

ISSN: 2594-0937

REVISTA ELECTRÓNICA MENSUAL

Debates sobre *i*nnovación

DICIEMBRE
2019

VOLUMEN 3
NÚMERO 2

XVIII Congreso Latino Iberoamericano de Gestión Tecnológica
ALTEC 2019 Medellín



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Xochimilco



MEGI
MAESTRÍA EN ECONOMÍA, GESTIÓN
Y POLÍTICAS DE INNOVACIÓN



LALICS

LATIN AMERICAN NETWORK FOR ECONOMICS OF LEARNING,
INNOVATION AND COMPETENCE BUILDING SYSTEMS

AS INICIATIVAS BRASILEIRAS NA TRAJETÓRIA DO ETANOL CELULÓSICO

Altair Aparecido de Oliveira Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Brasil
altair.filho@ifsp.edu.br

Flávia Luciane Consoni
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Departamento de Política Científica e Tecnológica, Brasil
flavia@ige.unicamp.br

Resumo

O presente artigo expõe e analisa as características do setor sucroalcooleiro frente ao desafio tecnológico do etanol celulósico, buscando identificar como os principais atores do Sistema Setorial de Inovação da cana-de-açúcar do Brasil (SSI) estão se posicionando e quais os avanços estão sendo alcançados. Percebe-se uma tímida reconfiguração setorial transcorrida na última década, com a presença de novos atores na fase industrial do processo produtivo e a busca e operacionalização de novos conhecimentos, ligados à área da biotecnologia. A importância deste setor é seu caráter alternativo frente às energias fósseis, responsáveis pela geração de sérios problemas ambientais na escala nacional e internacional.

Palavras chaves: Setor sucroenergético; Etanol Celulósico; Sistema Setorial de Inovação; Energias Renováveis

1 Introdução

A história do etanol celulósico¹ em território brasileiro apresenta um percurso de mais de 40 anos, com iniciativas que vão do desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias endógenas, aos esforços sistemáticos de adaptação de tecnologias estrangeiras oriundas de setores análogos ao processamento da biomassa. A trajetória setorial é repleta de situações elucidativas das características nacionais, expressando problemas do Sistema Nacional de Inovação, bem como das potencialidades não aproveitadas na sua plenitude.

Esta pesquisa analisa os momentos de inflexão do esforço local para introduzir novas tecnologias no segmento de biocombustíveis, especificamente, do etanol proveniente da cana-de-açúcar. O recorte analítico recai sobre as ações das firmas e das instituições de Ensino e Pesquisa que compõem o Sistema Setorial de Inovação da cana-de-açúcar do Brasil (SSI), pois estes agentes são os catalizadores dos processos gerais² e os responsáveis últimos por introduzir/usar as novas tecnologias no cotidiano da produção.

Os atores do SSI em destaque perseguem soluções tecnológicas que ampliam as possibilidades de processamento da biomassa, à medida que estas são capazes de gerar ganhos de escala, de

¹ Utiliza-se também os termos: etanol de segunda geração e E2G.

² O contexto político-econômico, as políticas públicas e as flutuações do mercado de açúcar e/ou etanol promovem forças que facilitam ou adicionam dificuldades as ações dos atores.

escopo e de promover a sustentabilidade ambiental. Tais fatores orientam os projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), em que as tecnologias de produção do etanol celulósico maximizam o uso energético e econômico da cana-de-açúcar, proporcionando a utilização quase completa da biomassa (incluindo palha e bagaço) por intermédio de processos físico-químicos que visam ter acesso aos açúcares contidos na celulose.

Esta investigação aponta o envolvimento de uma quantidade variável de atores nesse processo, não necessariamente responsáveis diretos pelo processamento da cana-de-açúcar. Identificou-se a forte presença de firmas oriundas de outros setores da economia, além de atores não-firmas, como as instituições públicas de ensino e pesquisa, as quais participam de projetos de pesquisa acadêmicos ou industriais, podendo ser autônomos ou em parcerias estratégicas (Oliveira, 2017). Estas iniciativas somadas adensaram os processos de aprendizagem no interior do SSI da cana-de-açúcar, consolidando competências e saberes estratégicos para o segmento.

