura de *Saccharomyces cerevisia*). Esses micro-organismos se alimentam do açúcar presente no caldo. O processo de fermentação dura diversas horas e como resultado produz o vinho, chamado também de vinho fermentado, que possui leveduras, açúcar não fermentado e cerca de 10 % de etanol.

---

<sup>19</sup> As moléculas de glicose e frutose apresentam a mesma fórmula molecular, porém possuem estruturas químicas diferentes (são isômeros).

### Destilação e retificação

Como o etanol está misturado ao vinho fermentado, o próximo passo é separá-lo da mistura. Nesse processo, o líquido é colocado em colunas de destilação, nas quais é aquecido até evaporar. Na evaporação, seguida da condensação, o etanol é separado do vinho. Segue-se uma etapa de retificação, para adequação do grau alcoólico (96° GL.) do etanol hidratado, usado como combustível veicular.

### Desidratação

Para obtenção do etanol anidro, é feita a desidratação do etanol hidratado, seja por evaporação (um solvente adicionado à solução carrega a água no processo de evaporação), seja através de peneira molecular e pervaporação (com tipos especiais de peneiras que retêm apenas as moléculas da água). O álcool anidro, com graduação alcoólica de 99,5° GL, pode ser misturado à gasolina.

Os parâmetros típicos da fermentação, são:

- rendimento de conversão de açúcar: acima de 90 %;
- título de etanol no vinho: 8,0° GL a 9,0° GL;
- tempos de fermentação: 6 h a 11 h;
- concentração de fermento no vinho final: 13 % V/V;
- volume final de vinhoto após destilação: (12 a 15) litros de vinhoto por litro de etanol.

### ***e) Energia e efluentes***

---

A produção do etanol envolve uma grande eliminação de água e, portanto, a demanda de energia é alta, especialmente energia térmica, como mostrado na **Tabela 3.2**. Para o etanol hidratado obtido com a tecnologia convencional, a demanda de vapor é de 3,0 kg a 3,5 kg por litro de etanol produzido. O etanol anidro passa pela destilação azeotrópica com cicloexano, com consumo de 1,5 kg a 2,0 kg de vapor por litro de etanol produzido. A demanda de energia elétrica está próxima de 12 kWh por tonelada de cana processada (Pizaia, 1998, apud CGEE, 2007).

Na maioria das instalações, o balanço térmico continua deficiente, com um consumo específico de vapor que poderia ser significativamente reduzido com processos mais modernos.

**Tabela 3.2. Demandas de energia no processamento da cana**

Forma de energia	Função	Unidade	Açúcar	Etanol Hidratado	Etanol Anidro
térmica	vapor saturado para aquecedores, evaporadores e destilaria	kg/tc	470 a 500	370 a 410	500 a 580
mecânica	acionamento de sistemas de preparo e moagem da cana e de motobombas	kWh/tc	16	16	16
elétrica	motores elétricos diversos, iluminação, refrigeração	kWh/tc	12	12	12

Fonte: Pizaia, 1998 apud CGEE, 2008

### ***e.1) Cogeração e bioeletricidade***

As necessidades energéticas de uma usina, relacionadas às demandas de calor, eletricidade e energia mecânica, são atendidas pela planta de cogeração, que consome a biomassa residual gerada no processo.

O bagaço de cana sempre foi empregado como combustível nas usinas de cana-de-açúcar, consumido em sistemas a vapor muitas vezes obsoletos e caso pudessem ter maior eficiência, propiciariam maior geração bagaço e/ou de excedentes de eletricidade.

O processo produtivo demanda vapor a baixa pressão, normalmente a 2,5 bar, como fonte de calor para processos de tratamento e evaporação do caldo e destilação do etanol. O consumo de vapor pode variar em função da tecnologia e da integração térmica, o que influencia o consumo de combustível na caldeira.

Os sistemas de preparo da cana e de extração do caldo também consomem vapor no acionamento das turbinas que fornecem energia mecânica aos picadores, desfibradores e ternos de moenda. Normalmente, o vapor para atendimento dessa demanda é suprido a uma pressão a 22 bar e a vazão varia de acordo com a eficiência da turbina de acionamento. A substituição das turbinas de simples estágio por turbinas multiestágio, de maior eficiência, vem ocorrendo em muitas usinas e destilarias, o que possibilita o aumento da geração de excedentes de eletricidade no sistema de cogeração.

Outro avanço tecnológico importante, quanto ao sistema de preparo e de moagem da cana, é o emprego de motores elétricos para acionamento dos equipamentos, em substituição às turbinas a vapor. Essa mudança proporciona um

aumento significativo na eficiência de conversão da energia. Algumas usinas têm empregado sistemas de acionamento hidráulico, que representam uma solução intermediária, do ponto de vista da eficiência e da geração de excedentes elétricos.

### ***e.2) Sistemas a vapor: caldeiras, turbinas e geradores***

---

Os sistemas a vapor são encontrados nas usinas de cana-de-açúcar de todo o mundo. Esta é uma tecnologia amplamente conhecida pelo setor e, no Brasil, são utilizados majoritariamente equipamentos de fabricação nacional.

Os sistemas de cogeração mais eficientes em operação trabalham com vapor vivo a 65 bar e a 480 °C. A tendência tecnológica e operacional é o emprego de parâmetros mais elevados na geração de vapor, propiciando maior eficiência na geração elétrica, em sistemas que operem a pressões de até 90 bar e a temperaturas de até 520 °C.

Existe, ainda, uma tendência de aumento da capacidade de geração de vapor de 150 t/h a 250 t/h e eficiência acima de 85 %, para 300 t/h a 450 t/h de vapor gerado.

A tendência, quando se trata de caldeiras de maior capacidade, é a construção de caldeiras do tipo "*monodrum*". Essa tecnologia é novidade no setor sucroalcooleiro, mas já vem sendo empregada há vários anos, no Brasil e no mundo, em setores como papel e celulose, petroquímica e geração termelétrica. A tecnologia possibilita a adoção de grandes vazões de vapor e pressões superiores a 100 bar.

Os sistemas mais vendidos atualmente para as usinas de cana são as turbinas com vapor de entrada a 65 bar e 490 °C, com sistemas de condensação e extração controlada e contrapressão. Essa questão será retomada adiante, na avaliação do potencial de geração elétrica da cana.

Existe tecnologia na indústria nacional para produção de turbinas a vapor de reação com potência de até 150 MW, operando com vapor de admissão de até 120 bar e 530 °C, mas são atualmente demandadas apenas pelos clientes do exterior. Alguns projetos em desenvolvimento para plantas de açúcar e etanol estão considerando a compra de turbinas de 85 bar e 520 °C.

Historicamente, entretanto, a maioria dos investimentos foi em turbinas que operam a 22 bar e 320 °C (sistemas que apenas viabilizam a autossuficiência em eletricidade) ou a 42 bar e 420 °C (que permitem a geração de excedentes de

eletricidade modestos). A partir de 2007, as caldeiras que operam acima de 60 bar passaram a ser mais procuradas (Bressan Filho, 2011).

### ***e.3) Água, resíduos, subprodutos e efluentes***

---

O uso de água no processo é relativamente alto. Nas condições do Centro-Sul brasileiro, a captação é estimada em torno de 1,8 m<sup>3</sup> por tonelada de cana processada, mas vem se reduzindo de modo significativo com o tratamento dos efluentes, que permite reduzir tanto o nível de captação, quanto a disposição de água tratada (CGEE, 2008).

Considerando todo o processo de produção de etanol, os resíduos são constituídos por vinhaça (entre 800 L/tc a 1.000 L/tc de etanol); torta de filtro (aproximadamente, em base úmida, 40 kg/tc) e cinzas das caldeiras (Elia Neto, 2005).

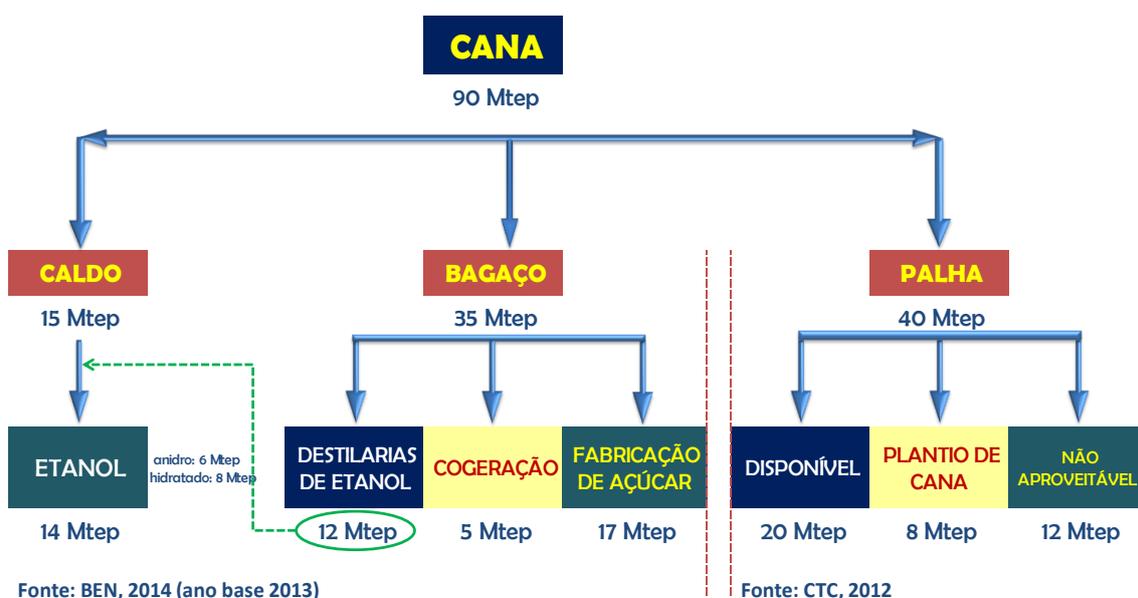
Nas usinas brasileiras, esses resíduos são valorizados e efetivamente constituem subprodutos, que são reciclados, contribuindo para reduzir, de modo significativo, a necessidade de fertilizantes e a demanda por irrigação nos canaviais.

A principal característica desse processo agroindustrial é a sua autossuficiência energética, que confere competitividade inigualável ao açúcar produzido no Brasil, como também permite instalações industriais distantes de qualquer linha de transmissão de energia elétrica, desde que estrategicamente situadas em relação ao canavial. Este fato, contraditoriamente, não estimula o usineiro a maximizar a geração de excedentes de bagaço para comercializar energia elétrica, pois a distância até a rede de distribuição pode inviabilizar o investimento. Nos tópicos a seguir são apresentados aspectos referentes ao aproveitamento da energia da cana.

### 3. A ENERGIA DA CANA

A energia da cana é dividida entre o caldo (que produz etanol e/ou açúcar), o bagaço (que alimenta as caldeiras das usinas e, em alguns casos, faz cogeração de eletricidade) e a palha (que fica no campo, sendo uma parte usada como adubo).

O processo produtivo de açúcar e etanol é, historicamente, autossuficiente em eletricidade e calor, gerados a partir do bagaço da cana. A **Figura 3.8** apresenta, esquematicamente, o balanço energético da cana, em termos de unidades equivalentes de energia, elaborado a partir de dados do Balanço Energético Nacional (2014) e do CTC (2012). Com base nesses dados, verifica-se que as destilarias consomem 12 Mtep e a fabricação de açúcar 17 Mtep, ou 30 % da energia total da cana. Destaca-se, ainda, a parcela de cogeração vendida para as distribuidoras de energia elétrica (5 Mtep) e a palha, hoje praticamente não aproveitada, que possui 40 Mtep de energia equivalente.



**Figura 3.8. Balanço Simplificado da Energia da Cana**

Toda lógica produtiva é voltada para o caldo, portanto, a energia do bagaço é apenas parcialmente aproveitada, mesmo assim com baixo rendimento e, no momento, a energia da palha é desperdiçada.

A reformulação industrial aqui proposta, baseada na eficiência energética, na química verde e na tecnologia do etanol celulósico, destina-se a mudar esse quadro.

A quantidade de palha gerada foi estimada, no balanço apresentado na **Figura 3.8**, como a diferença entre o total de cana colhido, descontado o caldo, o melão e o

bagaço. As estimativas do CTC (2014) são de 194 milhões de toneladas de palha, um valor de mesma grandeza deste calculado por diferença. O objetivo é determinar o potencial energético da palha e este valor, para apenas 50 % de recolhimento, é superior a 20 Mtep. Isso representa mais energia do que toda aquela consumida na indústria de açúcar no Brasil, que é o maior produtor mundial dessa *commoditie*.

## **EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NAS USINAS ATUAIS**

---

Um dos principais fatores da competitividade da indústria de açúcar e etanol no Brasil é sua autonomia energética. O uso do bagaço da cana para suprir as necessidades de calor e eletricidade do processo reduz os custos operacionais e também permite que as usinas se localizem em áreas não atendidas pela rede elétrica. No entanto, para a maioria das usinas atuais, é preciso utilizar todo o bagaço gerado, pois não é desejado ter qualquer estoque ao final da safra, conseqüentemente, a eficiência da queima do bagaço nas usinas nunca foi uma preocupação da indústria, pois sempre houve excesso. Apesar de algumas políticas públicas (principalmente os programas de incentivo à cogeração, como o Proinfa) incentivarem as usinas a se conectarem à rede elétrica e vender a energia elétrica excedente obtida pela queima do bagaço, mesmo nas usinas que vendem energia, o baixo aproveitamento da energia do bagaço ainda permanece.

As **Tabelas 3.3 e 3.4** trazem um perfil do setor neste aspecto (Bressan Filho, 2011), de onde se destacam os pontos a seguir.

- ❖ A potência instalada para geração elétrica é da ordem de 6.000 MW, em cerca de 400 usinas sucroalcooleiras.
- ❖ Destas, apenas 110 unidades (com 4.000 MW instalados) vendem energia. O rendimento dessas unidades é de 190 kWh por tonelada de bagaço.
- ❖ Para aquelas que apenas geram energia para seu próprio consumo (280 unidades), o rendimento é de 85 kWh por tonelada de bagaço.
- ❖ Caso tivessem a mesma eficiência no aproveitamento do bagaço que as unidades que vendem eletricidade para a rede, o excedente gerado por essas usinas que apenas geram energia para autoconsumo seria da ordem de 6.000 GWh, que representam, a preços do mercado livre de hoje no Brasil (US\$ 300,00/MWh), algo como US\$ 1,8 bilhões de receita.

**Tabela 3.3. Geração de energia elétrica a partir bagaço – safra 2009/2010**

	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	GERAÇÃO TOTAL (GWh)	AUTOCONSUMO (GWh)	COGERAÇÃO (GWh)
<b>CENTRO-SUL</b>	<b>5.162</b>	<b>18.173</b>	<b>11.116</b>	<b>6.945</b>
<b>NORTE-NORDESTE</b>	<b>753</b>	<b>1.859</b>	<b>1.408</b>	<b>373</b>
<b>TOTAL</b>	<b>5.915</b>	<b>20.032</b>	<b>12.524</b>	<b>7.318</b>
<b>VENDEDORES</b>	<b>3.844</b>	<b>13.473</b>	<b>6.054</b>	<b>7.318</b>
<b>AUTOCONSUMIDORES</b>	<b>2.071</b>	<b>6.559</b>	<b>6.470</b>	<b>0</b>
<b>TOTAL</b>	<b>5.915</b>	<b>20.032</b>	<b>12.524</b>	<b>7.318</b>

Fonte: Elaboração própria, a partir de Bressan Filho, 2011

O volume de bagaço excedente pode ser direcionado para a linha de etanol celulósico ou para ampliar a venda de eletricidade. Para o modelo setorial aqui proposto, também é de grande importância a otimização do uso da palha, que tanto pode substituir o bagaço nas caldeiras, como pode ser hidrolisado para produção do etanol 2G. Essa disponibilidade de insumos permite à usina arbitrar entre maior geração de energia elétrica para venda às concessionárias, ou uma maior produção de etanol celulósico.

**Tabela 3.4. Rendimentos da geração por unidade de cana e de bagaço – safra 2009/2010**

	CANA (tc mil)	BAGAÇO COMBUS- TÍVEL (tb mil)	BAGAÇO AUTO- CONSUMO (tb mil)	GERAÇÃO POR CANA MOÍDA (kWh/tc)	GERAÇÃO POR BAGAÇO (kWh/tb)	GERAÇÃO AUTO- CONSUMO (kWh/tb)
<b>CENTRO-SUL</b>	<b>542.777</b>	<b>132.178</b>	<b>100.116</b>	<b>33</b>	<b>84</b>	<b>69</b>
<b>NORTE-NORDESTE</b>	<b>60.120</b>	<b>15.889</b>	<b>13.719</b>	<b>31</b>	<b>89</b>	<b>27</b>
<b>TOTAL</b>	<b>602.897</b>	<b>148.067</b>	<b>113.835</b>	<b>33</b>	<b>85</b>	<b>64</b>
<b>VENDEDORES</b>	<b>282.996</b>	<b>71.595</b>	<b>37.363</b>	<b>48</b>	<b>188</b>	<b>162</b>
<b>AUTOCONSUMIDORES</b>	<b>319.901</b>	<b>76.472</b>	<b>76.472</b>	<b>21</b>	<b>86</b>	<b>85</b>
<b>TOTAL</b>	<b>602.897</b>	<b>148.067</b>	<b>113.835</b>	<b>33</b>	<b>85</b>	<b>64</b>

Fonte: Elaboração própria, a partir de Bressan Filho, 2011

Segundo estudo do CGEE (2005 apud Bioetanol, 2008), há um importante incremento dos excedentes de energia elétrica exportável que estão associados à elevação da pressão das caldeiras dos sistemas de cogeração (**Tabela 3.5**). Além disso, considerando as demais melhorias de processo, espera-se a redução do consumo do vapor de 500 kg/tc para 350 kg/tc, ampliando em 24 % os excedentes de energia elétrica. A utilização parcial da palha (50 %) dobraria os excedentes de energia elétrica.

São gerados 140 kg/t, em base seca, de pontas e folhas (palha) na colheita mecanizada. Esses resíduos formam um colchão que dificulta a colheitadeira a se deslocar no canavial e precisam ser retirados, porém uma parte, estimada em no mínimo 20 %, precisa ficar no campo para proteger o solo da erosão, manter a umidade e reciclar nutrientes (Dias, 2011).

**Tabela 3.5. Rendimentos da geração por unidade de cana e de bagaço – safra 2009/2010**

Pressão	Temperatura	Consumo de Vapor	Período de Geração	Uso da Palha	Energia Elétrica Excedente	Bagaço Excedente
bar	°C	kg/tc	-	%	kWh/tc	kg/tc
21	300	500	safra	0	10,4	33
42	400	500	safra	0	25,4	50
42	450	500	safra	0	28,3	48
65	480	500	safra	0	57,6	13
65	480	350	safra	0	71,6	0
65	480	500	ano todo	50	139,7	13
65	480	350	ano todo	50	153,0	0

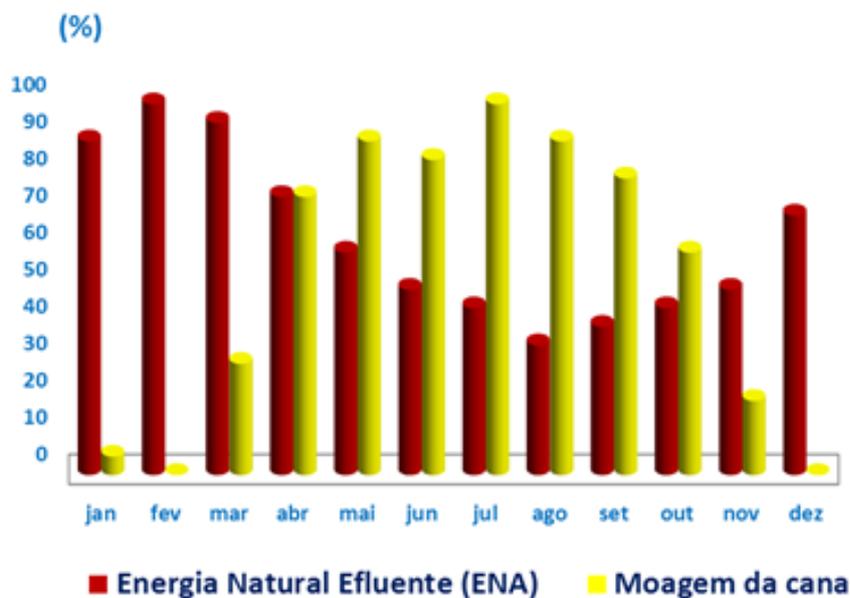
Fonte: CGEE, 2005

Durante o processamento da cana, são gerados outros 140 kg/t (base seca) de bagaço, após a moagem para extração do caldo. Esse bagaço geralmente é queimado em sistemas de cogeração de baixa eficiência (caldeiras de 22 bar em grande número de usinas) para produzir o vapor e a energia elétrica necessárias ao processo.

O CTBE (Dias, 2011) estima que, com o uso de 50 % palha e com a utilização de caldeiras de alta eficiência, com pressão de 90 bar, em vez das atuais de 22 bar, a eficiência da geração poderia chegar a 185 kWh/tc, quando, hoje é de 30 kWh/tc.

Algumas usinas já possuem sistemas de cogeração com caldeiras operando acima de 90 bar, com uma geração estimada, nesses casos, de 146 kWh por tonelada de cana (Seabra, 2008). Walter e Horta Nogueira (2007) indicam que, com a geração de vapor a 105 bar e 525 °C, a redução da demanda de vapor de processo para 280 kg/tc, o aproveitamento total do bagaço e de 50 % das pontas e folhas (palha), em operação contínua durante todo o ano, seria possível entregar excedentes de 158 kWh/tc para a rede.

Outro aspecto favorável à otimização da geração de eletricidade é a complementariedade sazonal entre a safra de cana e o regime de águas na geração hidroelétrica da região sul-sudeste, como mostra a **Figura 3.9**.



Fonte: ONS e UNICA, 2008.

**Figura 3.9. Complementariedade entre a disponibilidade de ENA das Usinas Hidroelétricas do Sudeste e a energia potencial da safra de cana.**

Concluindo, o processamento agroindustrial da cana deve ser otimizado, de tal forma que o potencial energético da cana possa ser melhor empregado. A bioeletricidade já representa, para as usinas em estágio tecnológico mais avançado, uma importante receita, como também pode vir a ser o etanol celulósico. Assim, como o açúcar e o álcool não são excludentes, a bioeletricidade e o etanol 2G também não são.

#### **4. ETANOL CELULÓSICO**

A tecnologia de conversão de biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis para a produção de etanol vem sendo considerada como uma alternativa promissora para atender à demanda mundial por combustíveis. Apesar de já existirem tecnologias disponíveis para o processamento da celulose, a maioria esbarra em dificuldades técnicas ou econômicas.

A celulose é uma das substâncias mais abundantes na natureza e vem sendo

amplamente estudada desde as primeiras décadas do século passado, mas o único processo que pode ser considerado como tecnologicamente dominado e economicamente viável é a queima direta da matéria vegetal.

Outras formas de aproveitamento da matéria vegetal são de grande interesse científico e econômico, pois essas matérias estão disponíveis em grandes quantidades em vários tipos de resíduos. O bagaço da cana é, atualmente, a fonte de energia das usinas de açúcar e álcool, que torna o processo autossuficiente em energia e vapor. No entanto, tanto o bagaço quanto a palha são resíduos lignocelulósicos, que também podem ser convertidos em inúmeros produtos químicos e, em especial, em etanol celulósico.

A produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica passa pelas etapas de pré-tratamento, hidrólise e fermentação. Devido à natureza recalcitrante da biomassa, difícil de ser desestruturada e convertida em monossacarídeos fermentescíveis, o pré-tratamento é a etapa mais relevante, em termos de rendimento e de custo direto, além de influenciar diretamente os custos das etapas anteriores e subsequentes.

A conversão dos polícarboidratos, ou seja, da celulose e da hemicelulose contidas na matéria vegetal, em açúcares (hexoses e pentoses) é efetuada através da quebra das longas cadeias de hidrocarbonetos, com a adição de água, num processo chamado hidrólise, que pode ser representada como indicado na **Figura 3.10** (Soares, 2007). Para a eficiência da hidrólise, é necessária a eficaz "abertura" da celulose, que se realiza no pré-tratamento, como será detalhado posteriormente neste capítulo.



Fonte: Soares e Rossell, 2007

**Figura 3.10. Hidrólise das cadeias de hidrocarbonetos**

#### **4.1. ROTAS TECNOLÓGICAS: HIDRÓLISE ÁCIDA E HIDRÓLISE ENZIMÁTICA**

A biomassa lignocelulósica é composta por polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e pela lignina, que mantém as células unidas. A fração celulósica (40 % a 60 %, em base seca) é um polímero linear, rígido e difícil de ser quebrado, cuja hidrólise gera glicose, um açúcar de seis carbonos (hexoses) e cuja fermentação com

*Saccharomyces cerevisiae* é bem conhecida. Por sua vez, a fração hemicelulósica (20 % a 40 %, em base seca.), em geral, constituída de uma cadeia principal de xilose (ligações  $\beta$ -1,4), é muito mais fácil de ser hidrolisada do que a celulose, embora a fermentação dos açúcares de cinco carbonos (pentoses) ainda não seja tão desenvolvida quanto os processos envolvendo a glicose (CGEE, 2008).

A estrutura bioquímica da fração de lignina (10 % a 25 %, em base seca.) não está relacionada a moléculas simples de açúcar e não é recomendada para produção de etanol por rotas fermentativas. Apesar de ser possível obter diversos produtos com base na lignina, atualmente, o foco dos estudos tem se voltado para seu uso como fonte de energia para os processos, o que garantiria a autossuficiência e, eventualmente, até a possibilidade de exportar alguma energia elétrica excedente. Naturalmente, no caso da cana-de-açúcar, que já é autossuficiente, a principal oportunidade é usar a lignina e poupar bagaço ou palha (ricos em celulose e hemicelulose) nas caldeiras.

Cabe ressaltar que, para outras matérias-primas, como o milho, a situação seria positiva tanto para a viabilidade econômica da tecnologia de hidrólise, quanto para os quesitos ambientais, já que reduziria a dependência por recursos energéticos fósseis externos.

De forma geral, a primeira etapa do processo consiste no pré-tratamento mecânico da matéria-prima, que visa à limpeza e à “quebra” da lignocelulose, a fim de causar a destruição da sua estrutura celular e torná-la mais acessível aos tratamentos químicos ou biológicos posteriores.

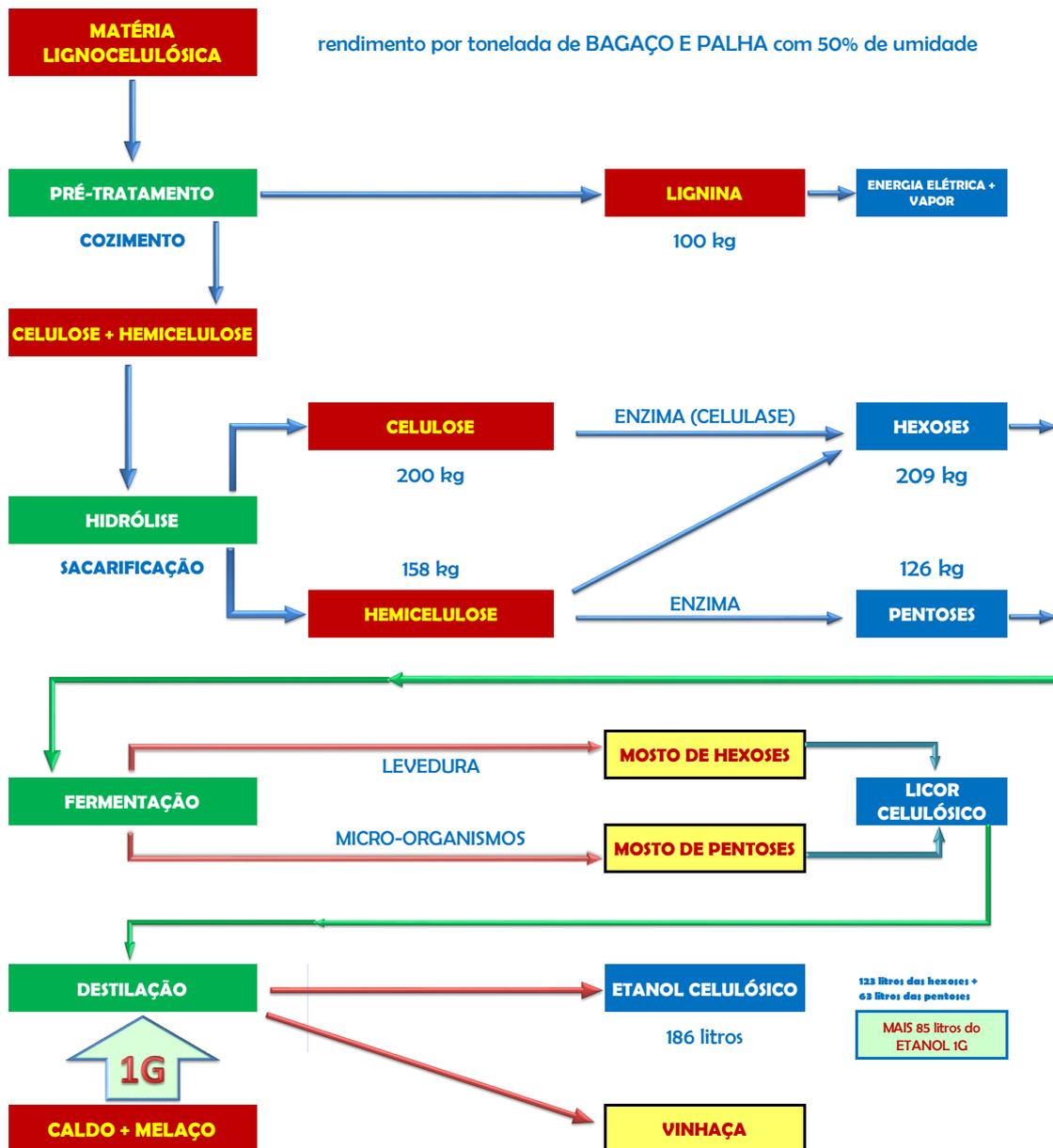
Na etapa de hidrólise propriamente dita, a celulose (um polímero de cadeia longa, composto por um só monômero) é convertida em glicose, catalisada por ácido diluído, ácido concentrado ou enzimas (celulase). A **Tabela 3.6** apresenta uma comparação dos parâmetros operacionais entre os principais processos de hidrólise.

**Tabela 3.6. Parâmetros dos processos de hidrólise da celulose**

Processo	Insumo	Temperatura	Tempo	Sacarificação
ácido diluído	< 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	215 °C	3 minutos	de 50 a 70%
ácido concentrado	30 a 70% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	40 °C	de 2 a 6 horas	90%
enzimático	celulase	70 °C	36 horas	de 75 a 95%

Fonte: Elaborado com base em Hamelink et al. (2005) apud CGEE (2008)

A **Figura 3.11** mostra o fluxo de produção do etanol 2G, com uma estimativa dos rendimentos em cada uma das etapas.



Fonte: Soares e Rossell, 2008

**Figura 3.11. Produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos**

Os processos de hidrólise mais pesquisados atualmente, com perspectiva de serem utilizados industrialmente, são:

- ❖ hidrólise do estado crítico;
- ❖ hidrólise ácida concentrada;
- ❖ hidrólise ácida diluída; e

- ❖ hidrólise enzimática.

### ***Hidrólise do Estado Crítico***

---

Processo que utiliza fluidos no estado crítico, em geral água, ainda está em fase de laboratório. Este processo requer otimização energética e complexas soluções de engenharia, no entanto, prospectam-se altos valores de conversão, baixa quantidade de subprodutos e tempo de reação insignificante, se comparado aos demais processos (Soares e Rossell, 2007).

### ***Hidrólise Ácida***

---

A hidrólise ácida concentrada é uma tecnologia que realiza a conversão em curto tempo, da ordem de 60 min a 240 min, possibilitando alto rendimento com reatores contínuos. A limitação está nos custos de recuperação e reciclagem, aquisição e neutralização do ácido. Este processo foi usado durante a Segunda Guerra Mundial e, hoje, existem plantas operando em escala piloto ou semi-industrial, mas não atingiram o estágio comercial.

Como o processo anterior, a hidrólise ácida diluída requer condições severas de reação, mas com tempo ainda mais reduzido, em geral inferior a 45 min, também possibilitando o emprego de reatores contínuos. As dificuldades estão no alto custo operacional e os desafios são a otimização dos equipamentos e as soluções de engenharia. A Dedini, tradicional fabricante de equipamentos para o setor sucroalcooleiro, foi pioneira na construção de uma unidade semi-industrial, utilizando a tecnologia DHR (Dedini Hidrólise Rápida), com reator contínuo e remoção da lignina. Esta unidade operou experimentalmente na Usina São Luiz, em Pirassununga (SP), com o processo por solvente orgânico (Organosolv) de hidrólise ácida diluída.

A hidrólise ácida (tanto concentrada, quanto diluída) ocorre em dois estágios para aproveitar as diferenças entre a hemicelulose e a celulose. O primeiro envolve a hidrólise da hemicelulose e no segundo estágio são aplicadas temperaturas mais altas, buscando otimizar a hidrólise da fração celulósica (Dipardo, 2000 apud Soares e Rossell, 2007).

O processo com ácido diluído utiliza altas temperaturas e pressões, com tempos de reação de segundos a alguns minutos, o que facilita o uso de processos contínuos. Já os processos com ácido concentrado são conduzidos em condições mais brandas, mas

com tempos de reação tipicamente mais longos (Graf e Koehler, 2000 apud Soares e Rossell, 2007).

A hidrólise com ácido diluído está num estágio tecnológico mais avançado do que as demais, mas com graves limites de rendimento (50 % a 70 %). A hidrólise com ácido concentrado apresenta rendimentos maiores e menores problemas com a produção de inibidores, embora a necessidade de recuperação do ácido e de equipamentos resistentes à corrosão comprometa o desempenho econômico do processo.

### ***Hidrólise Enzimática***

---

Esse processo procura utilizar a mesma via dos processos de hidrólise já em uso e prospecta-se que apresente alta taxa de conversão. É o processo que está recebendo o maior volume de recursos para P&D e já existem algumas unidades operando em escala industrial e em fase piloto. Apesar dos grandes avanços nos últimos anos, ainda está limitado por fatores como custo das enzimas, longo tempo de conversão e, possivelmente, alto consumo energético, devido à necessidade de aquecimento e agitação da carga dos conversores, por longo tempo (Soares e Rossell, 2007). Outra questão fundamental é a etapa de pré-tratamento para adequar a matéria lignocelulósica ("abertura" da celulose) ao ataque das enzimas. Esta etapa será detalhada à frente.

No processo enzimático, a hidrólise é catalisada por enzimas, genericamente denominadas celulasas, que são moléculas que aumentam a velocidade das reações químicas e, por este motivo, são denominados catalisadores biológicos. Esse processo é catalisado por um complexo enzimático composto por:

- ❖ endoglucanases (que atacam as cadeias de celulose para produzir polissacarídeos de menor comprimento);
- ❖ exoglucanases (que atacam os terminais não-redutores dessas cadeias mais curtas e removem a celobiose); e
- ❖  $\beta$ -glucosidases (que hidrolisam a celobiose e outros oligômeros à glicose).

Assim, como nos processos ácidos, existe a necessidade de um pré-tratamento para expor a celulose ao ataque das enzimas. Como o processo enzimático é conduzido em condições brandas (pH 4,8 e temperatura entre 45 °C e 50° C), o custo dos equipamentos é inferior ao dos processos ácidos, com maior rendimento, baixo custo de manutenção (não há problema de corrosão) e possibilitando a sacarificação e

fermentação simultâneas (SSF – *simultaneous saccharification and fermentation*). Por conta de seu grande potencial de evolução e redução de custos, muitos especialistas veem a hidrólise enzimática como a chave para a produção de etanol 2G a um custo competitivo no longo prazo (Philippidis e Smith, 1995; Sun e Cheng, 2002; Dipardo, 2000; Lynd, 1996, apud Soares e Rossell, 2007).

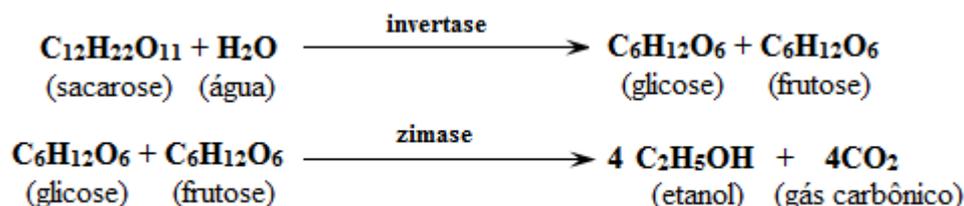
A hidrólise enzimática apresenta altos rendimentos, de 75 % a 85 %, e espera-se chegar, no curto prazo, à faixa de 85 % a 95 %. Além disso, a não-utilização de ácidos representa vantagens econômicas (equipamentos com materiais mais baratos e menor custo operacional) e ambientais (não há produção de resíduos).

## 4.2. FERMENTAÇÃO

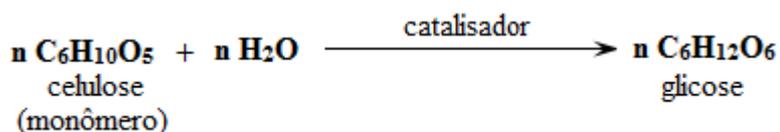
O etanol pode ser produzido a partir de qualquer fonte de carboidrato fermentável pela levedura, como frutas, milho, beterraba, batata, cevada, aveia, centeio, arroz, sorgo. No entanto, esses carboidratos têm moléculas longas, como a sacarose, que precisam ser primeiramente hidrolisadas em açúcares simples fermentáveis.

No caso da cana-de-açúcar, a sacarose se divide em glicose e frutose (isômeros), numa reação catalisada pela enzima *invertase* (também chamada de *sacarase*) e sintetizada pela *S. cerevisiae*.

Em uma etapa subsequente, a zimase, outra enzima sintetizada pela *S. cerevisiae*, catalisa a reação de transformação da glicose e frutose ( $C_6H_{12}O_6$ ) em etanol ( $C_2H_5OH$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ), como mostrado pelas seguintes equações:



No caso da lignocelulose, a parcela de celulose, um polímero de cadeia longa, é convertida para glicose segundo a seguinte reação, catalisada por ácido ou enzimas (celulases):



Entretanto, com a hemicelulose o resultado é bastante diferente, pois são obtidas majoritariamente pentoses (xilose e arabinose), que não são diretamente fermentescíveis pelas leveduras conhecidas no mercado, sendo a fermentação destas pentoses<sup>20</sup>, ainda, um dos desafios mais importantes para o etanol 2G.

Em resumo, independentemente do método, a fermentação dos açúcares, desde o hidrolisado até o etanol, segue os mesmos princípios do que é observado na produção tanto baseada em milho (amido) quanto em açúcares (caldo da cana). No caso da lignocelulose, uma parcela significativa do hidrolisado é composta por açúcares de cinco carbonos (pentoses), oriundos da hemicelulose, que não podem ser fermentados por linhagens selvagens de *S. cerevisiae* (Soares e Rossell, 2007).

Até o momento, a maioria dos processos ou descarta essa fração dos açúcares, ou realiza a fermentação em duas etapas, comprometendo bastante sua viabilidade econômica. Os esforços de P&D são para que essas transformações possam acontecer simultaneamente num menor número de reatores, necessitando de microrganismos capazes de fermentar ambos os açúcares, com alto rendimento (CGEE, 2008).

As pesquisas têm recorrido à engenharia genética para adicionar rotas metabólicas de pentose em leveduras e outros microrganismos etanologênicos, bem como vêm tentando, com sucesso, melhorar o rendimento dos microrganismos que já têm a capacidade de fermentar ambos os açúcares (Galbe e Zacchi, 2002, Lynd, 2005 e Gray, 2006 apud CGEE, 2008).

Para a hidrólise enzimática, o processo com sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) é considerado promissor e reduziria substancialmente os problemas de inibição. Uma evolução desse processo é a inclusão da co-fermentação de substratos com múltiplos açúcares, que permite o consumo de pentoses e hexoses no mesmo reator (SSCF – *simultaneous saccharification and co-fermentation*), ainda em escala-piloto e deve ser o foco de desenvolvimento para médio prazo.

---

<sup>20</sup> Uma alternativa em estudos seria a produção de xilitol, a partir da fermentação da xilose, um insumo de alto valor agregado com uso nas indústrias alimentícia, odontológica e farmacêutica. Tem alto poder adoçante, semelhante à sacarose, e na higiene bucal.

O ideal, em termos de processamento industrial, seria o estabelecimento do bioprocesso consolidado (CBP – *consolidated bioprocessing*), no qual as quatro transformações biológicas envolvidas na produção do etanol (produção de enzimas, sacarificação, fermentação de hexoses e fermentação de pentoses) ocorrem em uma única etapa. Nesse caso, microrganismos termofílicos produziriam anaerobicamente complexos enzimáticos com melhor atividade celulolítica que as típicas enzimas de fungos e fermentariam todos os açúcares liberados no mesmo reator (Wyman, 2007 apud CGEE, 2008).

### **4.3. ENZIMAS**

---

O Brasil, pioneiro na produção de etanol a partir do da cana, já dominava as leveduras para fermentação da sacarose do caldo da cana. Mas, para a hidrólise do bagaço e da palha, passou a ser necessária a tecnologia para processar as pentoses (C5) e as hexoses (C6) da celulose e da hemicelulose, segundo Gonçalo Pereira, do Centro de Biologia Sintética (Valor Econômico, 25/03/2015).

A GranBio obteve, em março de 2015, a aprovação comercial de uma levedura geneticamente modificada para uso na produção de etanol celulósico. Denominada Celere-2L, foi desenvolvida no Centro de Biologia Sintética da GranBio, em Campinas (SP) e é capaz de converter, em um mesmo processo fermentativo, as pentoses (C5) e as hexoses (C6).

O desenvolvimento da Celere-2L levou cerca de dois anos. Por meio de engenharia genética, os pesquisadores conseguiram obter uma levedura que converte tanto o C6, quanto o C5, pois isso significa elevar significativamente a produtividade. De cada 100 kg de palha (lignocelulose), 40 kg são de hexoses (C6) e 25 kg de pentoses (C5).

Existe, ainda, no mercado, outra levedura geneticamente modificada, a RN1016, da holandesa DSM, com a mesma função, e o CTC, em parceria com a Embrapa, estão tendo progressos com coquetéis enzimáticos.

A conversão simultânea de C5 e de C6 num mesmo reator é um dos pontos mais explorados no desenvolvimento do etanol 2G, pois o consumo de levedura impacta fortemente os custos do processo.

Independentemente da rota tecnológica de hidrólise adotada ou das soluções

para a fermentação das pentoses, os processos em desenvolvimento para as etapas precedentes, de pré-tratamento da biomassa e de abertura da lignocelulose, são vitais para a eficiência e para o rendimento na produção do etanol celulósico.

#### **4.4. PRÉ-TRATAMENTO**

---

Um dos principais gargalos que envolvem a produção de etanol celulósico é a forma de “desmontar” a parede celular da lignocelulose, liberando os polissacarídeos como fonte de açúcares fermentescíveis de forma eficiente e economicamente viável.

Os açúcares presentes no bagaço, na palha ou na cana-energia encontram-se na forma de polímeros (celulose e hemicelulose) e são recobertos por uma macromolécula (lignina), formando a microfibrila celulósica.

##### **4.4.1. Características Estruturais da Biomassa Lignocelulósica**

---

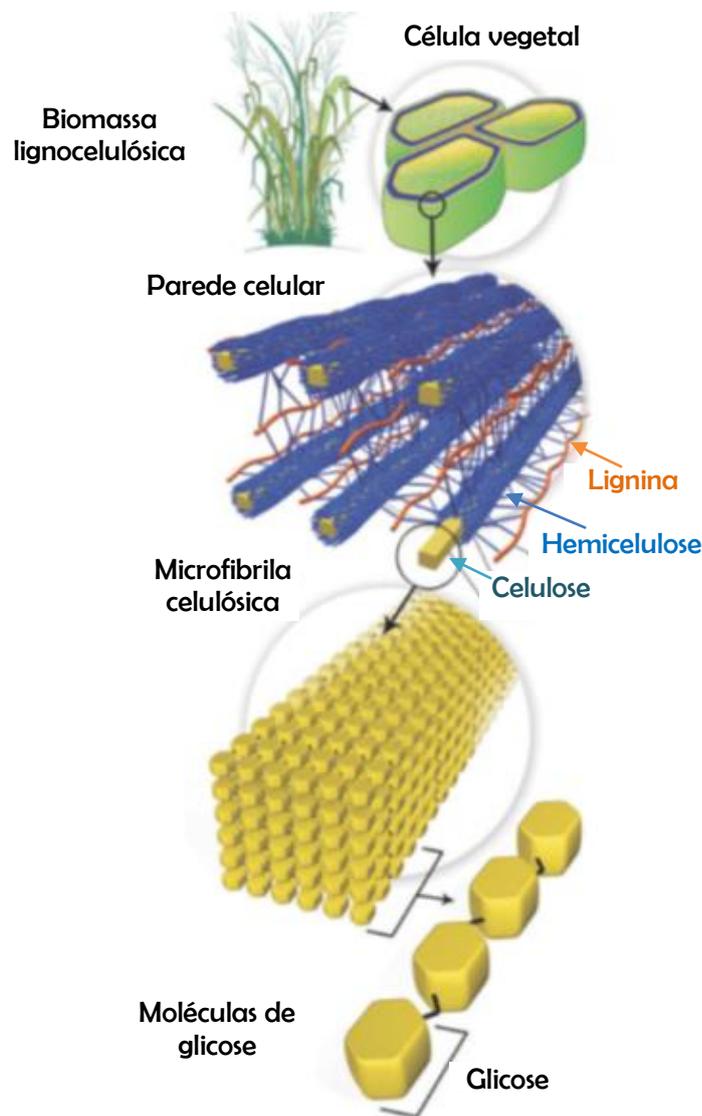
A biomassa lignocelulósica constitui a maior fonte de carboidratos naturais da natureza. A dificuldade de converter a lignocelulose em insumos químicos deve-se às suas características químicas e morfológicas (**Figura 3.12**). Esses materiais lignocelulósicos são constituídos de fibras de celulose envolvidas em uma matriz amorfa de polioses e lignina.

Essa matriz amorfa age como uma barreira natural ao ataque de micro-organismos e/ou enzimas e torna esses materiais estruturalmente rígidos e pouco reativos (composição química da lignocelulose: 35 a 50 % de celulose; 20 a 35 % de hemicelulose; 10 a 25 % de lignina; e uma pequena quantidade de cinzas).

A celulose é o polímero natural de maior ocorrência na natureza. As hemiceluloses são heteropolissacarídeos complexos e estruturalmente semelhantes à celulose. Apresentam maior susceptibilidade à hidrólise ácida, pois oferecem maior acessibilidade aos ácidos minerais comumente utilizados como catalisadores. A lignina, depois da celulose, é a macromolécula mais abundante nas biomassas. Sua estrutura não é homogênea, possui regiões amorfas e estruturas globulares (Veríssimo, 2015).

Na hidrólise enzimática dos materiais lignocelulósicos, a lignina atua como uma barreira física para as enzimas, que, além terem o acesso à celulose dificultado, ainda podem ser irreversivelmente capturadas pela lignina e, conseqüentemente, aumentar o consumo de enzimas e, conseqüentemente o custo da operação. Devido à associação fortemente resistente entre os três componentes poliméricos da biomassa, a

liberação dos polissacarídeos como fonte de açúcares fermentescíveis está entre os maiores desafios para o desenvolvimento do etanol celulósico. A celulose apresenta estrutura recalcitrante e, por esse motivo, o rendimento líquido da conversão da celulose em glicose livre e posteriormente em etanol é, com as tecnologias atualmente disponíveis, desfavorável (Veríssimo, 2015).



Fonte: Santos, F.A. et al, 2012

**Figura 3.12. Morfologia estrutural da biomassa lignocelulósica**

A relação entre os fatores estruturais reflete a complexidade da recalcitrância da lignocelulose e a eficiência da hidrólise enzimática. Tais características, como cristalinidade da celulose, área superficial, grau de polimerização, proteção da celulose

pela lignina e hemicelulose, são considerados fatores que interferem no rendimento da hidrólise (Veríssimo, 2015).

#### 4.4.2. Processos de Pré-Tratamento da Lignocelulose

Os métodos de pré-tratamento têm como finalidade a separação dos três componentes da biomassa, o que implica na ruptura do complexo "celulose-hemicelulose-lignina" e na remoção seletiva de cada fração para poderem sofrer degradação enzimática.

Na **Tabela 3.7** são apresentados de forma simplificada os diferentes tipos de pré-tratamento que vem sendo pesquisados e os efeitos na lignocelulose.

**Tabela 3.7. Características dos processos de pré-tratamento da lignocelulose**

PRÉ-TRATAMENTO	CELULOSE	HEMICELULOSE	LIGNINA	VANTAGENS	DESVANTAGENS	
<b>FÍSICO</b>	<b>MOINHO DE BOLAS</b>	intensiva, com diminuição do grau de cristalinidade	não remove	não remove	redução de cristalinidade	alto consumo de energia
	<b>ÁCIDO DILUÍDO</b>	pouca despolimerização	80 a 100% de remoção	pouca remoção, mas ocorrem mudanças estruturais	condições médias, com alta produção de xilose	difícil recuperação do ácido, corrosivo e alto custo
	<b>HIDRÓXIDO DE SÓDIO</b>	inchamento significativa	considerável solubilidade	solubilização considerável (> 50%)	remoção efetiva de ésteres	reagente de alto custo, recuperação alcalina
<b>QUÍMICO</b>	<b>ARP</b>	despolimerização < 5%	50% de solubilidade	70% de solubilização	efetiva deslignificação	alto custo, recuperação alcalina
	<b>HIDRÓXIDO DE CÁLCIO</b>	pouca despolimerização	solubilização significativa	solubilização parcial (40%)	efetiva remoção de lignina e acetil, com baixo custo	baixa eficiência pela pouca solubilidade da cal
	<b>OZONÓLISE</b>	despolimerização não observada	pequena solubilização	solubilização > 70%	efetiva deslignificação, em condições suaves	alto custo pelo alto consumo de ozônio
	<b>ORGANOSOLV</b>	inchamento considerável	solubilização significativa, quase completa	significativa deslignificação, podendo ser completa	efetiva deslignificação e alta produção de xilose	recuperação do solvente de alto custo
<b>BIOLÓGICO</b>	<b>BIOLÓGICO</b>	20 a 30% de despolimerização	solubilização > 80%	40% de deslignificação	efetiva deslignificação, com baixo requerimento de energia	perda de celulose e baixa taxa de hidrólise
<b>COMBINADO</b>	<b>EXPLOSÃO A VAPOR</b>	pouca despolimerização	80 a 100% de remoção	pouca remoção, mas ocorrem mudanças estruturais	sem custos de reciclagem, eficiência energética	degradação da xilana como produto inibitório
	<b>AFEX</b>	diminuição do grau de cristalinidade	solubilização > 60%	10 a 20% de solubilização	menor perda de xilanas e não forma inibidores	recuperação de amônia complexa e baixa eficiência em alto teor de lignina

Fonte: Santos, Fernando Almeida et al, 2012

Vários métodos de pré-tratamento estão sendo desenvolvidos. Eles podem ser classificados de diferentes formas: físicos, químicos, biológicos ou uma combinação

destes, no intuito de reduzir a recalcitrância da biomassa. Dentre estes métodos, os pré-tratamentos químicos e combinados têm recebido uma maior atenção, já que removem a lignina sem degradar a cadeia celulósica, embora uma degradação parcial das hemiceluloses não possa ser evitada, já que a lignina está quimicamente ligada às hemiceluloses.

Um processo de pré-tratamento eficiente tem como principais resultados: elevada recuperação de carboidratos; elevada digestibilidade da celulose na hidrólise enzimática subsequente; elevada concentração de sólidos; elevada concentração de açúcares livres na fração líquida; baixa demanda energética; praticamente nenhuma formação de subprodutos; baixo investimento e baixo custo operacional (Santos, 2012).