Produzir mais combustível sem ampliar a pressão sobre os recursos naturais é um dos pilares de sustentação das iniciativas na trajetória tecnológica do etanol de segunda geração. Portanto, este trabalho investiga um caso de inovação para o desenvolvimento sustentável, que está em relação dialógica com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)³. Percebe-se que essa nova tecnologia pode contribuir decisivamente com o *Objetivo 7 (assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos)* e com o *Objetivo 13 (combate às alterações climáticas)*.

O etanol celulósico, ao se apresentar como Nova Fonte de Energia Renovável, evidencia seu potencial ambiental, ampliando a eficiência energética da matriz nacional a partir de uma opção de combustível líquido com menor emissão de gases de efeito estufa, quando comparada às fontes de energia tradicionais (combustíveis fósseis ou biocombustíveis de primeira geração).

Seguindo este debate, o artigo estrutura-se por meio de respostas às seguintes questões de pesquisa: 1) Quais são os atores/elementos do SSI da cana-de-açúcar que promovem o progresso técnico em direção ao domínio do etanol celulósico? 2) Quais são os projetos tecnológicos de etanol celulósico em curso no Brasil e quais as diferenças entre eles? 3) Quais são as relações estabelecidas entre estas firmas e outros atores do SSI da cana-de-açúcar no que tange o etanol celulósico?

³ Acordo internacional que contempla 17 Objetivos e 169 metas, envolvendo temáticas diversificadas relacionada ao meio ambiente e a vida no planeta terra. Tal acordo foi firmado por 196 países no ano de 2015.

Para a condução desta pesquisa, foram analisados entre os anos 2016 e 2017 os principais projetos industriais⁴ de etanol de segunda geração em curso no país. Este exercício traz uma noção evolutiva do segmento, bem como uma chave interpretativa de como os setores/indústria mudam e evoluem em países periféricos⁵.

Dentes os resultados encontrados, pode-se ter uma noção, mesmo que aproximada, do quão perto/longe está a tecnologia de etanol celulósico de ser uma opção complementar a produção de 1G no Brasil. Também nos permite identificar o esforço do SSI da cana-de-açúcar em introduzir uma inovação disruptiva que contribui decisivamente com o meio ambiente e com o progresso de soluções sustentáveis.

2 Metodologia

A estrutura deste estudo se apoia em dois procedimentos metodológicos, a) *coleta e tratamento dos dados secundários* e b) *trabalho de campo e entrevistas*. A coleta e o tratamento dos dados secundários foram feitos a partir de bases de dados de instituições governamentais e privadas segundo as necessidades da construção da narrativa da pesquisa, de forma a demonstrar os efeitos da reorganização dos modos de inovação do SSI da cana-de-açúcar e, principalmente, fornecendo uma dimensão espacial e econômica do setor.

Já as entrevistas, 10 no total, seguiram um roteiro de questões semiestruturadas, conforme Quadro 1. A identificação dos entrevistados ocorreu por meio de buscas nos *sites* das empresas, instituições ligadas ao desenvolvimento do etanol celulósico no Brasil e pela participação em eventos ligados ao setor sucroenergético (participação em 7 eventos setoriais).

⁴ Projetos industriais de etanol celulósico consistem nas iniciativas desempenhadas pelos atores (firmas e instituições de pesquisa), as quais visam em um dado momento realizar a prova de conceito por meio de prototipagem em pequena escala e/ou a construção de plantas industriais - escala piloto, demonstrativa e comercial. Com base na classificação adotada pela metodologia *Technology readiness levels (TRL)*, seleciona-se os projetos que se encaixam entre as fases TRL5 - TRL7 e TRL8 – TRL9. Adota-se as definições feitas por Stafford, Lotter, Brent e Maltitz (2017).

⁵ Os setores econômicos em economias subdesenvolvidas carregam características comuns, tais como: a) a forte heterogeneidade das firmas - diferentes níveis tecnológicos convivem ao mesmo tempo no mesmo setor; b) inovações intensivas em conhecimento advêm do exterior; c) os investimentos e a condução do Estado é fator central para avançar o nível tecnológico das firmas. Estes elementos estão presentes na tentativa de introduzir a produção do etanol celulósico na realidade do setor sucroalcooleiro.