Dentre estas técnicas de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, pode-se destacar a explosão a vapor, AFEX e utilização de ácido diluído como os métodos mais estudados e promissores no processo de obtenção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica.

#### **4.4.3. Pré-Tratamento da Palha**

---

O pré-tratamento comumente utilizado para a palha de cana tem sido o processamento físico, baseado na redução do tamanho das partículas. Esse processamento visa agregar valor a esses materiais por meio de sua classificação mecânica, o que permite obter um material de adequada composição físico-química para posterior conversão bioquímica ou termoquímica, e tem se destacado por ser eficiente, rápido e simples, quebra as ligações glicosídicas, o que favorece a acessibilidade das enzimas à celulose na etapa de hidrólise subsequente.

O processo hidrotérmico oferece várias vantagens: não requer o uso de ácidos e, conseqüentemente, não há necessidade de reatores altamente resistentes à corrosão, reduzindo o custo dos equipamentos.

Petersen *et al.* estudaram a otimização do pré-tratamento hidrotérmico de palha de trigo para a produção de etanol. Os experimentos mostraram que as melhores condições foram de 195 °C durante 6 min a 12 min, obtendo-se uma recuperação de aproximadamente 70 % de hemicelulose, 94 % de celulose, sendo que 89 % desta celulose podem ser convertidas em etanol.

#### **4.4.4. Cogeração na Segunda Geração**

---

A tecnologia 2G possui uma pegada de carbono ainda mais favorável que o da primeira geração, tanto pela baixíssima quantidade de CO<sub>2</sub> lançada na atmosfera, quanto pela plena utilização dos resíduos gerados.

A lignina, um dos subprodutos da produção do etanol 2G, é queimada junto com o bagaço para suprir a usina com o vapor e a energia elétrica necessários ao processo. Além disso, existe, ainda, a possibilidade de venda de eletricidade para a rede.

A cogeração<sup>21</sup> pode permanecer em operação durante onze meses no ano, o equivalente a oito mil horas, abrangendo o período de safra e entressafra das usinas.

#### **4.5. QUÍMICA VERDE**

---

Um importante caminho para agregar valor ao etanol é a rota bioquímica, hoje conhecida também como química verde.

Os plásticos ou termoplásticos – termos que designam, genericamente, uma diversificada família de polímeros artificiais – são uma alternativa aos materiais tradicionais, como vidro e madeira, além de novos usos no campo das embalagens e da construção civil (revestimentos e materiais estruturais).

A indústria petroquímica convencional utiliza essencialmente gás natural e nafta de petróleo como insumos, em processos agrupados em três categorias:

- a) primeira geração, que fornecem os produtos petroquímicos básicos, tais como eteno (ou etileno, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), propeno (ou propileno, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) e butadieno;
- b) as de segunda geração, que transformam os petroquímicos básicos nos chamados petroquímicos finais, como polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliésteres e óxido de etileno; e
- c) as de terceira geração, em que os produtos finais são quimicamente modificados ou conformados em produtos de consumo, como filmes, recipientes e objetos.

O etanol pode ser utilizado como insumo em diversos processos

---

<sup>21</sup> A GranBio tem o sistema de cogeração, em associação com a usina Caeté, do grupo Carlos Lyra, com uma capacidade de geração de vapor de 200 t/h. Com isso, a cogeração abastecerá as duas usinas e ainda vai exportar um excedente para a rede de 135 GWh/ano, o suficiente para o consumo de uma cidade de 300 mil habitantes.

tradicionalmente petroquímicos, conforme indicado na **Tabela 3.8** destacando-se a produção de eteno como resultado da desidratação do etanol, precursor de uma ampla gama de produtos de segunda geração, como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o policloreto de vinila (PVC).

Com base na equação de desidratação do etanol e assumindo uma eficiência de conversão de 95 %, tem-se um consumo específico de 1,73 quilos de etanol por quilos de eteno, ou 2,18 litros de etanol por quilo de eteno. Mediante a desidrogenação do etanol para acetaldeído, consegue-se obter outra classe de intermediários de grande interesse, butadieno e polibutadieno, componentes básicos das borrachas sintéticas utilizadas para diversas aplicações, inclusive pneus (CGEE, 2008).

**Tabela 3.8. Aplicações do processamento do etanol**

<b>PROCESSO</b>	<b>PRINCIPAIS PRODUTOS</b>	<b>APLICAÇÃO TÍPICA</b>
DESIDRATAÇÃO	Eteno	Resinas plásticas
	Propeno	Solventes
	Etilenoglicol	Éter etílico
DESIDROGENAÇÃO OXIGENAÇÃO	Acetaldeído	Fibras têxteis
		Ácido acético
ESTERIFICAÇÃO	Acetatos	Acetatos
	Acrilatos	Corantes
		Solventes
HALOGENAÇÃO	Cloreto de etila	Fibras têxteis
		Adesivos
		Fluidos refrigerantes
AMONÓLISE	Dietilamina	Produtos medicinais
	Monoetilamina	Resinas plásticas
DESIDROGENAÇÃO DESIDRATAÇÃO	Butadieno	Inseticidas
		Herbicidas
		Borrachas sintéticas

Fonte: Elaborado com base em Schuchardt (2001)

Praticamente todos os produtos listados na **Tabela 3.8** são de uso difundido nos setores industrial (tintas, solventes e adesivos), agrícola (fertilizantes e defensivos) e

de uso final (como fibras têxteis). Os mercados são significativos. A demanda mundial de etileno em 2005 foi de 105 Mt e em 2011 cresceu para 141 Mt (Warren, 2012). Com 10 % do etanol em substituição a outros insumos, seriam necessários 35 bilhões de litros, sendo a produção brasileira de etanol da ordem de 25 bilhões de litros no mesmo ano. O fator decisivo para o desenvolvimento desse mercado é o preço relativo do etanol frente aos demais insumos, já que as tecnologias básicas estão dominadas (CGEE, 2008).

### ***Plásticos biodegradáveis***

---

Em 2014, a produção mundial de plásticos foi de 250 Mt, sendo 25 % na China, enquanto o Brasil produziu 6,5 Mt. Esse enorme mercado em crescimento vem despertando grande preocupação ambiental, já que o rápido descarte e a difícil degradação pelo ambiente têm promovido o crescimento acelerado de resíduos. Após o uso, menos de 10 % dos plásticos são reciclados e a grande maioria é destinada a aterros, o que vem a exigir da natureza de 100 anos a 500 anos para a completa degradação desse material.

Além do aumento da reciclagem, outra opção eficaz para contornar esse problema é a utilização dos plásticos biodegradáveis, polímeros que, sob condições apropriadas do meio ambiente, degradam-se completamente em um curto espaço de tempo. No caso dos bioplásticos, ainda existe a importante vantagem de serem produzidos de fontes renováveis, como amido, açúcares ou ácidos graxos. Um exemplo de bioplástico é o ácido polilático (PLA), que é composto de monômeros de ácido lático, obtido pela fermentação microbiana. Outra possibilidade é obter os biopolímeros diretamente dos microrganismos, como é o caso do PHB (poliidroxibutirato), PHA (poliidroxialcanoatos) e de seus derivados, casos em que o biopolímero é biossintetizado como material de reserva energética de microrganismos.

O primeiro relato da obtenção de bioplásticos é da década de 1920, mas os estudos só foram retomados em meados da década de 1970, quando ocorreram as crises do petróleo. Atualmente, já são conhecidas tanto as estruturas quanto as rotas biossintéticas e aplicações de muitos bioplásticos, mas ainda existem importantes limitações para a produção em larga escala, como as condições especiais de crescimento requeridas para a síntese desses compostos, a dificuldade de sintetizá-los por meio de precursores de baixo custo e os altos custos da sua recuperação. Mesmo com a

utilização de microrganismos recombinantes capazes de fermentar fontes de carbono de baixo custo (e.g. melação, sacarose, óleos vegetais e metano), esses processos ainda não são competitivos com a produção convencional dos plásticos sintéticos (Luengo et al. (2003).

Além das questões econômicas, ainda é importante que o ciclo de vida desses biopolímeros seja positivo. Foi feita uma comparação para o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa na produção plásticos de origem fóssil – polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o politereftalato de etila (b-PET) – e dois poliésteres co-poliméricos produzidos com biomassa: P(3HA), com base no óleo de soja, e P(3HB), com base na glicose. Os fósseis ficaram na faixa de 80 MJ/kg de consumo energético e 1,5 a 3,0 kg CO<sub>2</sub>/kg de emissão, enquanto os biopolímeros consumiam entre 50 MJ/kg e 60 MJ/kg e emitiam 0,2 de CO<sub>2</sub> a 0,4 de CO<sub>2</sub> (Akiyama et al., 2003).

#### **4.6. CANA-ENERGIA**

---

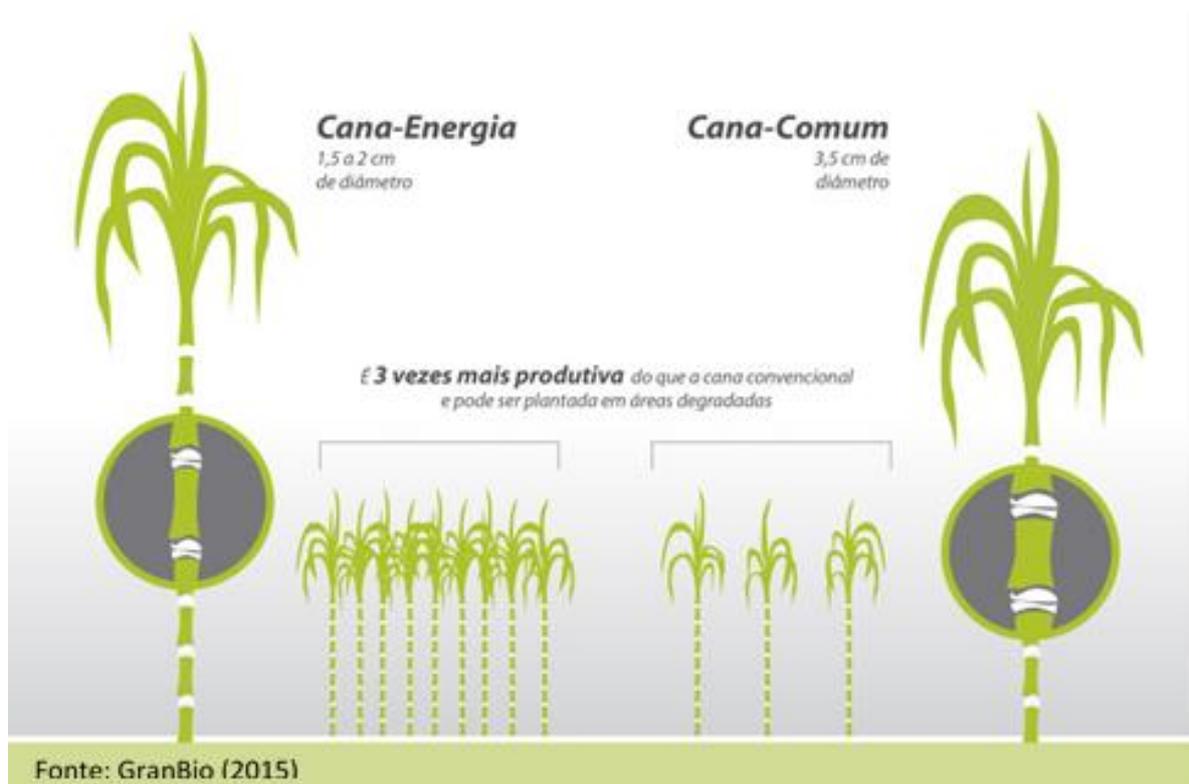
No aspecto da matéria-prima para o etanol celulósico, as maiores apostas são para a cana-energia, uma variedade desenvolvida a partir do cruzamento genético de tipos ancestrais e híbridos comerciais de cana-de-açúcar. O resultado é uma cana mais robusta, com maior teor de fibra e maior potencial produtivo, ideal como matéria-prima para a tecnologia do etanol celulósico e para os bioquímicos de segunda geração, que exige menos água e menos insumos para crescer; apresenta alta produtividade; pode ser colhida em qualquer período do ano; e pode ser plantada em áreas degradadas de pasto, - não competindo com alimentos<sup>22</sup>.

A GranBio tem a marca Cana-Vertix®, cujo primeiro plantio comercial está previsto para 2015, em Alagoas, região considerada de microclima ideal para hibridização e para a seleção desta variedade. Desde maio de 2013, a GranBio tem uma Estação Experimental no município de Barra de São Miguel, com 60 hectares de área, onde estuda, também, outras fontes de biomassa. O projeto tem como parceiros o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (Ridesa).

---

<sup>22</sup> O Brasil possui uma área de pastagens degradadas equivalente à área agricultável da Europa (32 milhões de hectares). Com uma política e incentivos apropriados, as áreas de pastagens degradadas podem ser ocupadas com plantio de cana- energia.

A **Figura 3.13** ilustra aspectos comparando a cana-energia e a cana tradicional, onde se destaca que a cana-energia pode ser plantada com espaçamento menor, possui menor diâmetro e é mais alta. As consequências dessas diferenças são, principalmente, a maior produtividade em massa de cana, com mais celulose, mas com menos açúcar recuperável (ATR), e pode ser colhida mesmo fora do período de safra pois não existe preocupação com a deterioração do açúcar.



**Figura 3.13. Comparação de aspectos da cana convencional e da cana-energia**

Segundo Violante (2012), o objetivo principal das pesquisas realizadas nas últimas décadas foi, principalmente, aumentar o teor de açúcar no colmo da cana, fato que limita os ganhos de produção de massa total de cana. O objetivo da cana-energia é maximizar a biomassa.

Matsuoka (1999, 2012) e Castro (2001) [apud Silveira, 2014], descrevem o melhoramento genético da cana-de-açúcar para obtenção de cana energia, de espécies como *S. spontaneum* e *Sccharum* spp. Dada a grande variabilidade genética existente na cana, a mudança de objetivo seria possível pelo retrocruzamento dos híbridos atuais com ancestrais selvagens de *S. spontaneum*, que configurariam alta produtividade, alto conteúdo de fibras, adaptabilidade a áreas marginais e rusticidade à cana-energia.

Violante (2012) estudou a produção de cana-energia em áreas degradadas e concluiu que:

- a população de híbridos de cana-energia apresenta diferenças morfológicas significativas em relação a híbridos de cana-de-açúcar tradicionais e apresentam altos teores de fibra, baixos teores de açúcar nos colmos e grande número de perfilhos por metro linear;
- entre os híbridos de cana-energia estudados, foram identificados alguns com produção de massa seca uma vez e meia a da cana-de-açúcar tradicional e mais ainda que a de outras fontes de matéria-prima para a bioenergia, como o capim-elefante e o eucalipto;
- devido ao alto potencial de ganhos de produtividade, a cana-energia pode se tornar a matéria-prima de mais baixo custo para a produção de bioenergia;
- existe, no Brasil, grande área disponível para expansão de culturas agroenergéticas, onde não haveria concorrência direta com as áreas destinadas à produção de alimentos; e
- dos 32 Mha de áreas de produção agrícolas marginais já identificados como aptos ao cultivo de cana-energia, no curto prazo, estariam disponíveis até 8 Mha para plantio.

Além desses aspectos favoráveis em relação ao uso da terra, outras características da cana-energia, que justificam os esforços para as pesquisas e desenvolvimento desta variedade, são descritas a seguir:

- ❖ possui alta capacidade de conversão do carbono atmosférico em carbono orgânico e alta densidade de energia;
- ❖ variedade de plantas adaptadas às condições de estresse e resistentes às pragas;
- ❖ não compete com a produção de alimentos, podendo ser plantada em regiões degradadas ou de expansão, impróprias para outras culturas, e pode ser usada no controle de erosões;
- ❖ apresenta técnicas de exploração dominadas;
- ❖ a colheita pode ser feita durante todo ano e pode ser armazenada; e
- ❖ se mantém estável durante pelo menos seis cortes e considera possível prever

pelo menos dez cortes através de cruzamentos entre *S. Spontaneum* e *S. Officinarum*, devido ao grande vigor da soca desse tipo de planta.

Segundo Veríssimo (2015), os programas mundiais de melhoramento genético na seleção da cana-energia têm sido direcionados para dois tipos: o primeiro, que apresenta alto nível de açúcar (acima de 15 % de sacarose) e alto teor de fibra (acima de 18 %), adequado para a produção de etanol celulósico para uso geral; e o segundo, com baixíssimo nível de açúcar (sacarose menor que 6 %) e elevado nível de fibra (acima de 28 %), para uso na geração de energia elétrica.

Ainda conforme Veríssimo (2015), desde o início da década de 1970, diversos países (Barbados, Cuba, Louisiana, Índia, África do Sul, Austrália, Ilhas Maurício e Ilhas Reunião) têm investido no desenvolvimento da cana-energia, com sucesso. No Brasil, já houve iniciativa de desenvolver a cana-energia na década de 1980, mas somente nos últimos cinco anos é que os programas ganharam força, devido à tecnologia emergente do etanol celulósico.

A cana-energia será uma variável significativa nos cenários apresentados a seguir, bem como para o sucesso do modelo proposto por esta tese.

## **5. MODELO PARA O ETANOL CELULÓSICO EM SETE CENÁRIOS**

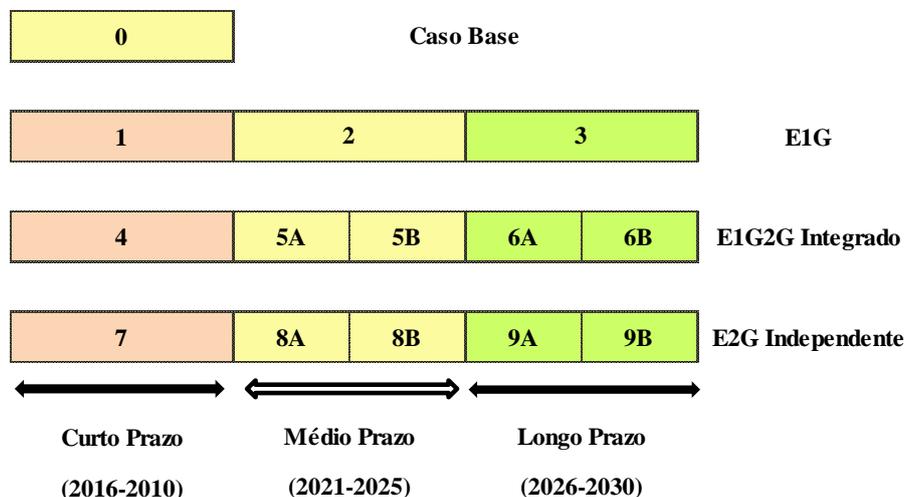
### **5.1. INTRODUÇÃO**

---

O modelo de negócio proposto demonstra ser possível superar as dificuldades para que a oferta de etanol seja perene e menos influenciada por fatores externos, por meio da otimização do aproveitamento integral da energia da cana. O pilar de sustentação do modelo é o desenvolvimento da tecnologia do etanol celulósico, que abre oportunidades na área agrícola (variedades de cana-energia, ricas em celulose, já apresentam o triplo da produtividade da cana convencional: 200 t/ha, contra 70 t/ha) e para o aproveitamento da energia disponível na palha.

Algumas das principais instituições atuantes no setor sucroalcooleiro, BNDES (AI/DEBIO), MDIC e CTBE/CNPEN, realizaram amplo estudo sobre as perspectivas do setor, construindo 14 cenários de curto, médio e longo prazo, para quatro tipos de usinas. Em cada um destes cenários são progressivamente incorporadas as tecnologias do etanol celulósico, bem como as práticas para o aproveitamento da palha e do

emprego da cana-energia (BNDES Setorial, abr. 2015)<sup>23</sup>. A **Figura 3.14** ilustra estes cenários.



Fonte: Milanez, 2015

**Figura 3.14. Cenários de produção de etanol (2016-2030)**

O modelo proposto é analisado para estes quatro tipos de usina, conforme descritos a seguir:

- ❖ **"Caso Base"**. Tipo de planta que representa a moda atual do estado tecnológico das empresas do setor, isto é, usina de açúcar com destilaria anexa, com capacidade de processamento na faixa de dois milhões de toneladas de cana convencional na safra, com equipamentos tecnologicamente obsoletos e sem integração energética, onde, geralmente, metade da cana é dirigida à produção de açúcar e o restante à destilaria de etanol. Este tipo de planta, que corresponde ao cenário de referência (cenário 0), tem o custo do E1G representativo da maior parte das usinas na região Centro-Sul e valida metodologias e premissas do estudo, sendo o referencial para cálculo do custo do E2G.

<sup>23</sup> Neste estudo foi utilizada a ferramenta Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar (BVC) desenvolvida pelo CTBE (Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol) para estimar o custo da produção do E2G em diversos cenários. Esta plataforma possibilita avaliar nos três eixos da sustentabilidade (econômico, ambiental e social), diferentes rotas e tecnologias integradas na cadeia produtiva da cana-de-açúcar e de outras biomassas. As premissas agrícolas, industriais e econômicas utilizadas no estudo foram discutidas e definidas com a ativa participação das principais empresas do setor.

- ❖ **"E1G"**. Tipo de planta que reflete, dentro do universo das usinas atuais, aquelas que já possuem equipamentos modernos, escala de produção e eficiência energética. A partir dessa estrutura, é prevista uma evolução de produtividade da cana convencional, a coleta da palha e o uso de cana-energia na entressafra, de modo a aumentar a eficiência e reduzir os custos de produção. Apesar do processamento de cana-energia, permanece produzindo apenas o EG1 e os ganhos de produtividade da cana convencional e da introdução da cana-energia são direcionados para a ampliação da geração de energia elétrica excedente.
- ❖ **"E1G2G integrado"**. Tipo de planta onde é prevista a construção de novas usinas (*greenfields*) com as mesmas características das plantas do tipo "E1G", mas incluindo um módulo para o EG2. Neste tipo de usina, o crescimento do volume de biomassa para processamento, devido aos ganhos de produtividade da cana convencional, à coleta da palha e ao uso de cana-energia (plantada nas áreas disponibilizadas pela maior produtividade da cana convencional), é preferencialmente direcionado para a unidade de etanol celulósico, em detrimento da geração de excedente de energia elétrica.
- ❖ **"E2G"**. Este tipo de planta é dedicado ao processamento de cana-energia, maximizando o conteúdo de MLC (matéria lignocelulósica) da biomassa a ser processada. A unidade fermentação é proporcionalmente menor do que nos outros tipos de planta, pois a quantidade processada de caldo de cana-energia é menor que a da cana convencional, enquanto o volume de etanol produzido a partir da hidrólise da lignocelulose é da mesma ordem de grandeza que do fermentado. Destaca-se que, para a mesma capacidade de moagem de usinas dos tipos anteriores (de 4 Mt/ano a 6 Mt/ano), a área plantada de cana-energia será a metade daquela de cana convencional.

## **5.2. CENÁRIOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DO MODELO**

---

O desenvolvimento do modelo industrial proposto considera os quatro tipos de planta descritos em 5.1, bem como as respectivas premissas, resultados e estimativas de custo de produção e de investimento assumidas naquele estudo para sete cenários selecionados.

Para as análises do modelo, nos cenários estabelecidos para os tipos de planta

que incluem tecnologia para produção de E2G, no médio e longo prazo, estão introduzidas duas rotas tecnológicas (Rotas A e B). A Rota A se refere a um processo com fermentações separadas de C5 e de C6 (açúcares, respectivamente, com cinco carbonos, xilose, e com seis carbonos, glicose) e a Rota B a um processo com co-fermentação de C5 e C6.

Os resultados não demonstraram diferenças significativas de custo entre os dois processos - a rota tecnológica tem mais importância para a recuperação dos açúcares e para a produção de E2G, que são maiores na Rota B, mais o maior custo neutraliza esse ganho.

Para os objetivos deste trabalho, a tecnologia de fermentação a ser utilizada é indiferente, desde que contempladas no modelo industrial as seguintes etapas:

- produção do etanol celulósico;
- coleta progressiva da palha; e
- introdução da cana-energia no processo.

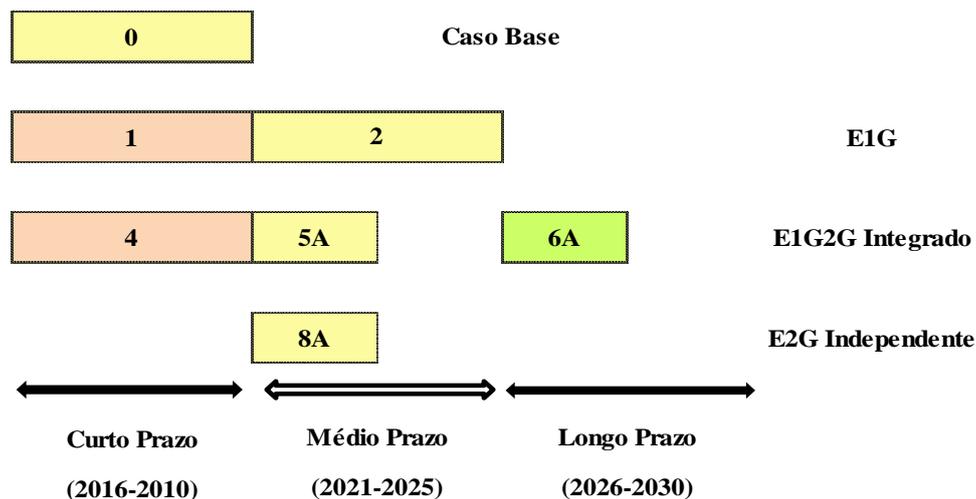
Neste contexto, além do “Caso Base” foram estabelecidos os seguintes critérios de seleção:

- ❖ produção de E2G empregando a Rota A (fermentações separadas de C5 e C6)
- ❖ um cenário de longo prazo (Cenário 6); e
- ❖ um cenário dedicado exclusivamente à cana-energia (Cenário 8).

Assim, os sete cenários estabelecidos para as análises dos tipos de planta correspondem aos seguintes cenários do estudo apresentado em 5.1, conforme ilustrados na **Figura 3.15**:

- Caso Base – cenário 0;
- curto prazo (2016 a 2020) – cenários 1 e 4;
- médio prazo (2021 a 2025) – cenários 2, 5A e 8A; e
- longo prazo (2026 a 2030) – cenário 6A

Apesar de existirem diversas alternativas<sup>24</sup> para uso das usinas na entressafra, estes cenários consideram usar apenas a cana-energia, devido ao seu grande potencial produtivo, para complementar ou, até mesmo, substituir a cana convencional. A safra da cana convencional é de 200 dias e a entressafra de 130 dias. A cana-energia não tem entressafra e pode ser processada também durante a entressafra da cana convencional.



Fonte: Elaboração própria, adaptada de BNDES (2015)

**Figura 3.15. Cenários para estudo da produção de etanol (2016-2030)**

A seguir são feitos alguns comentários sobre cada um desses cenários selecionados, bem como apresentadas as principais premissas agrícolas e industriais utilizadas.

- **Cenário 0 (Caso Base).** -. A área de colheita necessária para a capacidade instalada de moagem durante a safra é de 25 mil hectares, considerando a produtividade média das usinas do Centro-Sul. Para efeito deste trabalho, considera-se uma usina de açúcar com destilaria anexa, com produção de 54,4 kg/tc, empregando exclusivamente cana convencional, com baixa produção de energia, sem exportação de eletricidade.
- **Cenários 1 e 4.** Usinas com estrutura industrial com capacidade de processamento de 4 Mt de cana convencional por safra. A área agrícola é de 50

<sup>24</sup> O processamento de sorgo sacarino, milho e cana-energia para a produção de E1G e energia elétrica excedente já vem sendo implementado em algumas unidades industriais na entressafra de cana-de-açúcar. Entende-se que há espaço para maior utilização destas culturas à medida que novas variedades de plantas e aprimoramentos nos processos agrícolas e industriais estejam disponíveis (BNDES, abr. 2015).

mil hectares, mas estes dois cenários já consideram a coleta de 50 % da palha disponível para geração de excedente de energia elétrica (Cenário 1) ou E2G (Cenário 4).

- **Cenários 2 e 5A.** Usinas com a mesma estrutura industrial dos Cenários 1 e 4, porém associadas a um aumento de produtividade da cana convencional, no médio prazo, que disponibiliza cerca de 10 mil hectares para o plantio de cana-energia para processamento na entressafra. Com a cana-energia não há preocupação de perda de qualidade do açúcar como ocorre com a cana convencional ao final da safra. A restrição para a colheita da cana-energia está nos equipamentos, que devem ser adequados para o período de chuvas. A cana-energia é destinada para geração elétrica, no Cenário 2, e para produção de E2G, no Cenário 5.
- **Cenário 6A.** Basicamente uma continuidade do Cenário 5, em que no longo prazo, o aumento da produtividade da cana convencional libera mais de 16 mil hectares para o plantio de cana-energia, a ser processada ao longo da safra e da entressafra da cana convencional. São necessárias mais duas moendas, ampliando a capacidade de moagem para cerca de 6 milhões de toneladas de cana na safra.
- **Cenário 8A.** Este cenário, de médio prazo, requer uma estrutura agroindustrial nova, processando apenas cana-energia e produzindo apenas E2G e energia elétrica.

### **5.3. PREMISSAS**

---

A cana-de-açúcar convencional é, atualmente, o único insumo usado em grande escala para a produção de etanol 1G e de açúcar no Brasil, mas a introdução da cana-energia (CE), que é colhida integralmente, com palha e colmos, pode mudar significativamente os parâmetros do setor.

Em relação às premissas da biomassa, os cenários estudados consideram:

#### ***Para cana convencional***

---

- produtividade, nível de utilização de agricultura de precisão e de mecanização no plantio e colheita, bem como quantidade de palha recolhida, aumentam conforme o horizonte temporal, seguindo uma expectativa relativamente

otimista para o setor sucroenergético;

- valores típicos de consumo de insumos para correção do solo, para fertilização (aplicação de NPK, vinhaça, torta de filtro e cinzas) e para controle de pragas;

### ***Para cana-energia***

---

- aumento de produtividade conforme a cultura se estabelece e novas variedades estejam disponíveis no futuro;
- no médio prazo, substituição parcial do diesel, utilizado pelos caminhões e maquinários agrícolas, pelo biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça;
- otimização e evolução dos sistemas industriais (como a redução no consumo de vapor, devido à otimização energética, e o aumento no teor alcoólico do vinho);
- moagem com menor eficiência de extração de açúcares devido ao maior conteúdo de fibras, sendo processada na entressafra com a mesma moenda de 5 ternos que opera com cana convencional na safra, mas com eficiência de extração menor, cerca de 90 % (com moendas de 2 ternos e eficiência de extração seria de 80 %);
- as plantas tipo "E2G" possuem moendas de 2 ternos, processando cana-energia o ano todo e contam com uma planta de E1G para processar o caldo da cana-energia, que apesar de conter menos açúcares do que a cana convencional representa uma quantidade importante;
- as plantas tipo "E2G" que compram material lignocelulósico (MLC), como palha e bagaço, podem ser consideradas as únicas dedicadas a E2G, pois não produzem caldo e, portanto, não produzem EG1, mas não é o caso de nenhum dos cenários escolhidos para análise nesta tese.

Em ambos os casos, aplicam-se as seguintes premissas:

- no longo prazo, para plantio e colheita, foi considerado o uso de ETC (Estrutura de Tráfego Controlado), um maquinário ainda em desenvolvimento<sup>25</sup>; e
- o percentual máximo do uso de biogás em motores *dual-fuel*, para queima de biogás, é de 70 %, sendo o excedente empregado para a produção de energia elétrica

---

<sup>25</sup> Braunbeck, 2006 e Cardoso, 2015

A **Tabela 3.9** apresenta as composições das biomassas da cana convencional, colmos e palha, e da cana-energia, em base úmida e em base seca. A comparação, em base seca, entre os teores de sacarose e de fibras evidenciam as diferenças entre estes insumos, mostrando que a forma de aproveitamento precisa ser diferente. A cana-energia possui a metade do teor de sacarose da cana convencional, mas tem até o triplo da produtividade e pode ser colhida durante o ano todo. O baixo teor de sacarose faz com que não seja a matéria-prima adequada para os fabricantes de açúcar.

O aprimoramento das variedades da cana convencional sempre teve como meta o aumento da produtividade em função do teor de sacarose e não do volume de cana colhido. Característica oposta à da cana-energia, cujos ganhos de produtividade visam a quantidade de fibras gerada. O fato de ter a sacarose como meta secundária é que permite à cana-energia também ser colhida fora da safra, pois a deterioração da qualidade do açúcar, que ocorre ao final da safra, não tem a mesma importância que na cana convencional.

**Tabela 3.9. Composição das biomassas**

Componente	Colmos (CC)	Palha (CC)	Cana Energia	Colmos (CC)	Palha (CC)	Cana Energia
	% base úmida			% base seca		
água	70,3	15,0	66,8	-	-	-
sacarose	14,0	4,3	8,1	47,1	5,1	24,4
açúcares redutores	0,6	0,2	2,5	2,0	0,2	7,5
fibras	12,7	77,9	21,3	42,8	91,6	64,2
<i>celulose</i>	<i>6,0</i>	<i>32,4</i>	<i>10,0</i>	<i>20,2</i>	<i>38,1</i>	<i>30,1</i>
<i>hemicelulose</i>	<i>3,5</i>	<i>24,8</i>	<i>5,9</i>	<i>11,8</i>	<i>29,2</i>	<i>17,8</i>
<i>lignina</i>	<i>3,2</i>	<i>20,6</i>	<i>5,4</i>	<i>10,8</i>	<i>24,2</i>	<i>16,3</i>
outros	2,4	2,6	1,3	8,1	3,1	3,9
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Milanez, 2015

Na **Tabela 3.10** são apresentadas algumas das premissas para a produção da cana convencional, com base nos parâmetros atuais e considerando a incorporação da coleta da palha e a produção de biogás, e para as expectativas de plantio e colheita da cana-energia, em que a produtividade é esperada ser de, pelo menos, o dobro da produtividade da cana convencional, permitindo ainda 10 cortes por ciclo.

**Tabela 3.10. Principais premissas na produção da cana convencional (CC) e da cana-energia (CE)**

Tipo de usina		Base	E1G	E1G2G	E1G	E1G2G	E1G2G	E1G2G	E2G	
Horizonte temporal		Atual	CP	CP	MP	MP	LP	LP	MP	
Cenário		0	1	4	2	5	6	6	8	
Premissa	unidade									
tipo de cana		CC	CC	CC	CC	CE	CC	CE	CC	CE
produtividade agrícola	t/ha.ano	80	80	80	100	200	100	200	120	250
distância de transporte	km	25	35	35	35	35	35	35	35	23
longevidade	cortes/ciclo	5	5	5	5	10	5	10	5	10
plântio e colheita	manual (%)	30	10	10	0	0	0	0	0	0
	mecanizado (%)	70	90	90	100	100	100	100	0	100
	ETC (%)	0	0	0	0	0	0	0	100	0
coleta da palha	% do disponível	0	50	50	60	100	60	100	70	100
biogás	%	0	0	0	70	70	70	70	70	70

notas: CC: cana-de-açúcar; CE: cana-energia.

Coleta manual com queima

Na coleta da palha, fardos para distâncias maiores (50% da área total) e colheita integral para distâncias menores (50% da área total).

Valor máximo de biogás em motores dual-fuel (ciclo diesel adaptados para queima com biogás). Biogás excedente queimado para produção de energia elétrica.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Milanez, 2015

**Tabela 3.11. Parâmetros industriais dos cenários**

Tipo de usina	Base	E1G	E1G2G	E1G	E1G2G	E1G2G	E2G
Horizonte temporal	Atual	CP	CP	MP	MP	LP	MP
Cenário	0	1	4	2	5	6	8
Premissa							
produtos	etanol e açúcar	etanol e eletricidade	etanol e eletricidade	etanol e eletricidade	etanol e eletricidade	etanol e eletricidade	etanol e eletricidade
tecnologia	básica	otimização intermediária	otimização intermediária	otimizada	otimizada	otimizada	otimizada
pressão da caldeira	22 bar	65 bar	65 bar	65 bar	65 bar	65 bar	65 bar
consumo de vapor para etanol 1G (vapor de baixa pressão)	500 kg/tc	380 kg/tc	380 kg/tc	360 kg/tc	360 kg/tc	360 kg/tc	360 kg/tc
teor alcoólico do vinho (C6/C12)	70	70	70	85	85	85	85
processo de desidratação	destilação azeotrópica	peneira molecular	peneira molecular	peneira molecular	peneira molecular	peneira molecular	peneira molecular
custo da enzima para cada litro de etanol 2G	0	US\$ 0,13	US\$ 0,13	US\$ 0,08	US\$ 0,08	US\$ 0,06	US\$ 0,08
eficiência de extração do caldo da Cana Energia	0	0	0	90% com 5 ternos	90% com 5 ternos	90% com 5 ternos	80% com 2 ternos

notas:

tc: toneladas de

eficiência de extração de açúcar da cana convencional na moenda de 5 ternos: 96%

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Milanez.

A Tabela 3.11 apresenta os parâmetros industriais de cada cenário selecionado, destacando:

- otimização de caldeiras e do consumo de energia nos processos;
- produção dedicada ao etanol e eletricidade;
- teor alcoólico do vinho no médio prazo subindo de 70 % para 85 %;
- redução de custo da enzima no médio prazo, de US\$ 0,13 para US\$ 0,08 por litro de etanol;
- a eficiência de extração do açúcar da cana convencional na moenda de 5 ternos é de 90 %.

## 5.4. RESULTADOS DOS CENÁRIOS

### 5.4.1. Estimativa dos Custos de Produção da Biomassa

A partir das premissas apresentadas foram calculados os custos das diferentes biomassas, em cada cenário, com um programa do CTBE para modelagem de custos (Cana Soft).

A **Tabela 3.12** apresenta o custo de biomassa empregada em cada cenário, com base nos custos associados aos elementos da cana convencional (colmos e palhas) e no custo da cana-energia, em função das proporções do uso anual de cada uma dessas biomassas, com base nos dados disponíveis em (Milanez, 2015). Esse custo ponderado estabelece um índice relativo para comparação dos custos por cenário.

**Tabela 3.12. Custo dos colmos de CC, palha de CC e CE (colmo e palha)**

Tipo de Usina	Horizonte Temporal	Cenário	Colmos (CC)	Palha (PC)	Cana Energia (CE)	Proporção (% base seca)			Custo Ponderado
			R\$/t (base úmida)	R\$/t (base seca)	R\$/t (base úmida)	CC	PC	CE	R\$/t (base seca)
Base	Atual	0	64,10	0,00	0,00	100	0	0	215,75
E1G	CP	1	66,95	62,31	0,00	83	17	0	196,84
E1G2G	CP	4	67,38	62,31	0,00	83	17	0	198,01
E1G	MP	2	46,71	47,08	32,55	57	16	27	123,45
E1G2G	MP	5	47,68	47,08	32,95	57	16	27	125,63
E1G2G	LP	6	38,37	47,52	29,05	40	13	47	98,93
E2G	MP	8	0,00	0,00	29,52	0	0	100	88,87

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Milanez, 2015

Nota: O custo da palha é calculado como o custo adicional do recolhimento da palha em relação a um cenário

Foi calculado também o custo ponderado da biomassa, que serve como um índice relativo para comparação dos custos por cenário. São apresentados os custos em base úmida (apenas a palha em base seca) na parte superior da tabela e os custos

ponderados em base seca na parte inferior.

O custo da cana-energia é notadamente menor que o da cana convencional devido, principalmente, à sua maior produtividade e longevidade (número de cortes) em comparação com a cana convencional. Os principais fatores que contribuem para a diminuição dos custos das diferentes biomassas com o aumento do horizonte temporal são o aumento de produtividade, a substituição parcial do diesel por biogás gerado com a vinhaça (a partir do médio prazo) e o uso da Estrutura de Tráfego Controlado (ETC) para o plantio e colheita nos cenários de longo prazo.

Na **Tabela 3.13**, é apresentada a produção global de etanol e eletricidade resultantes do balanço de massa e energia do processo para os cenários avaliados.

**Tabela 3.13. Produtividade de etanol e eletricidade**

Tipo de Usina	Horizonte Temporal	Cenário	Etanol	Energia Elétrica	Etanol	Energia Elétrica
			litros/tc (base úmida)	kWh/tc (base úmida)	litros/tcs (base seca)	kWh/tcs (base seca)
Base	Atual	0	53,6	11,5	180,4	38,7
E1G	CP	1	84,9	174,3	235,8	484,1
E1G2G	CP	4	108,4	68,6	301,2	190,4
E1G	MP	2	76,6	201,5	209,4	551,1
E1G2G	MP	5	116,6	70,4	318,8	192,6
E1G2G	LP	6	121,1	68,0	334,7	187,9
E2G	MP	8	94,0	69,6	284,9	210,9

tc: cana total (CC + CE)

Biomassa seca inclui os sólidos totais da CC, da palha e da CE

Caso Base: usina anexa, com produção de 51,4 kg de açúcar por tonelada de CC. Baixa produção de eletricidade, sem exportação

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Milanez, 2015

Nos cenários das usinas convencionais (“E1G”), o excedente de bagaço adicional, gerado pela otimização dos processos, é totalmente destinado à cogeração de eletricidade e apresentam quantidades significativas em relação ao cenário base, superiores a 170 kWh/tc (cana convencional mais cana-energia). Entretanto, a produção de etanol 1G permanece nos níveis já alcançados pelas usinas mais eficientes em operação na atualidade.

Por outro lado, as usinas do tipo E1G2G apresentam menor cogeração (da ordem de 70 kWh/tc), mas o volume de etanol supera os 100 L/tc.

#### **5.4.2. Estimativas de Investimento Industrial**

---

As estimativas de investimento do estudo (BNDES, 2015) foram baseadas no banco de dados de investimento da Biorrefinaria Virtual do CTBE. As informações foram fornecidas por fabricantes de equipamentos e empresas de engenharia, contando ainda com dados de especialistas, da literatura e de outras fontes públicas.

As tecnologias de segunda geração (2G), por estarem ainda em desenvolvimento, apresentam maior incerteza na estimativa de investimento. Pelas diferenças temporais e tecnológicas dos cenários, foi considerado que as plantas industriais seriam “*greenfields*”, isto é, construídas sem infraestrutura ou planta anterior. Esta abordagem, favorece a comparação entre os cenários, principalmente para os casos integrados (“E1G2G”), dado que não há necessidade de avaliar as modificações necessárias em uma planta preexistente (“*brownfield*”) de modo a comportar as tecnologias 2G.

Desta forma, considerou-se a divisão da planta em dois setores, "1G + Interface" e "2G", como descritos a seguir.

##### ***Etanol Convencional (1G) + Interface***

---

O setor "1G + interface" engloba as áreas de produção tradicionalmente encontradas nas plantas atuais, como recepção e lavagem da cana, extração, tratamento e concentração do caldo, fermentação, destilação, geração e distribuição de vapor e de energia elétrica.

Assim, as áreas nas quais a infraestrutura pode ser compartilhada são estimadas considerando as diferentes capacidades calculadas para cada cenário. O investimento em biodigestão e custos de seguro, engenharia, urbanização, estrutura civil auxiliar, dentre outros, também foram alocadas neste setor.

Deve-se ter claro que, como mencionado anteriormente, os cenários que contemplam tecnologias integradas (E1G2G) consideram investimentos em plantas *greenfield*. Logo, de forma conservadora, ao não considerar a integração de tecnologias de E2G às usinas existentes, o estudo não faz simulações para investimentos *brownfield*, que tenderiam a ter menor custo de capital.

##### ***Etanol Celulósico (2G)***

---

No setor 2G, estão as unidades voltadas ao processamento do bagaço e/ou da

palha, como as áreas de pré-tratamento, separação de licor C5 e C6, propagação de organismos geneticamente modificados (OGM) e fermentação de C5 ou co-fermentação dos açúcares de segunda geração (C5 e C6).

As capacidades dessas unidades foram definidas de modo a suprir as necessidades da planta durante a safra e a entressafra, em função do processamento das diferentes biomassas em cada cenário. A cana-energia pode ser colhida também na entressafra da cana convencional.

O estudo também considera que a evolução temporal das tecnologias 2G, bem como da biodigestão, traria uma redução de 10 % no investimento nestas unidades nos cenários de médio prazo e de 20 % nos cenários de longo prazo, refletindo, com isso, os ganhos de escala e o avanço tecnológico dos fabricantes, estabelecendo um mercado para estes equipamentos e para novas soluções de engenharia.

### ***Investimentos e Custos de Produção***

---

As estimativas de investimento para a implantação de cada um dos diversos cenários são mostradas na **Tabela 3.14**, bem como a relação do investimento com a produção total de etanol. Os orçamentos foram feitos no mercado interno, com data de referência de julho de 2014, com o câmbio, R\$/US\$, a 2,30. Como a grande maioria dos equipamentos e serviços orçados são de fabricantes e empresas nacionais, não se espera um aumento de custos tão significativo. Não foi calculada a relação (US\$/L) para o caso base por não ser comparável com os demais devido à produção de açúcar.

A queda para o custo de produção do E2G está associada à contínua redução no tempo dos custos do capital, da biomassa e das enzimas. O custo de capital é da ordem de R\$ 0,60 por litro de E2G no curto prazo, sendo reduzido para patamares próximos a R\$ 0,20 por litro de E2G, no longo prazo. Essa redução é um reflexo de uma expectativa de queda gradual nos custos com equipamentos industriais e do aumento progressivo no rendimento de etanol nas plantas de segunda geração, reduzindo a relação CAPEX por litro de E2G produzido.

**Tabela 3.14. Estimativas de investimentos (em R\$ e US\$)**

Tipo de Usina	Horizonte Temporal	Cenário	Investimento (em R\$ milhões)			Produção de Etanol (em milhões de litros/ano)			Investimento (R\$/litro)
			1G e Interface	2G	Total	1G	2G	Total	
Base	Atual	0	366	0	366	107	0	107	
E1G	CP	1	1.004	0	1.004	340	0	340	2,95
E1G2G	CP	4	944	425	1.369	340	94	434	3,15
E1G	MP	2	1.088	0	1.088	438	0	438	2,48
E1G2G	MP	5	1.048	376	1.424	438	229	667	2,13
E1G2G	LP	6	1.349	437	1.786	562	427	989	1,81
E2G	MP	8	633	289	922	221	190	411	2,24

TC: Cana total (CC + CE)

Caso Base (Cenário 0): usina anexa, com produção de 51,4 kg de açúcar por tonelada de CC. Baixa produção de eletricidade, sem exportação

R\$/US\$= 2,30 (julho, 2014)

Tipo de Usina	Horizonte Temporal	Cenário	Investimento (em US\$ milhões)			Produção de Etanol (em milhões de litros/ano)			Investimento (US\$/litro)
			1G e Interface	2G	Total	1G	2G	Total	
Base	Atual	0	159	0	159	107	0	107	-
E1G	CP	1	437	0	437	340	0	340	1,28
E1G2G	CP	4	410	185	595	340	94	434	1,37
E1G	MP	2	473	0	473	438	0	438	1,08
E1G2G	MP	5	456	163	619	438	229	667	0,93
E1G2G	LP	6	587	190	777	562	427	989	0,79
E2G	MP	8	275	126	401	221	190	411	0,98

TC: Cana total (CC + CE)

Caso Base (Cenário 0): usina anexa, com produção de 51,4 kg de açúcar por tonelada de CC. Baixa produção de eletricidade, sem exportação

Fonte: Elaboração própria, a partir de Milanez, 2015

**Tabela 3.15. Estimativa dos custos de produção do E1G e E2G**

Horizonte Temporal	Cenário	EG1	EG2	Diferença EG2-EG1
		R\$/litro	R\$/litro	R\$/litro
Atual	0	1,019	-	-
CP	1	1,159	-	-
CP	4	1,159	1,528	0,369
MP	2	0,845	-	-
MP	5	0,845	0,769	-0,076
LP	6	0,756	0,550	-0,206
MP	8	0,845	0,727	-0,118

Fonte: Elaboração própria, a partir de Milanez, 2015

Em relação aos custos de produção (**Tabela 3.15**), os custos com a biomassa são reduzidos de um patamar de R\$ 0,40 por litro de E2G, no curto prazo, para aproximadamente R\$ 0,15 por litro de E2G, no longo prazo, devido à redução do custo de produção da biomassa no médio e longo prazos mostrados anteriormente.

A redução no custo com enzimas ao longo do tempo é uma premissa importante desse estudo.

## **5. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 3**

---

Os dados apresentados nesse Terceiro Capítulo sustentam o modelo de negócios a ser apresentado a seguir, no Capítulo 4, e suas principais premissas: a tecnologia do etanol celulósico, o aproveitamento da palha, o desenvolvimento da cana-energia e a estrutura agrícola, industrial e logística existente no setor sucroalcooleiro.

Esse modelo requer a atuação coordenada do Estado para sua efetividade, através de Políticas Públicas que promovam a entrada dessa nova tecnologia e dessa nova variedade de matéria-prima, bem como a modernização e otimização energética do parque existente.

## **CAPÍTULO 4 - UM MODELO PARA O SETOR**

### **1. RESULTADOS DA ANÁLISE SETORIAL**

---

Os capítulos anteriores demonstraram como a cana-de-açúcar é uma realidade na matriz energética brasileira, na preservação ambiental e nas atividades agroindustriais. Também, apontaram o baixo aproveitamento de seu potencial químico e energético e também indicaram uma nova janela de oportunidade que se apresenta com a tecnologia do etanol celulósico e a cana-energia.

A primeira grande transformação no setor decorreu das crises do petróleo, na década de 1970, e se consolidou graças à eficácia das políticas públicas implementadas pelo Proálcool. Os 20 anos seguintes foram caracterizados pelo baixo preço dos insumos energéticos no mundo, o que trouxe pouco estímulo ao desenvolvimento das fontes de energia renováveis.

A partir da virada do século, o crescimento dos preços da energia voltou a tornar atrativos para a iniciativa privada os investimentos em etanol. Ainda dentro do modelo consagrado no Proálcool, que consistia, principalmente, em destilarias anexas, mas aumentando o número e o porte das destilarias autônomas, com capacidade de moagem superior a um milhão de toneladas anuais, os investidores privados novamente transformaram o perfil setorial, trazendo grandes grupos, nacionais e internacionais, para a produção de combustíveis.

Estes novos *players*, apesar de contribuírem para o crescimento da produção de açúcar, tinham como o foco o etanol, tanto para a exportação quanto para o mercado interno, e não precisaram da intervenção do Estado, pois ainda faziam parte do mesmo paradigma de produção e de comércio. Desafortunadamente, a partir de 2007, as Políticas Monetárias do governo (políticas anti-inflacionárias) passaram a afetar o setor: na forma direta, retirando tributos da gasolina, portanto, ampliando sua vantagem competitiva com o etanol; e, na forma indireta, congelando durante anos os preços da gasolina no mercado doméstico, mesmo com a escalada de preços do petróleo no mercado internacional.

Como apresentado no primeiro capítulo, os investimentos na modernização e ampliação do setor foram substancialmente reduzidos, em um período extremamente favorável ao etanol hidratado: a produção interna de gasolina não era capaz de atender à

demanda e os preços da gasolina no mercado internacional estavam elevados, o que deveria ampliar as margens de comercialização do etanol. Isso representou mais um período adverso ao setor, afastando investimentos nos biocombustíveis.

Desta forma, conclui-se que é necessária uma reformulação do modelo de negócios do etanol, contando com a ação coordenada do Estado com os investidores privados e demais *stakeholders*, para implementação das medidas cabíveis, considerando que:

- no contexto internacional, a cana-de-açúcar brasileira apresenta evidentes vantagens comparativas e de cunho pluridimensional (ambiental, social, tecnológica e econômica);
- o setor passou, e continua passando, por ciclos de baixa atratividade de investimentos no Brasil, gerando ameaças de desabastecimento, e permanece vulnerável em relação às políticas de combustíveis e aos preços internacionais do petróleo e do açúcar;
- o desenvolvimento do etanol no Brasil deve-se ao sucesso do Proálcool e demais Políticas Públicas, sendo que algumas poderiam ser novamente adotadas; e
- apesar da competitividade internacional do setor e da excelência dos avanços na cultura da cana, a tecnologia de processos do etanol 2G e das biorrefinarias e a produção de enzimas ainda são temas dominados por grupos, empresas e instituições no exterior.