Quadro 1. Instituições e firmas entrevistadas

Instituição/Firma	Posição	Data
CTBE	Gestor de Negócios	abril/2016
UNICA	Diretor Executivo	junho/2016
UNICA	Consultor de Emissões e Tecnologia	junho/2016
BioCelere	Gerente de Inovação	setembro/2016
FINEP	Ex-Presidente	fevereiro/2017
CTC	Gerente de Desenvolvimento Industrial	fevereiro/2017
CTBE	Diretor	maio/2017
Raízen	Diretor Executivo de Tecnologias e Projetos	maio/2017
Cenpes/Petrobras	Gerente de Biotecnologia	maio/2017
BNDES	Gerente do Departamento de Biocombustíveis	junho/2017

Fonte: elaboração própria.

As firmas analisadas com maior destaque são: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC); GranBio e Raízen. Este recorte implica trabalhar com os principais atores do SSI da cana-de-açúcar em termos de esforços de desenvolvimento do etanol celulósico, pois são as empresas que figuram como signatárias de projetos de pesquisa apoiados pelas políticas públicas na dimensão de estímulo a C&T (PAISS Industrial). Ademais, aparecem como detentoras de depósitos de patentes e/ou parceiras de empresas estrangeiras que detém competências na tecnologia do etanol celulósico.

Opta-se por estas firmas porque todos os fatores mencionados acima são encontrados conjuntamente. Outro ponto que fortalece a escolha é o destaque dado a elas pela mídia e pela literatura especializada. Assim, justifica-se o recorte analítico, considerando estas firmas como centrais para o processo engendrado em território nacional, representativas da mudança em curso (etanol de primeira geração para o etanol de segunda geração).

3 Os principais atores do SSI da cana-de-açúcar na trajetória do etanol celulósico: visão geral

As firmas compõem um importante elemento do Sistema Setorial de Inovação, sendo responsáveis pela transformação dos *inputs* em *outputs* (Malerba, 2002). Esta categoria de ator do SSI apresenta processos específicos de aprendizagem, competências e organizações (rotinas), as quais conduzem suas expectativas e os seus objetivos (Malerba, 2003. Nelson, 2007). A partir destes princípios, as firmas interagem com os demais agentes do SSI, tais como universidades, institutos de pesquisa, agências regulatórias, consumidores, fornecedores entre outros. Os agentes interagem por meio de processos de comunicação, troca, cooperação, competição e comando, e

assim estabelecem networks (redes de inter-relação) que criam canais e mecanismos de aprendizado interativo, elemento essencial para o processo de inovação (Lundvall, 2009. Joseph, 2009).

As mudanças exigidas pela tecnologia do etanol celulósico alteram a base de conhecimento na fase industrial do setor sucroalcooleiro, forçando um deslocamento do exclusivismo *DUI-mode* (*learning by doing, learning by using e learning by interacting*) para um padrão intermediário, visando o *STI-mode* (*learning by Science, Technology and Innovation*)⁶. Este movimento resulta em dois processos interessantes, os quais permeiam a realidade do setor na contemporaneidade: i) a ampliação da dependência tecnológica do SSI da cana-de-açúcar; ii) redefini os atores do SSI da cana-de-açúcar na fase industrial, principalmente no que se refere aos responsáveis pela introdução de novas tecnologias. Os trabalhos de Varricho (2012), Furtado (2014), Oliveira e Silveira (2013) e Oliveira (2017) corroboram esta afirmação.

Diante das premissas teóricas-conceituais, o foco deste artigo está nas ações das firmas que se comportam como dinamizadoras desse processo, não só por introduzirem o etanol celulósico no mercado de combustíveis, mas por representarem um fenômeno em gestação no país. Ao passo que constroem plantas industriais baseadas na rota celulósica, estas congregam outros elementos da estruturação do *STI-mode*, pois se beneficiam sistematicamente das interações promovidas pelo SSI da cana-de-açúcar, ou seja, são alvos de políticas públicas para inovação (PAISS Industrial e PAISS Agrícola), recebem aportes diretamente voltados ao P&D (FAPESP e FINEP), são firmas que estabelecem relações com agentes externos com a intenção de incorporar novas tecnologias (*Joint Venture*, cooperação tecnológica e aquisição de empresas estrangeiras), criam relações com atores não-empresas do SSI (universidades e ICTs). E, por fim, elaboram rotinas voltadas ao desenvolvimento destas novas tecnologias, baseadas em processos de aprendizagem não restritos ao *DUI-mode* (Oliveira, 2017).