Nessa tese demonstra-se que um modelo de expansão setorial baseado na energia da cana, como combustível líquido e como fonte de bioeletricidade, pode reduzir as incertezas originárias do setor de petróleo e do mercado internacional de açúcar, trazendo benefícios sociais e ambientais ao país.

Algumas das dificuldades para que a oferta de etanol seja perene e menos influenciada por fatores externos foram expostas aqui. Em função disso, está sendo proposta uma reformulação do modelo de negócios, modelo esse que contemple o aproveitamento integral da energia da cana.

As principais dimensões desse modelo são o desenvolvimento da tecnologia do etanol 2G, as novas oportunidades na área agrícola, principalmente com a cana-energia, e o aproveitamento da energia disponível na palha. Valendo-se destes resultados, é construído e proposto um novo modelo para o setor, como apresentado a seguir.

## 2. NOVOS MODELOS INDUSTRIAIS

---

O modelo industrial proposto consiste na evolução do modelo tradicional, como apresentado na **Figura 3.5**, para duas outras linhas de atuação, não excludentes com as usinas em atividade e cujos fluxos de produção serão descritos mais adiante neste capítulo.

No modelo industrial tradicional, os dois principais insumos são o caldo e o bagaço da cana. A partir do caldo, são produzidos o açúcar e o etanol, enquanto o bagaço sustenta energeticamente todo o processo, gerando, em algumas usinas, um excedente de energia elétrica para venda à rede.

Historicamente, essa lógica produtiva buscava maximizar a oferta de açúcar, sendo a destilaria abastecida apenas pelo melaço, uma parcela de cerca de 20% do caldo que não podia ser aproveitada para fabricar o açúcar.

O Proálcool mudou essa lógica, promovendo o etanol a coproduto da usina, chegando mesmo, durante alguns anos, a ser a principal fonte de receita das empresas, que nesse período investiram fortemente em destilarias autônomas, que não produziam açúcar. Com a retração do mercado de etanol hidratado, muitas destas destilarias autônomas introduziram a fabricação de açúcar na linha de produção, para reduzir o risco, passando a se caracterizarem como destilarias anexas.

No entanto, é preciso destacar que a expansão da produção de açúcar é limitada por um mercado de tamanho já conhecido, enquanto o mercado do etanol pode chegar, no limite, ao tamanho do mercado de gasolina. Ou seja, a expansão da oferta de etanol pode e deve ser olhada com independência ao mercado de açúcar.

De toda forma, a estratégia do negócio sempre esteve voltada para a maximização do teor de açúcar disponível da cana, e para a produção de açúcar, colocando em plano secundário o etanol e em plano terciário a eficiência energética e a venda de energia elétrica para a rede. Nesse contexto, as características marcantes do setor eram o predomínio de grupos familiares no controle das cerca de 400 usinas produtoras, o alto grau de informalidade e a pouca atenção tanto à eficiência energética, quanto à gestão. As empresas atualizadas tecnologicamente e com administração profissional eram minoria.

Com o crescimento dos preços da energia, ao final dos anos 1990, diversos grupos, nacionais e internacionais, entraram no setor com foco nos combustíveis

renováveis: etanol e bioeletricidade. Isso transformou o paradigma do setor para as plantas a serem construídas, *greenfields*, que apresentavam características básicas de uma destilaria autônoma (sem produção de açúcar), com capacidade de moagem de dois milhões de toneladas de cana, colheita mecanizada e venda de energia elétrica como relevante subproduto.

No entanto, o descasamento entre a estratégia de negócio e o modelo de produção permaneceu. Essas usinas seguiam a estratégia de negócios já em vigor, vulnerável às oscilações dos preços do açúcar e do petróleo, um modelo que evoluiu, com sucesso, a partir do açúcar, tendo como alvo o mercado internacional de açúcar. O resultado dessa fragilidade foi uma nova crise, já descrita anteriormente.

O novo modelo industrial proposto estabelece uma reformulação da estratégia de negócios do setor, através de uma mudança de sua estratégia de produção. A cana-energia e a tecnologia do etanol celulósico introduzem variáveis relevantes no balanceamento para obter a melhor forma de utilização do canavial e da energia da cana. A atividade industrial passa a ser mantida durante todo ano, acabando-se com a entressafra de quase quatro meses. O aproveitamento da palha e a maximização da eficiência energética dos processos encaminham o setor para uma vertente com a estratégia de negócios das biorrefinarias direcionadas para energia, combustíveis e química verde, sem que o setor deixe de ser a potência sucroalcooleira mundial.

### **Otimização**

---

Qualquer que seja o modelo a ser adotado para uma nova estratégia de negócio, o primeiro passo deve ser buscar a incorporação de inovações, tecnologias, técnicas e práticas disponíveis e em desenvolvimento. Algumas podem ser citadas, a partir de estudos do CTBE (Dias, 2012), da Unica (2011) e do BNDES (Nyko, 2010):

- ❖ eliminação da necessidade de lavagem de cana e/ou lavagem a seco;
- ❖ extração de ATR (Açúcar Total Recuperável) próxima a 98%;
- ❖ tratamento de caldo específico para atender fermentação estável, sem contaminações, com remoção eficiente da matéria em suspensão; - pré-concentração de parte do caldo, para fermentar o mosto com alto grau alcoólico no vinho final; esterilização do mosto;
- ❖ fermentação contínua em três estágios, com reciclo de fermento;

- ❖ temperaturas abaixo de 34°C, vinho final acima de 12°GL e rendimento fermentativo da ordem de 92%;
- ❖ destilação e retificação em coluna única, e desidratação com peneiras moleculares;
- ❖ automação completa da destilaria; evaporadores de múltiplos efeitos, para concentração a 50% do volume de vinhoto 'in natura'; e
- ❖ máxima produção de energia elétrica, empregando, pré-secagem de bagaço, geração de vapor a 65 bar, no mínimo, e turbogeradores de alta eficiência.

Assim, a estratégia de negócios do novo modelo é baseada na transformação da estratégia de produção que atenda à eficiência energética das usinas e à maximização do aproveitamento da cana (caldo, bagaço e palha) e da cogeração de energia elétrica, além da incorporação de unidades para etanol celulósico, estabelecendo, com isso, condições empresariais e políticas que permitam reduzir as incertezas que hoje existem na oferta de etanol e ampliando a sustentabilidade da matriz energética brasileira.

As **Figuras 4.1 e 4.2** apresentam o diagrama de blocos referentes ao modelo proposto, composto por duas linhas: "*greenfield* celulósico" e "módulo de hidrólise".

#### ***Linha Greenfield Celulósico***

---

Esta linha visa atender a expansão da oferta de combustíveis, com implantação de *greenfields* dedicados ao etanol 2G, buscando paralelamente o desenvolvimento de variedades da "cana-energia" como insumo preferencial. Essas usinas podem utilizar como insumo tanto palha quanto bagaço, além da cana-energia, mas seu grande diferencial é o dimensionamento adequado dos equipamentos e a possibilidade de funcionar fora dos períodos da safra, que vai de março a novembro.

#### ***Linha Módulo de Hidrólise***

---

Esta linha visa alterar a estratégia de produção das usinas já em operação (*brownfields*), mas com bom potencial para otimizações tecnológica e energética, onde são implantados módulos de hidrólise para processar o excedente de bagaço e/ou a palha e para produzir etanol 2G conjuntamente com o etanol convencional. Estima-se que podem ser produzidos mais 40% de etanol com o mesmo volume de cana.

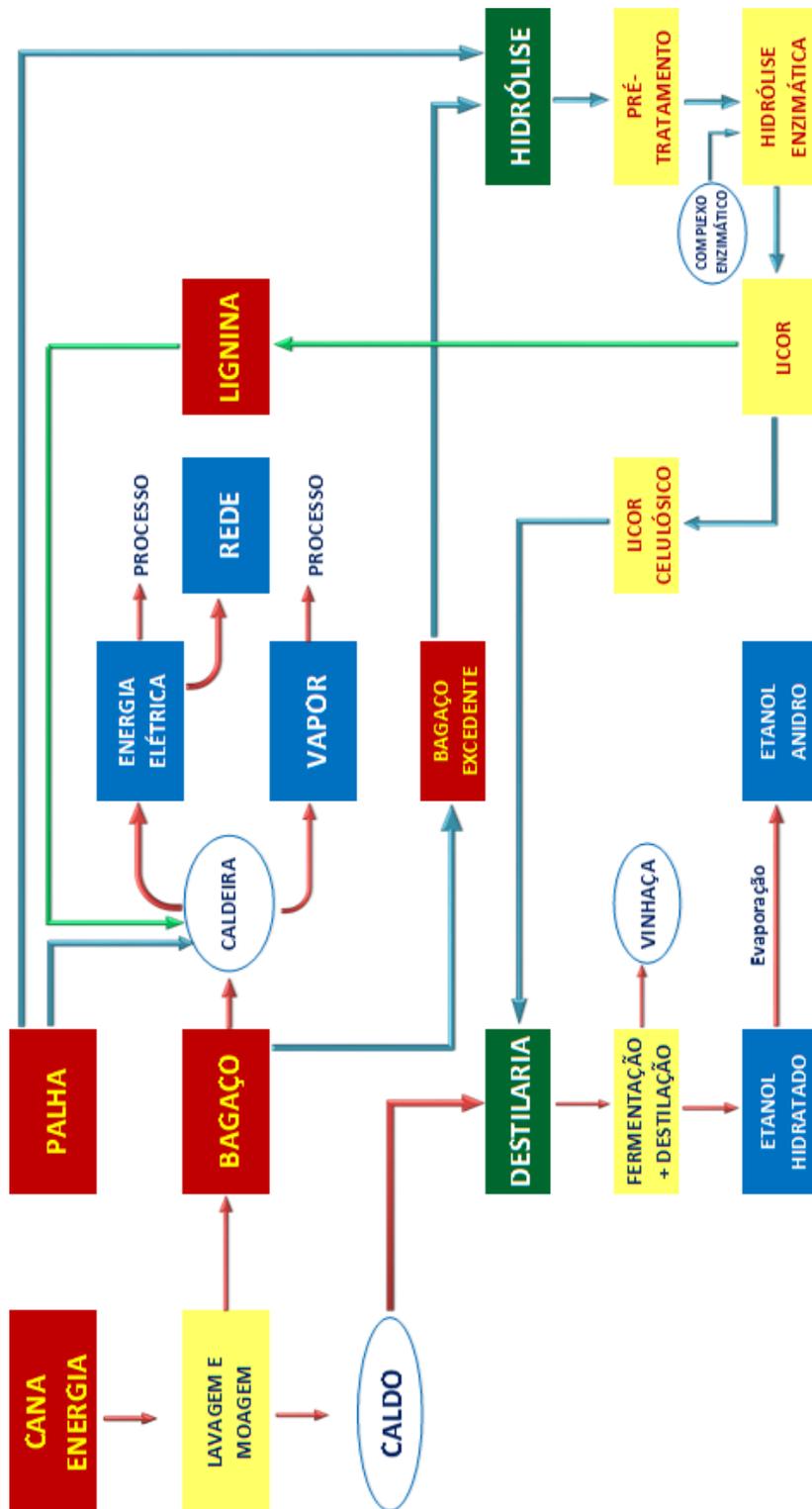
Os "7 Cenários" apresentados no terceiro Capítulo comprovam a viabilidade

econômica da incorporação dessas três novas variáveis (palha, cana-energia e etanol celulósico) na estratégia de produção das usinas, bem como a sua compatibilidade com as duas linhas do modelo. Os produtos seriam, nos *greenfields*, o etanol (1G e 2G) e a energia elétrica e, na linha do módulo de hidrólise, além desses, a fabricação de açúcar.

Poderia ser considerada ainda uma terceira linha, em que seria processada apenas a biomassa celulósica (bagaço e a palha), sem moagem e extração de caldo, ou seja, uma biorrefinaria totalmente dedicada ao E2G. Para tal, seria necessário adquirir a palha e o bagaço excedente de outros produtores de açúcar e etanol convencional, como é feito pela GranBio, em Alagoas, e já é usado pela Beta Renewables em Crescentino, na Itália. Apesar do menor custo de capital por requerer menos equipamentos, como as moendas, essa linha não está sendo considerada dentro do modelo, pois deixa a produção muito exposta ao risco dos fornecedores. A GranBio fez contratos de longo prazo para garantir o suprimento de palha, mas suas futuras unidades devem produzir também o E1G, ou seja, com moagem da cana e fermentação do caldo, gerando seus próprios insumos lignocelulósicos (palha e bagaço).

No diagrama da **Figura 4.1** a cana-energia é o insumo majoritário (não é vedado o uso da cana convencional) e segue o mesmo fluxo de uma usina convencional, passando pelas moendas para extração do caldo. O bagaço permanece como a principal matéria-prima das caldeiras (na geração de vapor e eletricidade), mas agora conta com a palha e da lignina, esta originária da hidrólise da lignocelulose, também alimentar as caldeiras. Em termos de processo, na destilaria, além do caldo da cana, agora é processado o licor celulósico, proveniente da hidrólise da palha e do bagaço. O principal conjunto de equipamentos, que não fazem parte do fluxo tradicional de uma usina de cana, são aqueles relativos ao pré-tratamento e à hidrólise da lignocelulose.

A **Figura 4.2** apresenta o diagrama de uma usina convencional, que pode ou não) produzir açúcar, além do etanol, onde está inserido um módulo de processamento do material lignocelulósico da palha e do bagaço. Aqui também o licor celulósico é fermentado e destilado conjuntamente com o caldo. Destaca-se que, em um *greenfield* para etanol celulósico, o dimensionamento dos equipamentos e das utilidades é feito de no projeto da fábrica, enquanto a inserção de um módulo de hidrólise requer a adequação e redimensionamento destes equipamentos e utilidades na usina que já opera.



Fonte: Elaboração própria, baseado em CGEE (2008), Nogueira Horata (2009) e Bonomi (2011)

**Figura 4.1. Linha de produção de etanol celulósico**



modelo proposto, com investimentos e inovações tecnológicas, como os descritos a seguir.

### ***Recolhimento da palha***

---

Com a mecanização de mais de 85 % da colheita, o volume de palha deixado no campo é muito grande e a maior parte precisa ser retirada, assim, o desenvolvimento de equipamentos específicos (não adaptados de outras colheitas) para coleta, enfardamento e transporte e queima da palha da cana-de-açúcar trarão aumento da eficiência e redução de custos.

### ***Cana-energia***

---

As áreas exploratórias plantadas com essas variedades da cana já apresentam produtividades superiores a 200 tc/ha. Culturas experimentais de cana-energia transgênica já atingem 280 tc/ha, como já abordado em capítulos anteriores. Além disso, por não serem voltadas para a maximização do açúcar total recuperável (ATR) podem ser colhidas mesmo fora do período de safra e, pela sua maior resistência, são indicadas para áreas degradadas.

### ***Pré-tratamento na planta de hidrólise***

---

Esta, hoje, é a etapa crítica dos processos enzimáticos, pois as eficácias das aberturas da celulose, da hemicelulose e da lignina determinam a maior ou menor recuperação dos açúcares na hidrólise. Os maiores desafios das plantas em operação, ainda numa etapa adaptação e ajustes (*try-out*), são de natureza mecânica e corrosiva, principalmente pela a quantidade de impurezas que ainda estão acompanhando a carga dos reatores.

### ***Enzimas***

---

Alguns gigantes da indústria química, como Dupont e Novozymes, vêm investindo pesadamente na busca de micro-organismos eficientes para hidrólise e que sejam eficientes, em conjunto ou separadamente, nos processamentos da celulose e da hemicelulose, produzindo hexoses (C6) e pentoses (C5) para fermentação. No momento, as enzimas são eficientes para tratar as hexoses, mas ainda estão sendo buscadas enzimas para a hidrólise das pentoses, seja em conjunto com as hexoses, seja separadamente. As enzimas são responsáveis pela maior fatia dos custos de produção do etanol 2G, e as perspectivas de curto prazo são otimistas, principalmente para redução

dos custos das hexoses.

Assim, as principais etapas do modelo a serem percorridas são:

- 1) otimização tecnológica e energética de usinas;
- 2) inclusão de módulos para processamento de etanol celulósico nesse grupo de usinas, para aproveitamento da palha e do bagaço excedente gerado com a otimização dos processos;
- 3) desenvolvimento de variedades da cana-energia e massificação do seu plantio; e
- 4) implantação de novas usinas já dimensionadas e dedicadas a priorizar a produção do etanol celulósico juntamente com o convencional e sua integração a biorrefinarias para agregação de valor.

A estrutura deste modelo emula, para a cana, a lógica da cadeia do petróleo, fortalecendo os negócios no âmbito dos combustíveis, da energia elétrica e da química verde, reduzindo com isso as incertezas que hoje inibem seu crescimento.

Como a proposta busca resolver um problema macroeconômico (incerteza na oferta de combustíveis) com decisões microeconômicas (escolha de um modelo de negócio pelas empresas), é preciso ação do Estado, através de Políticas Públicas.

#### **4. O ETANOL CELULÓSICO NO BRASIL E O MODELO PROPOSTO**

---

Vários países vêm apoiando o desenvolvimento científico e tecnológico, a implantação de plantas-piloto, a ampliação da demanda e a maior inserção do E2G na matriz energética, através de diversos mecanismos públicos de incentivo.

No Brasil, os recursos estão sendo direcionados para P&D&I, pelo lado da oferta. Os mecanismos de estímulo ao consumo de E2G podem ser sob a forma de mandatos, como vem sendo praticado nos EUA, com o etanol de milho, e no Brasil, com o etanol anidro.

Milanez (2015) considera o etanol celulósico no início de sua curva de aprendizado, com significativas barreiras a serem transpostas, bem como oportunidades de aumento de eficiência, sobretudo nas etapas de produção de biomassa, enzimas e equipamentos. O mercado de etanol não possui as limitações do mercado do açúcar e, assim, a expansão da oferta devido às novas usinas, às novas tecnologias e aos ganhos de produtividade da indústria sucroalcooleira poderão ser absorvidos facilmente pelo

aumento do consumo de combustíveis renováveis no Brasil e no mundo.

Em termos de desenvolvimento tecnológico, as principais atividades estão voltadas para a hidrólise enzimática, para o pré-tratamento e para as enzimas, como apresentado na **Tabela 4.1**.

**Tabela 4.1. A corrida tecnológica no Brasil**

INSTITUIÇÕES	HIDRÓLISE			PLANTA PILOTO			
	PRÉ-TRATAMENTO	ENZIMÁTICA (HE)	ÁCIDA (HA)	FERMENTAÇÃO C5	HA	HE	GASEIFICAÇÃO
CTC	●	●				●	
DEDINI	●		●		●		
NOYOZYMES		●					
CTBE	●	●		●		●	
PETROBRAS	●	●		●		●	
Fapesp-Bloen	●	●	●				
Rede de Hidrólise	●	●		●		●	
IPT							●

Fonte: Elaboração própria com base em BNDES/DEBIO, 2014.

O estímulo a investimentos em novas plantas de E2G deve contemplar toda a cadeia produtiva, destacando os fabricantes de enzimas e de equipamentos agroindustriais, resultando em ganhos de escala e redução de custos, além do desenvolvimento científico e tecnológico.

Diversas iniciativas industriais em sintonia com esse modelo se encontram em fase inicial de operação no Brasil, com a linha de "greenfield celulósico" e a linha de "módulo de hidrólise". A única planta-piloto é da Usina São Manoel, com tecnologia do CTC (Centro de Tecnologia Canavieira). A Petrobras vem pesquisando o 2G, desde 2004, e planeja uma unidade comercial, inicialmente estava para 2015/2016. As unidades de 2G em implantação ou em início de operação são:

- 1) GranBio: primeira unidade comercial de 2G no Brasil (Alagoas), inaugurada em 2014. Usa tecnologia italiana da Beta Renewables (Proesa TM). A capacidade instalada é de 80 milhões de litros por ano, a partir da palha.
- 2) CTC: planta-piloto em fase final de instalação na Usina São Manoel, com

capacidade para 5 milhões de litros por ano. A tecnologia vem sendo desenvolvida pelo próprio CTC em Piracicaba.

- 3) Raízen: unidade comercial inaugurada em 2014, na Usina Costa Pinto (Piracicaba) com capacidade para 40 milhões de litros por ano. A tecnologia é da norte-americana IOGEN e enzimas fornecidas pela Novozymes e/ou pela Codexis (esta pertence à Raízen).
- 4) Abengoa Bioenergia: planta de etanol 2G para 2015, integrada à usina São Luiz em Pirassununga.
- 5) Odebrecht Agroindustrial (antiga ETH): planta de etanol celulósico programada para 2015, com tecnologia dinamarquesa da Inbicon.

## **5. VALIDAÇÃO DO MODELO POR ESPECIALISTAS**

---

Foi buscado validar o modelo através da realização de entrevistas com especialistas de empresas, universidades, centros de pesquisa, instituições de fomento e apoio a pesquisa e desenvolvimento, instituições de financiamento e entidades de classe. No **Anexo I** encontra-se o "Roteiro de Entrevistas", com perguntas buscando conhecer a opinião dos especialistas e a relevância para eles das questões centrais desta tese, voltadas à definição de políticas que estimulem e suportem os mecanismos necessários ao aproveitamento mais eficiente da energia da cana-de-açúcar.

A síntese das entrevistas confirma a importância do domínio da tecnologia do etanol de segunda geração, confirma a necessidade de otimização e modernização dos processos convencionais, o desenvolvimento de equipamentos para coleta e aproveitamento efetivo da palha e a introdução da cana-energia no canavial.

Foram discutidas com os especialistas as vantagens e desvantagens da instalação integrada ou a instalação autônoma do etanol celulósico. Segundo eles, o módulo de hidrólise só faz sentido em uma fábrica com capacidade ociosa ou que modernize equipamentos tais que gerem essa capacidade ociosa em outros, como é o caso das caldeiras de maior potência, que por serem mais eficientes na geração de calor e eletricidade, deixam de consumir uma parcela do bagaço, que então pode ser hidrolisado.

Os entrevistados lembram, ainda, o problema de capacidade ociosa é que ela pode tornar-se volátil, dependendo da quantidade de cana que é disponibilizada na safra. Além disso, é difícil encontrar um moinho com capacidade ociosa no fluxo total, por

exemplo, ociosidade na caldeira e no destilador, mas tomada na fermentação. Outro moinho tem disponibilidade no destilador e na fermentação, mas não na caldeira.

Além disso, existe o desconhecimento e a dificuldade de previsão dos gargalos e das ociosidades na operação com 2G, seja no módulo integrado ou não. Num projeto de expansão do etanol convencional, todos os parâmetros já são bem conhecidos.

Todos concordam que a maior vantagem de inserir um módulo de hidrólise integrado numa usina convencional são as sinergias com os equipamentos de uso comum, bem como no manuseio das matérias-primas, como bagaço e palha, e das utilidades como a geração de vapor e energia elétrica.

Muitos entendem que os custos de capital com o módulo de hidrólise só serão recuperados em longo prazo, ainda mais se a planta operar apenas na safra (220 dias por ano), já que estaria conjugado com o etanol convencional. Nesse caso, a introdução da cana-energia no programa de rodízio do canavial seria uma variável decisiva, pois manteria a operação por 330 dias no ano, como nos projetos greenfield de E2G.

Um aspecto novo que surgiu das entrevistas foi sobre as dificuldades para o uso de OGM (organismos geneticamente modificados) nas usinas já em operação, pois as questões relativas às autorizações legais ainda não estão regulamentadas. Foi colocado que uma das ações para redução dos custos do etanol de segunda geração seria a produção dos OGM na própria usina.

Chama atenção de alguns entrevistados, a insegurança jurídica gerada pelo marco regulatório vigente a nível federal sobre a biotecnologia, que é a área do conhecimento mais demandada no atual estágio do desenvolvimento do etanol 2G. Uma das principais barreiras ao investimento privado para P&D em biotecnologia avançada é esta questão jurídica.

Pelo aspecto dos Recursos Humanos, a carência de profissionais familiarizados com técnicas modernas demonstra a necessidade de articulação com o Ministério da Educação, a fim de estabelecer um programa mais extensivo em biotecnologia industrial.

Existe um consenso que existe espaço para as duas linhas de introdução da tecnologia do E2G, mas os especialistas também entendem que a introdução dos módulos de hidrólise tem mais possibilidades nas usinas que operam no 'estado-da-arte', pois podem ampliar a geração de bagaço excedente, com novas e mais potentes

caldeiras, e o elevado grau de mecanização da lavoura permite melhor organização na coleta e no uso da palha, além da lignina, subproduto da hidrólise, como matérias-primas adicionais da caldeira, gerando mais bagaço para a hidrólise.

As barreiras à cogeração apontadas são a inércia nas ligações com a rede elétrica, as dificuldades de acesso aos financiamentos de longo prazo do BNDES (naturalmente o BNDES exige um nível de formalidade nas atividades empresarias que não é do interesse de muitos dos proprietários das usinas), apesar da abundância de recursos disponibilizados pelos Programas específicos do setor, como o PAISS, e a inexistência de contratos de longo prazo (CCVE), como existiram no Proinfa.

O papel do Estado também é visto como um fator de incertezas para os investidores, tanto para a cogeração, quanto para a ampliação da produção de etanol, celulósico ou convencional, tendo em vista o comportamento recente de 'congelamento' dos preços da gasolina por sete anos. Por essa razão, o setor precisa de uma política de médio e longo prazo.

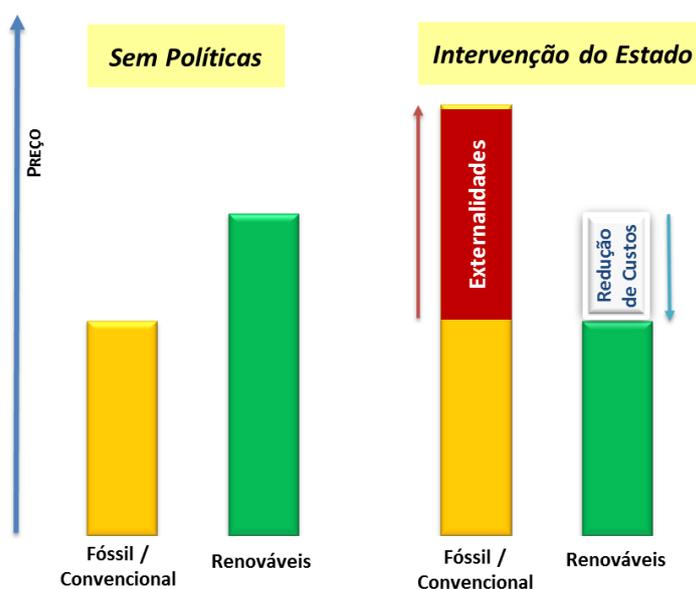
Por outro lado, o papel do Estado também foi destacado como indutor das transformações setoriais, com as Políticas Públicas consideradas essenciais para o estabelecimento dessas mudanças nas estratégias de produção das empresas e na estratégia de negócios dos empresários.

Finalmente, alguns especialistas consideram a geração de energia elétrica uma alternativa tão ou mais importante que o etanol celulósico, pois traria melhorias no rendimento energético do aproveitamento da cana com investimento menor e com retorno de curto prazo. No entanto reconhecem que o domínio da tecnologia do etanol celulósico traria um efeito multiplicador muito mais abrangente na indústria e no conhecimento científico, bem como transformaria a estratégia de negócios do setor, o que não ocorreria necessariamente com a maximização da geração de energia elétrica. O foco na produção de açúcar reduz o risco empresarial, mas não traz estímulos à redução do desperdício da energia da cana, que pode ocorrer na forma de etanol celulósico, ou na maximização da geração de eletricidade.

## CAPÍTULO 5 - POLÍTICAS PÚBLICAS PARA NOVAS FONTES DE ENERGIA

A reformulação da estratégia de negócios e da estratégia de produção do setor só pode ter sucesso com a participação efetiva do Estado, através de Políticas Públicas que contemplem ações para agricultura, indústria, inovação, tecnologia, energia e meio-ambiente.

As energias renováveis, onde se inclui o etanol celulósico, demandam estratégias para viabilizar suas introduções na economia onde o papel do Estado é fundamental. No curto prazo, os preços dos combustíveis fósseis geralmente se encontram em condições mais favoráveis que dos combustíveis renováveis entrantes, devido a três motivos principais: primeiro, por já ter transposto a curva da maturação e ter um mercado regulado por oferta e demanda; segundo, porque os investimentos para redução de custos dos combustíveis renováveis ainda não tiveram tempo para agir; e terceiro, porque as externalidades que precisam ser incorporadas aos preços dos combustíveis fósseis necessitam da intervenção do Estado. A **Figura 5.1** mostra o impacto que pode resultar das Políticas Públicas, ao considerar a incorporação dos custos ambientais e demais externalidades, na competitividade das energias renováveis.



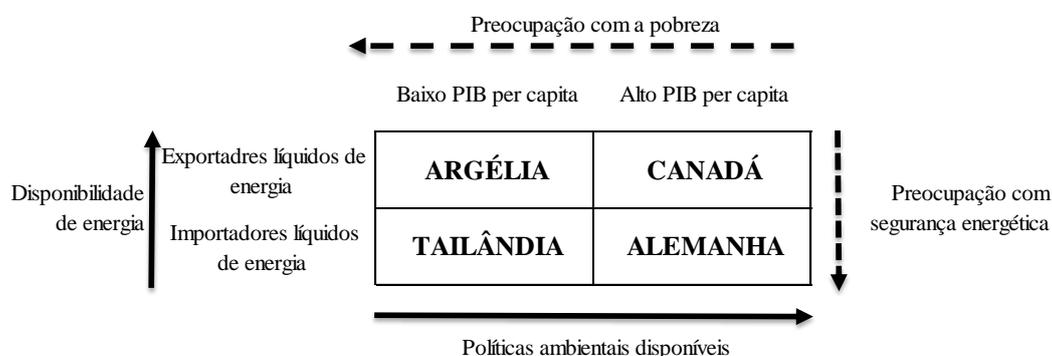
Fonte: Muller, 2011

**Figura 5.1. Impacto das Políticas Públicas na competitividade das energias fósseis e renováveis**

A partir dessa ilustração esquemática da **Figura 5.1**, pode ser feita uma analogia com o etanol e a energia eólica: o Proálcool, deu competitividade ao etanol combustível pela redução de custos conquistada pelos ganhos de produtividade; e, na história recente, o Proinfa e outros programas de governo, viabilizaram a competitividade da energia eólica na matriz elétrica em todo mundo, graças ao ganho de escala. As políticas para o etanol de milho e para o biodiesel nos setores de transporte norte-americano e europeu, respectivamente, também vem sendo bem-sucedidas.

O fracasso comum desses programas foi a dificuldade em incorporar externalidades aos combustíveis fósseis. As Políticas Públicas foram eficientes para dar competitividade às fontes renováveis, mas é preciso destacar que os elevados preços da energia dos últimos 20 anos também tiveram um papel relevante no estímulo aos investimentos.

Esse quadro mudou e pode permanecer assim por um período indefinido, como ocorrido após o Contra-Choque do petróleo. Os baixos preços do petróleo, do gás e do carvão prometem ser um forte obstáculo às energias limpas, caso não seja precificada a emissão dos gases de efeito estufa (GEE). A **Figura 5.2** exemplifica arranjo de países em função das condições de contorno estabelecidas pelo PIB e disponibilidade de energia, vetores para o estabelecimento de estratégias e a definição de investimento em energias renováveis. As preocupações das nações são diversas e, se forem considerados temas como combate à pobreza e segurança no suprimento de energia, pode-se observar que o comportamento com relação às políticas ambientais será maior para os países mais ricos e que são importadores líquidos de energia, como a Alemanha. No outro extremo estarão os países exportadores de energia e com baixa renda per capita, como a Argélia. Ou seja, quanto maior a renda maior a preocupação ambiental.



Fonte: Muller, 2011

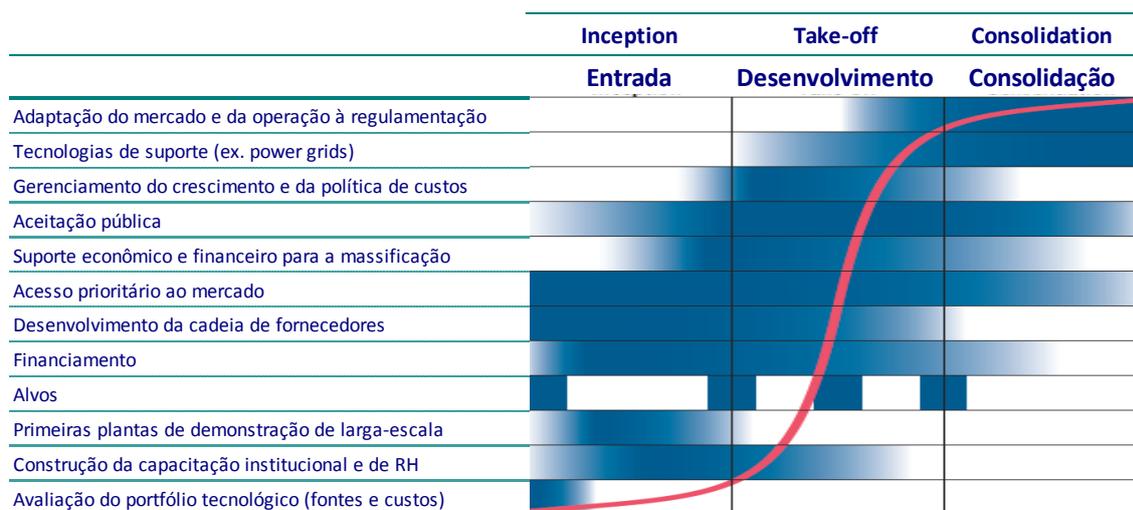
**Figura 5.2. Vetores para definição de investimento em energias renováveis**

## 1. NOVAS TECNOLOGIAS - MECANISMOS DE ENTRADA

A consolidação de uma nova tecnologia, ou mesmo de uma nova fonte de energia, passa por três fases desde a sua implantação:

- ❖ entrada (*inception*): fase em que os primeiros projetos que adotam a tecnologia são implantados em bases comerciais;
- ❖ desenvolvimento (*take-off*): fase em que o mercado começa a crescer rapidamente; e
- ❖ consolidação (*market consolidation*): fase onde a tecnologia atinge a maturação e a plenitude.

Os principais desafios estão identificados ao longo da "curva de implantação" (*deployment curve*), em que precisam ser superadas doze etapas, como ilustrado na **Figura 5.3**, e que são avaliadas a seguir para os biocombustíveis no Brasil.



Fonte: Muller, 2011

**Figura 5.3. Curva de implantação tecnológica**

### 1.1. AVALIAÇÃO DO ESTÁGIO TECNOLÓGICO

Em função da estrutura já consolidada do setor sucroalcooleiro tradicional, a tecnologia do etanol celulósico e da cana-energia já venceram diversas etapas da curva de implantação, como identificadas a seguir:

- ❖ portfólio tecnológico: existência de rotas tecnológicas e caminhos desenvolvidos localmente, com tecnologia dedicada, devido à complexidade específica das matérias-primas domésticas;
- ❖ capacitação institucional e de recursos humanos: indústria de Primeira Geração de etanol muito bem estabelecida, o que facilita a integração de novas tecnologias, reduzindo CAPEX e OPEX;
- ❖ desenvolvimento da cadeia de fornecedores: pronta disponibilidade de insumos com baixo custo, principalmente bagaço e palha de cana;  
acesso ao mercado: mercado de combustíveis crescente e muito dependente de importações, assim como o mercado de produtos químicos, também fortemente importador;
- ❖ acesso ao mercado: infraestrutura para transporte dos produtos também em crescimento, com a construção de alcooldutos e rotas fluviais dedicadas ao etanol;
- ❖ massificação: grande área de terra disponível e que pode ser convertida para uso agrícola, com finalidade energética e química; e
- ❖ aceitação pública: reduzida pegada de carbono da cana e de seus derivados, ampliando a competitividade para exportações.

Durante a curva de implantação, alguns procedimentos das políticas são mais efetivos e podem ser agrupados em uma série de princípios gerais para atuação em todos os pontos da curva, e outro grupo dos princípios específicos para determinadas fases.

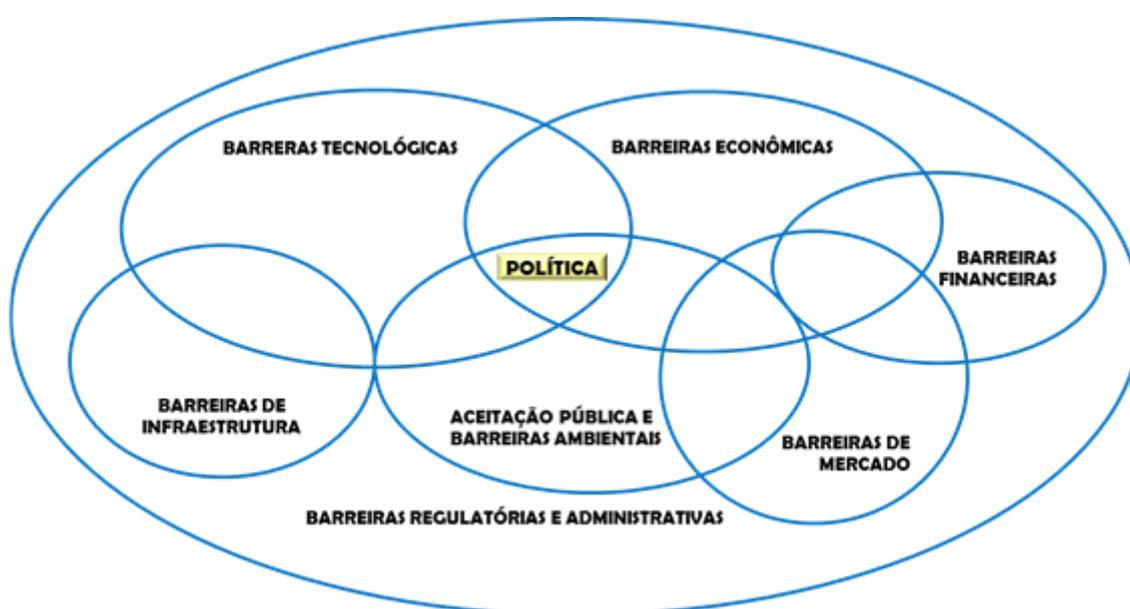
Podem ser tomados como exemplo os processos de hidrólise enzimática utilizados nas usinas de etanol 2G brasileiras, que se encontram na fase definida como "entrada" (*inception*), onde a ação do Estado é decisiva para:

- acesso prioritário ao mercado;
- desenvolvimento da cadeia de fornecedores;
- financiamento à P&D;
- financiamento à implantação de unidades de demonstração; e
- capacitação institucional e de recursos humanos.

Essa curva de implantação de uma nova tecnologia precisa superar barreiras de diversas naturezas, como apresentado a seguir.

## 1.2. BARREIRAS

A introdução de novas tecnologias precisa superar diversos tipos de barreiras. A importância de cada barreira está relacionada com a tecnologia e o mercado de atuação e as prioridades mudam à medida que a tecnologia amadurece ao longo da curva de implantação (*deployment path*). Especificamente no desenvolvimento de tecnologias de energias renováveis, essas barreiras são fortemente relacionadas e devem ser superadas conjuntamente. São possíveis diversas combinações e categorias, como apresentadas na **Figura 5.4**, e agrupadas, muitas vezes, como "econômicas" e "não-econômicas".



Fonte: Muller, 2011

**Figura 5.4. Barreiras à implantação das novas tecnologias**

As barreiras às tecnologias de etanol celulósico e de cana-energia, apontadas segundo a metodologia de Lamers (2009) e Painuly (2001) [apud Muller, 2011], são listadas a seguir:

- incertezas políticas e regulatórias, relacionadas a políticas mal desenhadas ou a descontinuidades e/ou insuficiente transparência de políticas e legislações (CIDE e controle de preços da gasolina);
- barreiras institucionais e administrativas, como a falta de instituições fortes e dedicadas; ausência de responsabilidades claras; licenciamentos complexos, lentos

e não-transparentes; ausência de *stakeholders* nos processos decisórios e instabilidade macroeconômica;

- barreiras de mercado, como a formação de preço inconsistente das energias fósseis e que desfavorece as energias renováveis; assimetria de informações; poder de mercado das fontes fósseis; subsídios para fontes fósseis; falhas na estrutura de custos das fontes fósseis que não incluem custos sociais e ambientais;
- ausência de instrumentos financeiros adequados, alto custo de capital e acesso inadequado ao capital (o mais efetivo instrumento financeiro vem sendo o apoio do BNDES, através do PAISS);
- barreiras da infraestrutura, relacionados à disponibilidade de rodovias, conectividade à rede, comunicações e logística (poucos alcoodutos e pouca conectividade das usinas à rede elétrica);
- falta de recursos humanos qualificados e informados, o que leva a um conhecimento insuficiente sobre a viabilidade e o desempenho das tecnologias renováveis;
- número de trabalhadores qualificados também insuficiente (capacitação viável de ser expandida em função de instituições consolidadas como CTC, CTBE e ESALQ, por exemplo); e
- aceitação pública e questões ambientais, como a redução das emissões de GEE e o uso da terra para bioenergéticos.

As barreiras não-econômicas podem prejudicar mais a eficácia das Políticas Públicas do que a escolha dos mecanismos para superar barreiras econômicas.

### **1.3. BARREIRAS ECONÔMICAS: O EXEMPLO DO SETOR ELÉTRICO**

---

Especificamente, para vencer barreiras econômicas, o setor de combustíveis pode adotar políticas desenvolvidas pelo mercado de energia elétrica para transpor as barreiras econômicas das energias renováveis. A **Tabela 5.1** apresenta comparativamente alguns aspectos de avaliação dessas políticas, descritas a seguir.

- ❖ *Feed-in tariffs* (FITs), que garante ao produtor de energia elétrica uma tarifa (preço) definida, por kWh, pelo qual a energia é comprada e que é assegurada por períodos longos, tipicamente 20 anos. É semelhante aos Contratos de Compra e Venda de Energia (CCVE) que o Brasil usou para os projetos do

Proinfa, com relativo sucesso na cogeração. A maior dificuldade encontrada 'é a visão de negócio do usineiro brasileiro médio, que foca primeiramente no açúcar, depois no etanol e, eventualmente, na energia elétrica.

- ❖ Certificados Verdes Negociáveis (*Tradable green certificates* - TGC), sistemas baseados no princípio de que, na comercialização de energia elétrica, existe uma parcela "renovável" que pode ser virtualmente segregada, gerando um certificado negociável. Os grandes consumidores e as distribuidoras de energia elétrica e de combustíveis seriam obrigados a comprar cotas desses certificados.
- ❖ Licitações ou Leilões de Energia (*Tenders*) são usados quando a autoridade regulatória deseja instalar uma determinada capacidade de uma dada tecnologia ou um grupo de tecnologias. Essas "chamadas" contêm exigências como percentual de conteúdo local, especificações técnicas e preço máximo. O vencedor é aquele que fez o lance de menor preço e fica com o projeto, que geralmente conta com um contrato de compra e venda de energia de longo prazo.
- ❖ Incentivos tributários ou financeiros (muito usados nos Estados Unidos). O produtor de energia renovável gera um crédito tributário que pode ser vendido a uma empresa que os queira deduzir dos impostos a pagar.
- ❖ Subsídios diretos e deduções (*direct cash grants and rebates*) podem ser usadas para reduzir os custos de capital e aumentar a taxa de retorno para os investidores. Nos EUA, a *Section 1603* garante o pagamento em dinheiro (*cash*), não em créditos tributários ou fiscais, de 30 % dos investimentos realizados em energia renováveis. Isso reduz, significativamente, o custo do desenvolvimento dos projetos e torna a tecnologia mais competitiva. Esse mecanismo foi criado após o mercado de créditos tributários ter entrado em colapso, na crise de 2009.

**Tabela 5.1. Características gerais de mecanismos de suporte às Políticas Públicas**

	<b>Feed-in Tarifs (FIT)</b>	<b>Certificados Verdes (TGC)</b>	<b>Leilões de Energia (Tenders)</b>	<b>Incentivos Tributários</b>	<b>Subsídios</b>
<b>Gestão do volume de recursos empregado</b>	Difícil, caso não seja definido um teto de capacidade	Pode ser construída, mas sem especificar a tecnologia	Bom	Nenhum	Possível, através de tetos nos volumes subsidiados
<b>Controle de preços</b>	Preço limitado por contratos de compra e venda, definidos pelo mercado; podem ser introduzidos pisos	Controle apenas em pontos muito específicos; necessita revisões frequentes	Bom	Nenhum	Possível, pelo estabelecimento de níveis máximos de subsídios
<b>Segurança dos investidores</b>	Alta, com alguma exposição ao mercado de eletricidade no caso dos FIPs	Exposição ao mercado de eletricidade; podem ser mitigados por pisos definidos	Alta após o início de operação; muito baixa durante a fase de construção	Alta, mas suscetível a cortes de orçamento	Alta, mas sujeita a cortes de orçamento; especialmente atrativa para altas taxas de desconto
<b>Custos de transação / complexidade</b>	Relativamente simples, caso os procedimentos estejam alinhados e aplicáveis a pequenos projetos	Complexos; são mais adequados a grandes projetos	Simples e diretos, mas mais adequados a grandes projetos; risco de leilões muito agressivos e especulativos	Relativamente simples, pois é parte de um gerenciamento tributário geral	Relativamente simples

Fonte: Muller, 2011

## **2. POLÍTICA PÚBLICA PARA O ETANOL 2G NO BRASIL**

O modelo de negócios proposto nesta tese é baseado no desenvolvimento e na consolidação da tecnologia do etanol celulósico, trazendo como coadjuvantes a otimização energética das usinas, a maximização do aproveitamento da palha e o plantio extensivo da cana-energia.

Com base nos resultados apresentados nos Capítulos anteriores e em estudos do BNDES, do Ministério de Desenvolvimento Indústria e Comércio (MDIC), do CTBE e das principais entidades do setor sucroalcooleiro brasileiro, esta tese propõe a adoção de instrumentos de Políticas Públicas para inserção do etanol celulósico na matriz energética do Brasil.

São estabelecidas ações do Estado sobre oferta e demanda do etanol e no incentivo ao desenvolvimento e domínio tecnológico de todos os segmentos relacionados a esse combustível renovável, divididas em quatro temas: mandato; subsídio; financiamento industrial e tributos fiscais; e financiamento à pesquisa, desenvolvimento e inovação.

## **2.1. MANDATO OBRIGATÓRIO DE MISTURA**

---

Atuação sobre a oferta. No Brasil, o mandato para adição do etanol convencional anidro à gasolina é de 27,5 % (foi elevado de 25 % para 27,5 %, em setembro de 2014). É proposto um mandato progressivo para que uma parcela desse etanol anidro venha através da rota do etanol celulósico. O aumento gradativo dessa parcela do anidro celulósico na mistura obrigatória estimularia novos projetos e um novo ciclo de investimentos no setor.

Para minimizar custos logísticos, os Estados com produção de etanol 2G podem maximizar a adição de anidro celulósico, reduzindo a participação de etanol convencional na mistura com a gasolina. A repartição de custos entre as distribuidoras de combustíveis pode ser feita com mecanismos similares aos certificados de mistura de biocombustíveis, como nos EUA (*Renewable Identification Number – RIN*), que confere ao seu proprietário a evidência de que cumpriu a meta de consumo mandatória. Como alternativa podem ser feitos leilões específicos para o etanol 2G, assim como já ocorre no caso do biodiesel.

## **2.2. SUBSÍDIOS AO CONSUMO**

---

Atuação sobre a demanda. Ao contrário do mandato, os subsídios não implicam repartição dos custos entre as distribuidoras de todo o País. Aquelas que optarem por adicionar anidro celulósico serão ressarcidas diretamente pelo governo, o que torna a política de incentivo mais simples e de implementação mais rápida. Contudo, como mostra Cunha de Sousa (2015), os custos seriam pagos por todos os contribuintes e não apenas pelos usuários de veículos. Considerando um hipotético prêmio de R\$ 0,50 por litro de E2G e um consumo de 100 milhões de litros, a despesa fiscal anual do subsídio seria de R\$ 50 milhões, que devem ser necessariamente arrecadados pela taxação de combustíveis fósseis, mais especificamente a gasolina.

### **2.3. INCENTIVOS À PRODUÇÃO - ISENÇÃO DE TRIBUTOS E FINANCIAMENTO**

---

Atuação sobre a oferta. Para atender à demanda que está sendo estimulada nas demais ações, são necessárias Políticas Públicas de incentivo temporário à produção do etanol celulósico, como Martinez (2015) detalha, a partir dos estudos do BNDES, MDIC e CTBE:

1. isenção dos tributos federais para aquisições e importações de máquinas e equipamentos, a exemplo do Regime Especial de Incentivos Fiscais da Indústria Petrolífera (Repenec) e do Regime Tributário para Incentivo à Modernização e à Ampliação da Estrutura Portuária (Reporto);
2. isenção dos tributos federais para importações e aquisições internas de enzimas e leveduras, (também semelhante ao Repenec e Reporto), pois poderia ser defendida a adoção do conceito de ativo biológico para os casos de produção *on-site*;
3. suspensão do PIS/Cofins nas aquisições de biomassa celulósica, tal como já ocorre no mercado de cana;
4. extensão do crédito presumido de PIS/Cofins para o E2G por um período maior de tempo que o do E1G;
5. depreciação acelerada dos equipamentos usados na produção do E2G;
6. redução das alíquotas da CSLL (Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido) para empresas produtoras de E2G;
7. redução das alíquotas de IRPJ (Imposto de Renda Pessoa Jurídica) para empresas produtoras de E2G;
8. criação de Programa Federal destinado especificamente ao financiamento para agricultura de fins energéticos e/ou químicos, incentivando o plantio de cana-energia e sorgo; e
9. condições diferenciadas de financiamento, dentro das Linhas do BNDES, para o investimento em plantas que processam açúcares oriundos de biomassa (incluindo aquelas que produzirão E2G e químicos renováveis) e para plantas que produzem enzimas.

### **2.4. FINANCIAMENTO CONTÍNUO À P&D**

---

Atuação no fomento ao desenvolvimento e domínio tecnológico. É fundamental a continuidade das políticas já em andamento no BNDES e na Finep com os Programas PAISS 1 e 2, que conta com recursos não reembolsáveis de cerca de

R\$ 250 milhões, em um total de R\$ 5 bilhões.

Cabe destacar a importância do papel do Estado na questão tecnológica, pois a maioria dos projetos que se encontram em fase operacional optou por utilizar tecnologias que veem sendo desenvolvidas no exterior, tentando, com isso, reduzir o risco inerente ao desenvolvimento tecnológico.

As Políticas Públicas, como o Programa PAISS do BNDES, são e serão decisivas na maturação de tecnologias locais e no fomento à competição com as alternativas estrangeiras, sobretudo para:

- a) coquetéis enzimáticos;
- b) cepas de leveduras para fermentação de pentoses;
- c) sistemas de pré-tratamento exclusivamente dedicados à biomassa de cana e previamente adaptados à integração com usinas 1G;
- d) novos clones de cana-energia, sorgo biomassa e outros materiais lignocelulósicos;
- e) máquinas e equipamentos especificamente desenhados para plantio e colheita de cana-energia, sorgo biomassa e outros materiais lignocelulósicos; e
- f) novos microorganismos para conversão de açúcares da cana em *building-blocks* químicos selecionados de acordo com seu impacto na demanda interna e potencial de exportação de produtos químicos finais.

## **2.5. METAS AMBIENTAIS PARA TRANSPORTE E ENERGIA (MATE)**

---

No contexto da redução das emissões de GEE geradas pelo setor de transportes, uma Política Pública para a energia da cana deve, ainda, ser suplementada pela ação sobre os fabricantes de veículos automotores, estabelecendo metas e padrões para a indústria, de modo que as decisões empresariais incluam essa importante questão ambiental.

Assim como o Brasil lançou o Proálcool para fazer frente ao Primeiro Choque do Petróleo, o governo americano colocou implantou, em 1975, através do *National Center for Environmental Economics*, que integra a US EPA (*United States Environmental Protection Agency*), uma Política Energética e de Conservação de Energia estabelecendo normas para a economia de combustível, a ser adotada por todos os fabricantes que vendam veículos no território americano.