A indústria do etanol celulósico está em construção e como tal encontra-se sem definições estruturais claras, contando com a presença de diversos “tipos” de firmas, tais como as grandes firmas processadoras de biomassa, as *startups* de base tecnológica, firmas tradicionais de exploração de recursos naturais (agrícolas e petróleo) e grandes firmas do setor químico.

⁶ Os trabalhos de Jensen, Johnson, Lorenz, e Lundvall (2007) e Lundvall (2007) elucidam os conceitos e operacionalizam como categorias analíticas validas para interpretar os processos de aprendizagem e de mudanças tecnológicas.

O quadro 2 expõe estas ações de maneira esquemática, indicando os principais atores, sua origem setorial e o principal interesses em participar da rota tecnológica do etanol celulósico.

Quadro 2. Os principais atores na trajetória do etanol celulósico – quem é quem?

Fundação	Ator	País	Origem	Setor	Relação / Interesse no setor sucroenergético
1899	IPT	Brasil	Público	Instituição de Pesquisa	Pesquisa & Desenvolvimento; Prestação de serviços (análise de materiais; análise da composição da biomassa).
1920	Dedini	Brasil	Privado	Bens de Capital	Fabricação de máquinas e equipamentos para a produção de açúcar, etanol e eletricidade a partir da cana-de-açúcar;
1953	Petrobras	Brasil	Público	Petróleo	Distribuição e logística do etanol; Com P BIO produzia açúcar, etanol e eletricidade.
1969	CTC	Brasil	Privado	P&D	Pesquisa & Desenvolvimento; Variedades de cana-de-açúcar.
1969	FTI Lorena/SP	Brasil	Público	Instituição de Pesquisa	Pesquisa & Desenvolvimento; Como integrante da USP exercer a função de desenvolvimento e disseminação de conhecimento sistematizado e de formação de mão de obra.
1957*	Clariant	Alemanha-Suíça	Privado	Química	Interesse na produção de bioquímicos a partir da cana-de-açúcar; Pesquisa & Desenvolvimento – ações exploratórias realizadas na Europa em E2G.
1957	Jaraguá Equip.	Brasil	Privado	Bens de Capital	Fabricação de máquinas e equipamentos para setor sucroenergético e de papel e celulose.
1970	Oxiteno	Brasil	Privado	Química	Produção de bioquímicos (solventes verdes).
1976	CODETEC	Brasil	Público	Universidade – empresa	Pesquisa & Desenvolvimento; Prestação de serviços e assessoria a pequenas empresas de base tecnológica ligada à Unicamp.
1979	Brasil Bioenergia	Brasil		Bioenergia	Produção e comercialização de etanol, açúcar e energia a partir da cana-de-açúcar; Produção de Bioagentes (Biovespa, Biorrizium e Biovéria) - controle de pragas.
1979	COALBRA	Brasil	Público	Bioenergia	Produção de etanol, coque e furfural.
2007**	Abengoa Bioenergia	Espanha	Privado	Bioenergia	Produção e comercialização de etanol, açúcar e energia a partir da cana-de-açúcar; Pesquisa & Desenvolvimento – ações exploratórias realizadas na Europa e nos EUA em E2G.
2007	Odebrecht Agro.	Brasil	Privado	Bioenergia	Produção e comercialização de etanol, açúcar e energia a partir da cana-de-açúcar;
2008***	BP	Reino Unido	Privado	Petróleo	Produção e comercialização de etanol, açúcar e energia a partir da cana-de-açúcar; Pesquisa & Desenvolvimento – ações exploratórias realizadas nos EUA em E2G.
2010	CTBE	Brasil	Público	Instituição de Pesquisa	Pesquisa & Desenvolvimento; Prestação de serviços;
2010	Raízen	Brasil – Holanda – Reino Unido	Privado	Bioenergia	Produção, distribuição e comercialização de etanol, açúcar e energia a partir da cana-de-açúcar;
2011	GranBio	Brasil	Privado	Biotechnology	Pesquisa & Desenvolvimento; Cana-energia; bioquímicos; Produção de E2G.

Fonte: elaboração própria.