As primeiras medidas foram impostas em 1978, definindo metas de consumo médio das frotas para todos os fabricantes, e ainda permanece em vigor. Para 2015, as metas de consumo são de 11,7 km/L (27,5 mpg), para veículos de passageiros e 8,8 km/L (20,7 mpg), para veículos comerciais leves, que incluem SUV's, minivans e picapes com peso bruto menor que quatro toneladas. Esses padrões e metas de "economia de combustível média corporativa" ficaram conhecidos pela sigla CAFE (Corporate Average Fuel Economy).

A meta CAFE é determinada pela média harmônica da economia de combustível dos automóveis produzidos por cada fabricante, calculada tomando o inverso da média aritmética dos recíprocos e mais difícil de ser alcançada que a média aritmética. Por exemplo, para alcançar um padrão CAFE de 27,5 mpg (11,7 km/L), é necessário vender dois veículos com consumo de 35 mpg (15 km/L) para cada veículo com consumo de 20 mpg (8,5 km/L) vendido.

A penalidade por não cumprir a norma CAFE é de US\$ 5,50 por carro, para cada 0,1 mpg (0,04 km/L) não atendido, incidindo sobre o total de unidades vendidas. Por exemplo, uma montadora que venda 10 milhões de veículos nos EUA e fique com média de 10,9 km/L, ou seja, 0,08 km/L abaixo da meta, pagará US\$ 11,00 por cada carro vendido, ou seja uma multa de US\$ 110 milhões.

O CAFE tem sido um efetivo instrumento de política de economia de combustível nos EUA. A partir do final dos anos 1970 e até meados dos anos 1980, o CAFE juntamente com os preços mais elevados da gasolina na maior parte desse período praticamente reduziu à metade o consumo médio de combustível de veículos novos. Ao longo da década de 1990, com os preços do petróleo nos mínimos históricos (em uma base ajustada pela inflação), os padrões CAFE forneceram um piso para o consumo de combustíveis<sup>26</sup>, caso contrário, com os preços depreciados durante muitos anos, como ocorreu, a tendência é que o consumidor e os fabricantes deem pouca ou nenhuma importância ao consumo do motor e às emissões veiculares de GEE<sup>27</sup>.

Na Europa, as metas são para a emissão média por fabricante de 130 g

---

<sup>26</sup> Como aspectos desfavoráveis, destacam-se sua inconsistência para cenários de preços baixos dos combustíveis, como atualmente. Nesses períodos a demanda pelos carros mais econômicos diminui, mas para atender ao CAFE as montadoras deveriam vender muito mais carros econômicos do que demandado pelo mercado e fazem forte oposição às metas.

<sup>27</sup> Como a emissão de dióxido de carbono, principal gás de efeito estufa dos veículos a combustão interna, é diretamente proporcional ao consumo do combustível, o CAFE tem participação direta na redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e, portanto, nas emissões globais de GEE. Entretanto, os combustíveis não estão fortemente relacionados à emissão de outros poluentes, como particulados, CO e NO<sub>x</sub>.

CO<sub>2</sub>/km, em 2015, e de 95 g CO<sub>2</sub>/km em 2020, apenas para veículos leves. As metas do CAFE para 2025 são ambiciosas: 23,4 km/L para veículos leves e comerciais leves.

As políticas nos modelos do CAFE e dos programas europeus devem ser adotadas pelo Brasil, atuando de forma ainda mais incisiva na redução das emissões de gases de efeito estufa, negociando com as montadoras aqui instaladas e com os representantes das marcas internacionais comercializadas no país.

No Brasil, assim como os aparelhos elétricos possuem o selo do Procel, os veículos automotores possuem as etiquetas da PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, do INMETRO. A adesão ao programa de brasileiro, ainda é voluntária, ou seja, o fabricante se dispõe a ser avaliado e o resultado é usado apenas para orientação do consumidor e, ainda, é pouco divulgado.

O Brasil deve ter uma política equivalente, sendo sugerida a sigla MATE (Metas Ambientais para Transporte e Energia), com ações objetivas que tornem os veículos mais econômicos e com menores emissões de GEE, independentemente de uso de gasolina ou etanol. O PBEV pode ser um instrumento para aferição dos progressos do programa, exigindo metas de redução das emissões e do consumo dos veículos comercializados no país.

O etanol faz parte desse esforço e pode proporcionar resultados significativos. A evolução da eficiência dos motores ciclo Otto é historicamente dedicada ao aumento de potência e de desempenho, enquanto o consumo ou as emissões por quilômetro rodado ficam em segundo plano. A situação torna-se mais desfavorável em períodos de baixo preço da energia. Felizmente, a consciência com as questões ambientais vem aumentando e as Mudanças Climáticas e o Aquecimento Global são temas de destaque nos fóruns internacionais. O etanol, especificamente, e a cana-de-açúcar num sentido mais amplo, podem contribuir de forma expressiva na mitigação desses efeitos, seja como combustível veicular, seja na geração de energia elétrica.

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES**

A escolha da civilização ocidental pelo "consumo individual baseado na produção em massa", tendo o automóvel e os *smartphones* como seus ícones (de ontem e de hoje, respectivamente), aponta na direção de um risco socioambiental crescente e de difícil reversão. Os desastres climáticos estão cada vez mais frequentes, com secas e inundações, invernos glaciais e verões saarianos, e inúmeros estudos os relacionam ao aquecimento global e à emissão de gases de efeito estufa.

Numa primeira análise, os desmatamentos e os combustíveis fósseis poderiam ser apontados como os principais responsáveis pelos maiores danos ambientais. No entanto, como apresentados nos dois Capítulos iniciais, uma significativa parcela do aumento da demanda de energia visa atender à disseminação de um modelo de consumo ocidental nas economias emergentes, principalmente na Ásia, bem como transferir as atividades energo-intensivas para lá.

Assim, os louváveis esforços para redução das emissões de GEE e os estímulos dados às tecnologias limpas e às fontes renováveis vêm sendo sucessivamente derrotados, em termos absolutos, pelo volume de carvão mineral que é acrescentado anualmente à matriz energética mundial.

Desses primeiros Capítulos também emerge o confronto entre o que seria considerado "crescimento econômico" e o que seria "desenvolvimento econômico". Na interpretação de muitos, onde se incluem os órgãos de comunicação e a comunidade financeira internacional, as duas expressões possuem o mesmo significado e são avaliadas pelo crescimento do PIB, indiferente ao que se passa com a cidadania ou o meio-ambiente. Em nome do crescimento, nações de todo o planeta permitem o livre fluxo dos capitais financeiros, que se movimentam com maior velocidade a cada dia. Por outro lado, o "capital" industrial, o "capital" tecnológico ou o "capital" humano precisam décadas para se deslocar. E desta forma vem sendo perpetuada a relação Centro-Periferia, com os Países Centrais ordenando o sistema global e determinando o papel do Terceiro Mundo.

A nova onda de "crescimento" mundial, liderada pelos BRICS, segue padrões de consumo protagonizado pela racionalidade instrumental da modernidade e esses padrões (formulados, otimizados, agravados, reformulados e re-otimizados

continuamente, desde a revolução industrial) se mostraram socialmente perversos, sob a ótica da sustentabilidade.

Fábricas de bicicletas fecham por toda Ásia, enquanto a frota de automóveis na China, que em 2005 era de 30 milhões de veículos, em 2013 cresceu para 125 milhões. Na Índia, foram produzidas dois milhões de motocicletas em 2002. Em 2012 foram 18 milhões e, com isso, sua frota de veículos de duas e três rodas já supera 200 milhões. Portanto, a demanda de combustíveis cresce exponencialmente nessa região. E as emissões de GEE também.

A voracidade crescente do homem por energia e recursos naturais vai progressivamente esgotando a capacidade de renovação e de sustentação do meio-ambiente. As fontes renováveis reduzem esses efeitos, mas só nas últimas décadas têm tido verdadeira atenção e, ainda, precisam superar a racionalidade financeira que privilegia o uso dos combustíveis fósseis. Com a reprodução do padrão de consumo ocidental no Oriente, dificilmente esses estímulos às fontes limpas serão suficientes para reverter essa tendência.

Apesar disso, cada molécula de CO<sub>2</sub> não emitida ou capturada deve ser valorizada.

O incremento do uso das fontes fósseis é virtualmente inevitável para atender à demanda de energia requerida pelos padrões de crescimento vigentes, principalmente na China e na Índia, e esse consumo adicional vem sendo sempre superior a todos os esforços de geração através de fontes renováveis, deixando, portanto, um saldo crescente de gases de efeito estufa na atmosfera.

Contraditoriamente, o crescimento do uso de fontes renováveis vem sendo eficaz nos Países Centrais, pois, apesar da disponibilidade dos recursos naturais serem menos favoráveis que em outras regiões do planeta, são os países que detêm tecnologia e investem continuamente em seu aprimoramento, seja em energia eólica, solar ou biomassa. Nos últimos 40 anos, eles vêm modificando seu perfil de consumo de energia, transferindo a expansão dos parques das indústrias energo-intensivas e de bens de baixo valor agregado para os países periféricos. Com isso, geram riqueza, originária cada vez mais de serviços e cada vez menos de bens, com menor emissão de GEE, dentro de um conceito de sociedade pós-industrial.

Destaca-se que, apesar de contar com total apoio da sociedade, o sucesso da

introdução dessas fontes renováveis nas matrizes energéticas dos Países Centrais deve-se às Políticas Públicas adotadas.

A proposta de melhor aproveitamento da energia da cana é para um setor da economia onde o Brasil ocupa a liderança sob todos os aspectos e que, no momento, possui uma janela de oportunidade para a tecnologia do etanol celulósico, que muda a estratégia de negócios do setor. Como demonstrado, essa mudança da estratégia traz novas alternativas para uma das mais significativas dentre as fontes renováveis de energia e que já se encontra solidamente estruturada no Brasil.

O domínio da tecnologia do etanol celulósico é a principal variável de qualquer estratégia de produção que considere o aproveitamento integral da cana. Porém, a tecnologia do etanol 2G ainda é um livro em branco, onde só o prefácio foi escrito. Trata-se, portanto, de uma oportunidade para que o Brasil tenha um papel de liderança, agregando valor à sua inquestionável competitividade com a cana-de-açúcar.

O aproveitamento completo da energia da cana (caldo, bagaço e palha) muda a lógica de negócios do setor, reduzindo as incertezas relacionadas aos mercados internacionais do açúcar e do petróleo. O novo modelo de negócio permite conciliar o açúcar e o álcool (biocombustível e bioeletricidade) como alvos estratégicos e deve evoluir em direção à verticalização e à química verde, agregando valor a seus produtos.

O modelo de negócio proposto resolve um problema macroeconômico (incerteza na oferta de combustíveis) por meio de decisões microeconômicas (definição de um modelo para as empresas) e, portanto, requer ações do Estado, através de Políticas Públicas. Tais políticas se justificam no contexto econômico internacional, pois a cana-de-açúcar brasileira apresenta evidentes vantagens comparativas e de cunho pluridimensional (ambiental, social, tecnológica e econômica). Apesar disso e pela falta de uma política de Estado que concilie e incremente as produções de açúcar e de álcool, o setor passou, e continua passando, por ciclos de baixa atratividade de investimentos no Brasil, gerando ameaças de desabastecimento, e permanece vulnerável em relação às políticas de combustíveis e aos preços internacionais do petróleo e do açúcar.

O desenvolvimento do etanol no Brasil deve-se ao sucesso do Proálcool e demais Políticas Públicas instituídas na década de 1970. As renúncias referentes aos incentivos ao setor foram recompensadas pelas conquistas sociais, econômicas e tecnológicas e pela redução das emissões do setor de transporte no Brasil. Apesar da

competitividade internacional do setor e da excelência dos avanços na cultura da cana, o potencial para o aproveitamento da energia da cana ainda é muito elevado e, no entanto, a tecnologia do etanol celulósico e a produção de enzimas ainda são temas dominados por grupos, empresas e instituições no exterior.

Assim, como mostrado nos Capítulos quatro e cinco, a reformulação do modelo de negócios do etanol exige uma ação coordenada do Estado com os investidores privados e demais *stakeholders*, para adoção das medidas necessárias. O modelo de negócio a ser seguido é o das usinas dedicadas ao aproveitamento da totalidade da cana e isso requer o domínio da tecnologia do etanol celulósico. As principais etapas a serem percorridas são:

- 1) otimização tecnológica e energética de usinas;
- 2) inclusão de módulos para processamento de etanol celulósico nesse grupo de usinas, bem como o aproveitamento da palha e do bagaço excedente gerado com a otimização dos processos;
- 3) desenvolvimento de variedades da cana-energia e massificação do seu plantio; e
- 4) construção de novas usinas já dimensionadas e dedicadas à produção do etanol celulósico, o que inclui a maximização da transformação da energia disponível na cana em biocombustíveis e bioeletricidade e sua integração à química verde.

Essa estrutura emula, para a cana, a lógica da cadeia do petróleo, fortalecendo os negócios no âmbito dos combustíveis, da energia elétrica e da alcoolquímica, reduzindo com isso as incertezas que hoje inibem seu crescimento.

A evolução não ocorrerá de forma espontânea, pois boa parte dos ganhos de eficiência só ocorrerá ao longo da operação de novas plantas de E2G e, conseqüentemente, do aumento de escala e redução de custos, além do maior investimento em P&D&I da cana-energia, de enzimas e de equipamentos.

Para que o impacto das políticas possa ser avaliado, é preciso monitorar a evolução tecnológica do E2G e, sempre que possível, identificar uma relação de causalidade com os instrumentos de política adotados.

Assim, para que o modelo proposto se concretize, é indispensável o estabelecimento de Políticas Públicas para a tecnologia do etanol celulósico, para a cana-energia e para a viabilidade econômica da coleta da palha e, com isso, maximizar o aproveitamento da energia da cana para toda a sociedade.

## REFERÊNCIAS

---

- ADVANCED ETHANOL COUNCIL. **Cellulosic biofuels: industry progress report 2012-2013**. [S.l., 2004].
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Evolução do mercado de combustíveis e derivados: 2000-2012**. Rio de Janeiro, 2013.
- AKIYAMA, M; TSUGE, T.; DOI, Y. Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. **Polymer Degradation and Stability**, [S.l.], v. 80, n. 1, p. 183-194, 2003.
- ALMEIDA, M. **A política equivocada do reajuste dos preços dos combustíveis**. 2014. Disponível em: <<https://mansueto.wordpress.com/2014/03/03/a-politica-equivocada-do-reajuste-dos-precos-dos-combustiveis/>>. Acesso em: 01 jul. 2015.
- AMABLE, B.; BARRÉ, R.; BOYER, R. **Les systèmes nationaux d'innovation à l'ère de la globalisation**. Paris: Economica, 1997.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da indústria automobilística brasileira: 2013**. São Paulo, 2013.
- BABCOCK, B. **The impact of US biofuel policies on agricultural price levels and volatility**. Genebra: ICTSD, 2011. (Issue paper, 35).
- BALSALOBRE, M. A. A.; SANTOS, P. M.; FERNANDES, R. A. Cana-de-açúcar: quando e como cortar para o consumo animal. **Revista Balde Branco**, [S.l.], n. 421, p.19-13, nov. 1999.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.
- BARROS, G. S. C; ADAMI, A. C. O. **Exportações do agronegócio batem novo recorde em 2012, mesmo com queda de preços**. Piracicaba, SP: CEPEA-ESALQ/USP, 2013.
- BASTOS, V. D. Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 38, p. 85-138, dez. 2012.
- BATISTA, F. Bioflex consegue aval da CTNBio para sua nova levedura geneticamente modificada. **Valor Econômico**, São Paulo, 25 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/agro/4055284/bioflex-consegue-aval-da-ctnbio-para-sua-nova-levedura-geneticamente-modificada>>. Acesso em: 25 mar. 2015.
- BAUMAN, Z. **Modernidade líquida**. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.
- BAUMAN, Z. **Vida para consumo**. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.
- BECKMAN, J.; BORCHERS, A.; JONES, C. **Agriculture's supply and demand for energy and energy products**. [Washington, DC]: United States Department of Agriculture, 2013. (Economic Information Bulletin, n. 12). Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/media/1104145/eib112.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2013.
- BELL, D. The post-industrial society: a speculative view. In: HUTCHINGS, Edwards; HUTCHINGS, Elizabeth. **Scientific progress and human values**. New York: American Elsevier Publishing Co., 1967. p. 154-177.
- BENETTI, M. D. A internacionalização recente da indústria de etanol brasileira. **Revista FEE**, Porto Alegre, v. 36, n. 4, p. 149-160, 2009.

- BERMAN, M. **Tudo que é sólido se desmancha no ar**. São Paulo: Companhia das Letras, 1986. p. 85-166.
- BETA renewables and Novozymes to form strategic partnership in the cellulosic biofuel market. 2012. Disponível em: <<http://novozymes.com/en/news/news-archive/Pages/Beta-Renewables-and-Novozymes-to-form-strategic-partnership-in-the-cellulosic-biofuel-market.aspx>>. Acesso em: 18 jan. 2013.
- BIELSCHOWSKY, R. Sesenta años de la CEPAL: estructuralismo y neoestructuralismo. **Revista Cepal**, Santiago de Chile, n. 97, p. 173-194, abr. 2009.
- BIOFUELS and food security: a report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. Roma: [s.n.], 2013.
- BOMTEMPO, J. V. O futuro dos biocombustíveis. In: DUAILIBE, A. K. (Org.). **Combustíveis no Brasil: desafios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.
- BONOMI, A. et al. **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB): 2011 report**. Campinas, SP: CTBE, 2012. Disponível em: <<http://ctbe.cnpm.br/pesquisa/avaliacao-integradabiorefinarias/>>. Acesso em: 15 dez. 2014.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agronegócios**. [Brasília], 2012. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes\\_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS\\_PRODUTORES\\_22-10-2012.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS_PRODUTORES_22-10-2012.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Coordenação Geral de Observação da Terra. **Projeto PRODES: monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. [201-]. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>>. Acesso em: 14 out. 2015.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional: 2013**. Brasília, DF, 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional: 2014**. Brasília, DF, 2014.
- BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 300-308, jan./abr. 2006.
- BRESSER-PEREIRA, L.C. **Da macroeconomia clássica à keynesiana**. São Paulo, 1968. Disponível em: <<http://www.bresserpereira.org.br/papers/1968/68-98DaMacroclassicaAKeynesiana.apostila.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2014.
- BROCKWAY, P. E. et al. Understanding China's past and future energy demand: an exergy efficiency and decomposition analysis. **Applied Energy**, London, v. 155, p. 892-903, out. 2005.
- BRUNSSON, N. **The organization of hypocrisy**. Copenhagen: Liber, 1989.
- BUCKERIDGE, M. S.; SANTOS, W. D.; SOUZA, A. P. **As rotas para o etanol celulósico no Brasil**. [S. l., 201-]. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfuLUAD/as-rotas-etanol-celulosico-no-brasil>>. Acesso em: 19 jan. 2013.
- CANUTO, O. **Brasil e Coréia do Sul: os (des)caminhos da industrialização tardia**. São Paulo: Nobel, 1994.
- CARACOSTAS, P.; MULDER, U. **La société ultime frontière: une vision européenne des politiques de recherche et d'innovation pour le XXIème siècle**. Bruxelles: Communautés européennes, 1997.

- CARDOSO, T. F. et al. A vertical integration simplified model for straw recovery as feedstock in sugarcane biorefineries. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 81, p. 216-223, 2015.
- CARVALHO, P. G. M., FERREIRA, M. T. Poluição e crescimento na década perdida. **Políticas Governamentais**, Rio de Janeiro, n. 80, p. 10-12, 1992.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol**: fase 2. Campinas, SP: Nipe/Unicamp, 2007.
- CEVOLI, Marilda. Bell: o advento pós-industrial. In: DE MASI, D. **A sociedade pós-industrial**. São Paulo: Senac, 1999.
- CHESNAIS, F. Uma interpretação sobre a situação econômica mundial seguida por considerações sobre a crise ambiental. In: CASSIOLATO, J.; PODICAMENI, M. G.; SOARES, M. C. C. **Políticas estratégicas de inovação e mudança estrutural**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2015. v. 1.
- CHOMSKY, N. **Novas e velhas ordens mundiais**. São Paulo: Scritta, 1996.
- CIATTONI, A.; VEYRET, Y. **Géographie et géopolitique des énergies**. Paris: Hatier, 2007.
- COHENDET, P. et al. La gestion des externalités positives de la recherche. In: FORAY, D.; MAIRESSE, J. (Ed.). **Innovations et performances: approches interdisciplinaires**. Paris: Editions de l'EHESS, 1998.
- COLONNA, Paul. **Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques**. Paris: Fayard, 2011.
- COM PREÇOS em queda, exportação brasileira de etanol segue em alta. 2012. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/mercado/exportacao/precos-queda-exportacao-etanol-alta-191212/>>. Acesso em: 15 jan. 2013.*
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A geração termoeletrica com a queima do bagaço de cana no Brasil**: análise do desempenho da safra 2009-2010. [S.l.], 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar: safra 2012/2013: segundo levantamento*. Brasília, DF, 2012.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>>. Acesso em: 2015.
- COURS D'ÊS COMPTES. **La politique d'aide aux biocarburants**: rapport public thématique: evaluation d'une politique publique. Paris, jan. 2012.
- CUVILLIER, S. **Institutional changes for development through purposive degrowth**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.
- D'AVIGNON, A. L. A. **A inovação e os sistemas de gestão ambiental da produção**: o caso da maricultura na enseada de Jurujuba. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.
- DE MASI, D. **A Sociedade pós-industrial**. São Paulo: Senac, 1999.
- DEBEIR, J. C.; DELÉAGE, J. P.; HÉMERY, D. **Uma história da energia**. Brasília, DF: Ed. UnB, 1993.
- DEMSETZ, H. George J. Stigler: midcentury neoclassicalist with a passion to quantify. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 101, n. 5, p. 793-808, out. 1993.
- DIAS, M. O. S. et al. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, London, v. 109, p. 72-78, set. 2013.

- DIAS, M. O. S. et al. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 103, n. 1, p. 152–161, jan. 2012.
- DIAS, M. O. S. et al. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research and Design**, [S.l.], v. 87, n. 9, p. 1206–1216, set. 2009.
- DIAS, M. O. S. et al. Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production?. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 102, n. 19, p. 8964–8971, out. 2011.
- DIPARDO, J. **Outlook for biomass ethanol production and demand**. 2007. Disponível em: <<http://www.eia.gov/oiaf/analysispaper/biomass.html>>. Acesso em: 14 out. 2015.
- DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories. **Research Policy**, Amsterdam, v. 11, p.147-162, 1982.
- DOSI, G.; NELSON, R. An introduction to evolutionary theories in economics. **Journal of Evolutionary Economics**, Heidelberg, v. 4, n. 3, p. 153-172, set. 1994.
- EIJCK, J.; BATIDZIRAI, B.; FAAIJ, A. Current and future economic performance of first and second generation biofuels in developing countries. **Applied Energy**, London, v. 135, p. 115–141, dez. 2014.
- ELIA NETO, A. Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar. In: MACEDO, I. C. et al. **A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: Unica, 2005.
- FARINA, E. **How the industry sees the future of brazilian sugar & ethanol**: contributing to build the bridge towards a low-carbon energy system. Trabalho apresentando no 2nd sugar & ethanol summit, Londres, 18 jul. 2014. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=33611678>>. Acesso em: 11 out. 2014.
- FARINA, E. **Ways in which the most recent crisis has transformed the industry**. Trabalho apresentando no 2nd sugar & ethanol summit, em Londres, 5 jul. 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos/apresentacoes/unica/>>. Acesso em: 11 out. 2014.
- FARINA, F.; RODRIGUES, L.; ZECHIN, M. **Controle de preço da gasolina e aumento de custos levaram etanol à crise**. 2014. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/opiniaocoluna/2014/10/11/uso-do-preco-da-gasolina-para-controlar-a-inflacao-levou-etanol-a-crise.htm>>. Acesso em: 11 out. 2014.
- FERRÃO, P. C. **Ecologia industrial: princípios e ferramentas**. Lisboa: IST Press, 2009.
- FINON, D. Network industries and markets: from public service model to universal service obligations. In: FINGER, M.; KÜNNEKE, R. (Ed.). **International handbook of liberalised network industries**. London: Edward Elgar, 2011. p. 54-69.
- FIORAVANTE, C. O etanol que mobiliza o mundo. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 187, set. 2011. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2011/09/026-029-187.pdf?7da20b>>. Acesso em: 16 jan. 2013.
- FIORI, J.L. Sistema mundial: império e pauperização para retomar o pensamento crítico latino americano. In: FIORI, J. L. **Polarização mundial e crescimento**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2001.
- FREEMAN, C. Japan: a new National System of Innovation?. In: DOSI, G. et al. (Ed.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter Publishers, 1988. p. 349–369.
- FREEMAN, C. **The economics of industrial innovation**. London: Frances Pinter, 1982.

- FREEMAN, C., LOUÇÃ, F. **As time goes by: from the industrial revolutions to the information revolution.** Oxford: Oxford University Press, 2001.
- FREITAG, B. **A teoria crítica ontem e hoje.** São Paulo: Brasiliense, 1986.
- FURTADO, C. **Desenvolvimento e subdesenvolvimento.** Rio de Janeiro: Contraponto, 2009.
- FURTADO, C. **Obra autobiográfica.** São Paulo: Companhia das Letras, 2014.
- FURTADO, C. **Teoria e política do desenvolvimento econômico.** 2. ed. São Paulo: Nova Cultural, 1986.
- GADELHA, C. A. G. Política industrial: uma visão neo-schumpeteriana sistêmica e estrutural. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 149-171, out./dez. 2001.
- GARCEZ, C. Sistemas locais de inovação na economia do aprendizado: uma abordagem conceitual. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 14, p. 351-366, dez. 2000.
- GIAMBIAGI, F.; ALÉM, A. C. **Finanças públicas: teoria e prática no Brasil.** 3. ed. São Paulo: Campus, 2008.
- GILDING, P. **The great disruption: why the climate crisis will bring on the end of shopping and the birth of a new world.** New York: Bloomsbury Press, 2011.
- GLOBAL Ethanol production to reach 85,2 billion litres in 2012. 2012. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/2012/06/global-ethanol-production-to-reach-85-2-billion-litres-in-2012/>>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- GRANBIO inicia produção de etanol de segunda geração. 2014. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/granbio-producao-etanol-segunda-geracao-240914/>>. Acesso em: 05 jan. 2015.
- GREENPEACE. **Dia da mobilização nacional pelo desmatamento zero.** 2015. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/Dia-da-Mobilizacao-Nacional-pelo-Desmatamento-Zero/>>. Acesso em: 30 jul. 2015.
- GRETZ, R. et al. R&D subsidy games: a cost sharing approach vs. reward for performance. **Journal of Technology Transfer**, Indianapolis, v. 37, p. 385-403, 2010.
- GUELLEC, D. **Économie de l'innovation.** Paris: La Decouverte, 2010. (Série Repères).
- GUELLEC, D.; POTTERIE, B. P. R&D and productivity growth: panel data analysis of 16 OECD countries. **OECD Economic Studies**, Paris, n. 33, p. 103-126, 2001.
- HABERMAS, Jurguen. **Teoria do agir comunicativo.** Frankfurt: Suhrkamp, 1981.
- HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. **Biomass and bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 4, p. 384-410, 2005.
- HEGEDUS, A.; MARKUS, M. **Modernization and the alternatives of social progress.** New York: Telos Press, 1973.
- HIMMELBERG, C. P.; PETERSEN, B. C. R & D and internal finance: a panel study of small firms in high-tech industries. **The Review of Economics and Statistics**, [S.l.], v. 76, p. 38-51, fev. 1994.
- HORTA, L. A. N.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- INAMASU, R. Y.; MARTIN NETO, L. Instrumentação e automação na cadeia cana-etanol: algumas oportunidades no manejo agrícola. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol da cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade.** São Paulo: Blucher, 2011.

- INSTITUTE FOR INTERNATIONAL TRADE NEGOTIATIONS. **European Comission Public Consultation on Indirect Land Use Change**: responses to the consultation document. São Paulo, 2010. Disponível em: <[http://www.iconebrasil.com.br/datafiles/biblioteca/documentos/2010/european\\_commission\\_public\\_consultation\\_on\\_indirect\\_land\\_use\\_change\\_3110.pdf](http://www.iconebrasil.com.br/datafiles/biblioteca/documentos/2010/european_commission_public_consultation_on_indirect_land_use_change_3110.pdf)>. Acesso em: 30 set. 2014.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics**: 2013. Paris, 2013.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics**: 2014. Paris, 2014.
- JAFFE, A. B.; NEWELL, R. G.; STAVINS, R. N. A tale of two market failures: technology and environmental policy. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 54, p. 167-174, ago. 2005.
- JAFFE, A. B.; STAVINS, R. N. The energy paradox and the diffusion of conservation technology. **Resource and Energy Economics**, [S.l.], v. 16, p. 91-122, 1994.
- LAMERS, P. **Assessment of non-economic barriers to the development of renewable electricity**: global recommendations: confidential report prepared for the IEA, Ecofys Germany GmbH, Berlin. [S.l.: s.n.], 2009.
- LANDES, D. S. **Prometeu desacorrentado**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994.
- LANDES, D. S. **The unbound prometheus**: technological change and industrial development in western europe from 1750 to the present. Cambridge, New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1969.
- LATOUCHE, S. **Pequeno tratado do decrescimento sereno**. São Paulo: Martins Fontes, 2009.
- LISBOA, A. **China, uma emergente potência mundial**: controvérsia entre direitos individuais e coletivos. Âmbito Jurídico: Rio de Janeiro, 2010.
- LUENGO, J. M. et al. Bioplastics from microorganisms. **Current opinion in microbiology**, Oxford, v. 6, n. 3, p. 251-260, jun. 2003.
- LUO, L.; VAN DER VOET, E.; HUPPES, G. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock: corn stover. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 13, n. 8, p. 2003-2011, out. 2009.
- LUO, L.; VAN DER VOET, E.; HUPPES, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 13, n.6-7, p. 1613-1619, set. 2009.
- LYND, L. R. et al. Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update. **Current opinion in biotechnology**, Oxford, v. 16, n. 5, p. 577-583, out. 2005.
- LYND, L. R. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, economics, the environment, and policy. **Annual review of energy and the environment**, Palo Alto, v. 21, n. 1, p. 403-465, nov. 1996.
- MACEDO, I. C. et al. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2004.
- MALUF, R. Atribuindo sentido(s) à noção de desenvolvimento econômico. **Estudos Sociedade e Agricultura**, [Rio de Janeiro], n. 15, p. 53-86, out. 2000.
- MARINO, S.; CARVALHO, E. F. Transporte e distribuição de combustíveis no Brasil. In: DUAİLIBE, A. K. (Org.). **Combustíveis no Brasil**: desafios e perspectivas. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

- MENDONÇA, J. F.; JÚNIOR, I. C. L. Comparação dos custos de produção e transporte de etanol entre o Brasil e os Estados Unidos. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 7., Resende, RJ. 2010. **Anais...** 2010. Resende, RJ: Associação Educacional Dom Bosco, 2010. Disponível em: <[http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos10/272\\_ETANOL%20BR%20X%20EUA%20SEGET2010%20rev01.pdf](http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos10/272_ETANOL%20BR%20X%20EUA%20SEGET2010%20rev01.pdf)> . Acesso em: 30 jan. 2013.
- MÉSZÁROS, I. **Produção destrutiva e o estado capitalista**. São Paulo: Ensaio, 1989.
- MILANEZ, A. Y. et al. Bens de capital para o setor sucroenergético: a indústria está preparada para atender adequadamente a novo ciclo de investimentos em usinas de cana-de-açúcar? **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 36, p. 119-178, set. 2012.
- MILANEZ, A. Y. et al. De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar – uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 41, p. 237-294, mar. 2015.
- MILANEZ, A. Y. et al. O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 35, p. 277-302, mar. 2012.
- MILANEZ, A. Y.; CAVALCANTI, C. E. S.; FAVERET FILHO, P. S. C. O papel do BNDES no desenvolvimento do setor sucroenergético. In: ALÉM, A. C.; GIAMBIAGI, F. (Org.). **O BNDES em um Brasil em transição**. Rio de Janeiro: BNDES, jun. 2010. p. 335-347.
- MOTTA, R. S. **Padrão de consumo, distribuição de renda e o meio ambiente no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA, 2002. (Texto para Discussão, 856).
- MULDER, P.; GROOT, H.; HOFKES, M. Economic growth and technological change: a comparison of insights from a neo-classical and an evolutionary perspective. **Technological Forecasting & Social Change**, New York, v. 68, n. 2, p. 151–171, out. 2001.
- MÜLLER, S.; BROWN, A.; ÖLZ, S. **Renewable energy**: policy considerations for deploying renewables. Paris: International Energy Agency, 2011.
- NASSAR, A.; HARFUCH, L. **Brazilian Land Use Model (BLUM)**. Campinas, SP: Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais, 2012.
- NEEDHAM, J. **Civil engineering and nautics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. (Science and civilization in China, v. 4, t. 3).
- NEEDHAM, J. **Mechanical engineering**. Cambridge: Cambridge University Press, 1971. (Science and civilization in China, v. 4, t. 2).
- NELSON, R. R. Recent evolutionary theorizing about economic change. **Journal of Economic Literature**, Nashville, v. 33, p. 48–90, mar.1995.
- NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change**. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1982.
- NELSON, R. R.; WINTER, S. G. Neoclassical vs. evolutionary theories of economic growth: critique and prospectus. **Economic Journal**, St. Andrews, v. 84, n. 336, p. 886-905, 1974.
- NYKO, D. et al. A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 32, p. 5-48, set. 2010.
- NYKO, D. et al. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 37, p. 399-442, mar. 2013.
- NYKO, D. et al. Planos de fomento estruturado podem ser mecanismos mais eficientes de política industrial?: uma discussão à luz da experiência do PAISS e seus resultados. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 38, p 55-78, set. 2013.

- NYKO, D.; MILANEZ, A. Y. O setor sucroalcooleiro em 2009. **Informe Setorial [da] Área Industrial**, Rio de Janeiro, n. 17, abr. 2010. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3446/1/IS\\_AS%20O%20setor%20sucroalcooleiro%20em%202009\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3446/1/IS_AS%20O%20setor%20sucroalcooleiro%20em%202009_P.pdf)> . Acesso em: 15 jan. 2013.
- OLIVEIRA, B. J. **Francis Bacon e a fundamentação da ciência como tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2002.
- OLIVIER, J. G. J.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in global CO2 emissions: 2012 report**. Haia: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012.
- PADILHA, V. **Shopping center: a catedral das mercadorias**. São Paulo: Boitempo, 2006.
- PADILHA, V.; BONIFÁCIO, R. C. A. **Obsolescência planejada: armadilha silenciosa na sociedade de consumo**. 2013. Disponível em: <<http://www.diplomatique.org.br/artigo.php?id=1489>>. Acesso em: 02 set. 2013.
- PANOUTSOU, C.; BAUEN, A.; DUFFIELD, J. Policy regimes and funding schemes to support investment for next-generation biofuels in the USA and the EU-27. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Chichester, v. 7, n. 6, nov./dez. 2013.
- PANULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration: a framework for analysis. **Renewable Energy**, Oxford, v. 24, n. 1, p. 73-89, set. 2001.
- PASSET, R. **A ilusão neoliberal**. Rio de Janeiro: Record, 2000.
- PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, Holanda do Norte, v. 13, p. 343-373, 1984.
- PEREIRA JUNIOR, N. **Produção de biocombustíveis inserida no contexto de biorrefinaria 2G**. Trabalho apresentando no Seminário interno do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, no Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.crq3.org.br/pdfs/Apresentacao\\_Nei\\_Pereira\\_4Forum.pdf](http://www.crq3.org.br/pdfs/Apresentacao_Nei_Pereira_4Forum.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2015
- PEREIRA, F. S. **Comparação internacional de programas de subvenção a atividades de PD&I em biocombustíveis**. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)– Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, Oxford, v. 34, n. 1, p. 185-202, 2009.
- PETERS, G. P. et al. Rapid growth in CO2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. **Nature Climate Change**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 2-4, dez. 2011.
- PETERS, M. et al. **Plant design and economics for chemical engineers**. New York: McGraw-Hill Science, 2002.
- PETERS, M. et al. The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change: does the locus of policies matter? **Research Policy**, Amsterdam [S.l.], v. 41, n. 8, p. 1.296-1.308, out. 2012.
- POLANYI, K. **A grande transformação: as origens de nossa época**. Rio de Janeiro: Campus, 1980.
- POLANYI, K. Nossa obsoleta mentalidade de mercado. In: \_\_\_\_\_. **A subsistência do homem e ensaios correlatos**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012. p. 209-227.
- POLÍTICA pública para o desenvolvimento sustentado do etanol. [201-]. Disponível em: <<http://www.novacana.com/sustentabilidade/politica-publica-para-o-desenvolvimento-sustentado-etanol/>>. Acesso em: set. 2015.

- PRADO JUNIOR, C. **História econômica do Brasil**. São Paulo: Brasiliense, 1942.
- PREBISCH, R. Crecimiento, desequilíbrio y disparidades: interpretación del proceso de desarrollo económico. In: CEPAL. **Estúdio econômico de América Latina**. Nova Iorque, 1949.
- PREBISCH, R. Five stages in my thinking on development. In: MEIER, G. M.; SEERS, D. **Pioneers in development**. Oxford: Oxford University Press, 1984.
- PREBISCH, R. O desenvolvimento econômico da América Latina e seus principais problemas. **Revista Brasileira de Economia**, [Rio de Janeiro], v. 3, n.3, p. 47-109, 1949.
- PREBISCH, R. **O manifesto latino-americano e outros ensaios**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2011.
- RABEHARISOA, V. A special mediation between science and technology: when inventors publish scientific articles in fuel cells research. In: GRUPP, H. (Ed.). **Dynamics of science-based innovation**. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1992. p. 45-72.
- RESENDE, A. L. Os novos limites do possível. **Valor Econômico**, São Paulo, 24 jun. 2012.
- RIMA, I. H. **História do pensamento econômico**. São Paulo: Atlas, 1977.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Vantagens do uso do palhiço para queima e produção de vapor. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 5, n. 8, p. 66-68, jan./jun. 2008.
- RODRIGUES, A. H. **Três patamares tecnológicos na produção de etanol: a usina do proálcool, a usina atual e a usina do futuro**. 2008. Tese (Pós-Graduação em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade) –Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- RODRIGUES, A. P. Perspectivas para o etanol no Brasil e no mundo. In: DUAILIBE, A. L. (Org.). **Combustíveis no Brasil: desafios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.
- RODRÍGUEZ, O. **O estruturalismo latino-americano**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2009.
- ROSA, L. P. **Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2006. v. 1.
- ROSA, L. P. **Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2007. v. 2.
- ROSA, L. P.; VILLELA, A.; CAMPOS, C. P. Biofuels in Brazil in the context of South America energy policy. In: FANG, Z. (Ed.). **Biofuels: economy, environment and sustainability**. Rijeka: InTech, 2013. cap. 13.
- ROSSETTO, R. A cana-de-açúcar e a questão ambiental. In: MIRANDA, L. L. D.; VASCONVELOS, A. C. M.; LANDELL, M. D. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2008. p. 869-882.
- ROTILLON, Gilles. **Économie des ressources naturelles**. Paris: Repères, 2010.
- SACHS, I. A revolução energética do século XXI. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 21-38, 2007.
- SACHS, I. **A terceira margem: em busca do ecodesenvolvimento**. São Paulo: Cia. das Letras, 2009.
- SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.
- SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Studio Nobel/FUNDAP, 1993.

- SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.
- SANTOS, G. R.; GARCIA, E. A.; SHIKIDA, P. F. A. A crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas. **Radar**, n. 39, p. [27]-38, jun. 2015.
- SANTOS, M. **Técnica, espaço, tempo: globalização e meio técnico-científico internacional**. 3. ed. São Paulo: EdUSP, 1997.
- SCHUCHARDT, U. L. F.; RIBEIRO, M. L.; GONÇALVES, A. R. A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria-prima. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 247-251, 2001.
- SCHUMPETER, J.A. **Capitalism, socialism and democracy**. New York: Harper and Brothers, 1942.
- SENNETT, R. **A corrosão do caráter**. Rio de Janeiro: Record, 1998.
- SENNETT, R. **O artífice**. Rio de Janeiro: Record, 2009.
- SENNETT, R. **Respeito: a formação do caráter em um mundo desigual**. Rio de Janeiro: Record, 2004.
- SHILS, E. Centre and periphery. In: **The logic of personal knowledge: essays presented to Michael Polanyi**. London: Routledge & Kegan Paul, 196. p. 117-30.
- SHILS, E. Mass society and its culture. **Daedalus**, Cambridge, Mass., v. 89, n. 2, p. 288-314, 1960.
- SHILS, E. Old societies, new states: a dialogue at rhodes. **Encounter**, London, v. 12, n. 3, p. 32-41, mar. 1959.
- SILVEIRA, L. C. I. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar para obtenção de cana energia**. 2014. Tese (Pós-graduação em Agronomia)–Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.
- SIMÕES, M.; PEREIRA, S.; FERRAZ, R. Geração de cenários de mudança de uso do solo na Amazônia legal brasileira em função do agronegócio e da aplicação de políticas públicas. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 2014. **Anais...** Aracaju: UFS, 2014. p. 405-409.
- SOARES, P. A.; ROSSEL, C. E. V. **Conversão da celulose pela tecnologia organosolv**. São Paulo: NAIPPE/USP, 2008.
- SOARES, P. A.; ROSSELL, C. E. V. **O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico**. São Paulo: NAIPPE/USP, 2007.
- SOUSA, L. C. **Sugestões de políticas públicas para o etanol 2G**. Trabalho apresentado no Seminário BNDES Avaliação do potencial competitivo do etanol 2G no Brasil, no Rio de Janeiro, abril de 2015.
- STAMFORD, L.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of UK shale gas. **Applied Energy**, London, v. 134, p. 506–518, dez. 2014.
- STEINMUELLER, W. E. Economics of technology policy. In: HALL, B. H.; ROSENBERG, N. (Ed.). **Handbooks in economics of innovation**. [S.l.]: Elsevier, 2010. v. 2, cap. 28.
- SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource technology**, [S.l.], v. 83, n. 1, p. 1-11, maio 2002.
- TAVARES, M. C. **Problemas de industrialización avanzada en capitalismo tardios y periféricos**. Rio de Janeiro: IEI/UFRJ, 1986. (Texto para Discussão, 94).

- TIGRE, P. B. Inovação e teorias da firma em três paradigmas. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, n. 3, jan./jun. 1998.
- TODD, E. **A ilusão econômica**. Lisboa: Piaget, 1998.
- TODD, E. *Depois do império*. Rio de Janeiro: Record, 2002.
- TOFFLER, A. **A terceira onda**. Rio de Janeiro: Record, 1980.
- TORRES, H. G. Indústrias sujas e intensivas em recursos naturais: importância crescente no cenário industrial brasileiro. In: \_\_\_\_\_. **População, meio ambiente e desenvolvimento**. Campinas: Ed. Unicamp, 1996.
- TOURAINÉ, A. **La société post-industrielle**. Paris: Éditions Denoël, 1969.
- TOURAINÉ, A. **Le retour de l'acteur**: essai de sociologie. Paris: Librairie Arthème Fayard, 1984.
- UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Spot prices**: crude oil in dollars per barrel, products in dollars per gallon. 2015. Disponível em: <[http://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_pri\\_spt\\_s1\\_d.htm](http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm)>. Acesso em: 01 jul. 2014.
- UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **What do I pay for in a gallon of gasoline and diesel fuel?** 2014. Disponível em: <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=22&t=10>>. Acesso em: 01 mar. 2015.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. **Multi-year program plan**: july 2014. Disponível em: <[http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/mypp\\_july\\_2014.pdf](http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/mypp_july_2014.pdf)>. Acesso em: 30 jul. 2014.
- US DEPARTMENT OF ENERGY. **Vehicle buyer's guide 2014**. 2013. Disponível em: <<http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/60448.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2014.
- VALLE, R. **A caminho da produção sustentável**. Rio de Janeiro: Manuscrito, 2014.
- VERÍSSIMO, G. **Programa de melhoramento genético de cana-de-açúcar**. Alagoas: Universidade Federal de Alagoas, 2015. Disponível em: <<http://www.sifaeg.com.br/noticias/cana-energia-2/>>. Acesso em: 09 maio 2015.
- VIEIRA, S. **Estudo de configurações de sistemas térmicos de geração de energia elétrica através da análise de exergia e de termoeconomia**. 1998. 247 f. Dissertação (Mestrado em Energia)– Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-18012012-184316/>>. Acesso em: 14 ago. 2015.
- VILLELA, A. A.; MOREIRA, J. R.; FREITAS, M. A. V. Panorama do uso de bioenergia no Brasil. In: ROSA, L. P. ; VILLELA, A. A.; FREITAS, M. A. V. **O uso de energia de biomassa no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. cap. 1.
- VIOLANTE, M. **Potencial de produção de cana-energia em áreas agrícolas marginais no Brasil**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Economia da Agroenergia)– Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2012.
- WARREN R. T. Global ethylene capacity continues advance in 2011. **Oil and gas journal**, Houston, v. 110, n. 7, 2012. Disponível em: <<http://www.ogj.com/articles/print/vol-110/issue-07/special-report-ethylene-report/global-ethylene-capacity.html>>. Acesso em: 01 fev. 2014.
- WEBER, M. **A ética protestante e o espírito do capitalismo**. São Paulo: Pioneira, 1967.
- WEISS, C.; BONVILLIAN, W. B. **Structuring an energy technology revolution**. [S.l.]: The MIT Press, 2009.

WORLD development indicators 2012. **World Bank Group**, [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/sites/default/files/wdi-2012-ebook.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

WYMAN, C. E. What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol. **Trends in Biotechnology**, Amsterdam, v. 25, n. 4, p. 153-157, abr. 2007.

YACOBUCCI, B. D. **Biofuels incentives**: a summary of federal programs. [Washington, DC]: Congressional Research Service, 2012. Disponível em: <<https://www.fas.org/sgp/crs/misc/R40110.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2013.

YE, F.; PAULSON, N.; KHANNA, M. Technology uncertainty and learning by doing in the cellulosic biofuel investment. In: AAEA ANNUAL MEETING, 2014, Minneapolis. **Anais...** Minneapolis: AAEA, 2014.

YOUNG, C. E. F.; LUSTOSA, M. C. J. A questão ambiental no esquema centro-periferia. **Revista Economia**, Niterói, v. 4, n. 2, p. 201-221, jul./dez. 2003.

YOUNG, C. E. F.; LUSTOSA, M. C. J. Meio ambiente e competitividade na indústria brasileira. **Revista de economia contemporânea**, Rio de Janeiro, v.5, p. 231-259, 2001. Edição Especial.

# ANEXO

## ROTEIRO DE ENTREVISTAS SOBRE ETANOL 2G

### 1. INSTITUTOS DE PESQUISA E ORGÃOS GOVERNAMENTAIS

<b>Nome da Instituição</b>	
Vinculação Administrativa	
Cidade / Estado	
Entrevistado / Cargo	
Data	
<b>Áreas de Atuação</b>	
▪ Agrícola	
▪ Equipamentos	
▪ Fertilizantes	
▪ Eficiência Energética	
▪ Etanol Celulósico	
▪ Biorrefinarias	
▪ Enzimas e Catalizadores	
<b>Equipe</b>	
▪ Número de Pesquisadores	
▪ Mestres / Doutores	
▪ Planta-piloto	

### 2. EMPRESAS

<b>Nome da Usina</b>	
Grupo Empresarial / ROL (MR\$)	
Cidade / Estado	
Entrevistado / Cargo	
Data	
<b>Capacidade Instalada</b>	
▪ Moagem (Mtc)	
▪ Açúcar (t)	
▪ Etanol Hidratado (m3)	
▪ Etanol Anidro (m3)	
▪ Vinhaça (m3)	
▪ Cadeira (bar)	
▪ Energia Elétrica (MW)	
<b>Produção (safra 2013/2014)</b>	
▪ Moagem (Mtc)	
▪ Caldo (Mt)	
▪ Melaço (Mtp)	
▪ Açúcar (t)	
▪ Etanol Hidratado (m3)	
▪ Etanol Anidro (m3)	
▪ Etanol Total (m3)	
▪ Vinhaça (m3)	
▪ Mecanização da Colheita (%)	
▪ Bagaço (Mtb)	
▪ Palha (Mtp)	
▪ Geração Energia Elétrica (MWh)	

### 3. PERGUNTAS

1. O desempenho recente do setor sucroalcooleiro vem sendo considerado, tanto pela ÚNICA, como pela maioria dos analistas do setor, como insatisfatório. Na sua opinião, quais seriam as principais causas disso?

2. Quais seriam os principais motivos para a retração dos investimentos no setor e do fechamento de diversas unidades produtoras? O Sr. consideraria o congelamento dos preços da gasolina automotiva e os aumentos nos custos fixos das usinas como os principais fatores?

3. Como o Sr. vê o futuro das usinas que não possuem saída pelo mercado de açúcar, dependendo exclusivamente do etanol? O açúcar tem conseguido remunerar o usineiro de AA?

4. Quanto aos equipamentos, o Sr. considera as colheitadeiras e demais implementos eficientes no corte e no transporte da cana, no aproveitamento do ATR, no recolhimento da palha e no preparo do solo para a próxima safra?

5. A mecanização da colheita trouxe um novo excedente para o processamento da cana: a palha. A parcela que precisa ser recolhida do campo está sendo aproveitada diretamente pela sua usina? Como? A palha está sendo comercializada? Os custos de coleta são aceitáveis? As margens são razoáveis?

6. A palha proporciona a ampliação do excedente de bagaço já disponível nas usinas, pois pode ser consumida nas caldeiras, por exemplo, em substituição ao próprio bagaço. Qual seria o melhor aproveitamento dessa palha, na sua opinião: queima na caldeira, em substituição ao bagaço, liberando bagaço para o etanol 2G ou na produção direta de etanol 2G?

7. Na sua opinião, qual seria a motivação em investir para aumentar a eficiência energética da usina, ampliando, assim, a disponibilidade de bagaço para geração de eletricidade e para o etanol 2G? Contratos de compra de energia, no estilo do Proinfa, seriam adequados? E quanto a linhas de financiamento para aquisição de equipamentos de maior eficiência?

8. A potência instalada para geração elétrica é da ordem de 6.000 MW, em cerca de 400 usinas sucroalcooleiras. Destas, apenas 110 unidades (com 4.000 MW instalados) vendem energia. O rendimento dessas que vendem energia é de 190 kWh por tonelada de bagaço. Para aquelas que apenas geram energia para seu próprio consumo (280 unidades), o rendimento é de 85 kWh por tonelada de bagaço. Caso tivessem a mesma eficiência que os "vendedores" de eletricidade, o excedente gerado por essas usinas seria da ordem de 6.000 GWh, que a preços do mercado livre de hoje (R\$ 800,00/MWh) significam algo como R\$ 4,8 bilhões de receita (ou R\$ 16 milhões, em média, por usina). Na sua opinião, porque a maioria das usinas tem pouco interesse em vender eletricidade?

9. Como a sua usina trata a questão da evolução e da atualização tecnológica? Possui equipe dedicada ao desenvolvimento de processos e tecnologia, mantém relacionamento próximo com instituições de pesquisa e desenvolvimento, p.ex.? Quais são as principais áreas do conhecimento estudadas (agricultura, química, mecânica, eletrônica, ...)?

10. A sua usina (ou grupo empresarial) está avaliando oportunidades no etanol celulósico? O Sr. considera que a melhor solução seria através de unidades dedicadas ao etanol celulósico ou a incorporação de módulos de produção de etanol 2G nas usinas em operação?

11. Quais seriam, no seu ponto de vista, as limitações para adoção da tecnologia 2G na sua usina? Aceitaria correr os riscos já a curto prazo ou aguardaria até que essa tecnologia esteja mais bem conhecida?

12. Como o Sr. vê a alternativa de verticalização da cadeia do etanol, caminhando na direção dos *block buildings* e da química verde? A cana energia, pela sua magnífica produtividade em celulose, seria uma oportunidade para estimular os derivados sucroquímicos?