¹ *As atividades da *Clariant* no Brasil herdaram as estruturas da *Hoechst* (que chegou ao Brasil 1957), firma alemã que se incorporou a *Clariant* em 1997. ***Abengoa bioenergy* é de 1980, mas chega ao Brasil em 2007. ***A criação da *BP* é de 1909, mas sua atuação no setor sucroenergético é de 2008.

No ano de 2017, o Brasil contava com três plantas de etanol 2G em operação. As firmas que conduzem e conduziram os principais projetos industriais em etanol celulósico são⁷: *CTC*; *GranBio* e *Raízen*. Estes três casos possuem plantas instaladas e em funcionamento, sendo duas em escala comercial (*GranBio* e *Raízen*) e uma em escala demonstrativa (*CTC*) e consolidam-se no cenário nacional à medida que absorvem novos conhecimentos e aprendem com o próprio uso da nova tecnologia. Ademais, representam os atores brasileiros que melhor acompanham a corrida tecnológica em curso no plano internacional.

Acrescenta-se que no processo de mapeamento dos atores do SSI da cana-de-açúcar identificou outras firmas com projetos industriais em etanol celulósico, entretanto, estas apresentam suas iniciativas descontinuadas ou envoltas em incertezas promovidas tanto pelo contexto socioeconômico como por novas estratégias empresariais, a saber: *Villares Metals S.A*; *Dedini Indústria de Base*; *Jaraguá Equipamentos Industriais*; *Petrobras*; *Oxiteno*; *Odebrecht Agroindustrial*; *Bioenergia do Brasil S/A*; *Abengoa Bioenergia*; *Clariant*; *British Petroleum Biocombustíveis (BP)*.

Estes casos são “chamados” à narrativa para demonstrar elementos próprios da dinâmica da evolução da tecnologia, justamente em um momento pré-paradigmático, onde a incerteza, a entrada/saída de atores e a disputa de *designs* tecnológicos distintos compõem o quadro histórico deste contexto.

De maneira correlacionada e independente, apresentam-se também atores não-firmas que conduzem ações na trajetória do etanol celulósico na fase industrial do SSI da cana-de-açúcar, tendo como expoentes: *o CTBE, IPT e a Escola de Engenharia de Lorena-USP*. Os atores não-firmas são relevantes no processo de interação e cooperação no interior do SSI da cana-de-açúcar, mas não apenas, visto que o CTBE apresenta uma planta-piloto de E2G e projetos industriais completos em fase de testes.

Os atores não-firma, além de colaborar e funcionar como fontes de conhecimentos sistematizados, conduzem desenvolvimentos tecnológicos particulares que se somam às iniciativas em curso, dinamizando o processo de aprendizado do SSI (o caso do CTBE reúne estes elementos).

Como indicado no quadro 2, sobre a trajetória brasileira no etanol celulósico, o Brasil conta com diversas iniciativas voltadas ao desenvolvimento da tecnologia industrial do etanol celulósico,

⁷ Levantamento que ocorreu até 2017, ano de conclusão desta pesquisa.

com ações que remontam à década de 1980. A partir dos esforços empreendidos ao longo do tempo, é possível perceber a distribuição dos atores por rota tecnológica e o “grau” deste esforço (pesquisas em laboratório, planta-piloto, escala de demonstração ou planta comercial).

Somadas, tais ações representam o esforço do SSI da cana-de-açúcar em desenvolver competências internas na nova rota tecnológica, as quais foram fortemente suportadas pelo poder público e conduzidas a partir de parcerias estratégicas com firmas estrangeiras, detentoras de tecnologia (*vide* figura 1 na seção 3.1. desse trabalho).

O Quadro 2 também aponta para a “posição” de cada firma ou instituição que realizou esforços nessa trajetória, com menção a sua origem e sua relação com o setor sucroenergético. Com isso, coloca em relevo um conjunto de evidências e informações que substanciam a resposta da pergunta de pesquisa sobre “*Quais são os atores/elementos do SSI da cana-de-açúcar que promovem o progresso técnico em direção ao domínio do etanol celulósico?*”, visto que nomeia e identifica cada ator que liderou iniciativas de desenvolvimento, aquisição ou adaptação da tecnologia de E2G no Brasil ao longo do tempo.

Foram identificadas 13 iniciativas concretas voltadas ao desenvolvimento da tecnologia industrial de segunda geração no Brasil, conduzidas por atores distintos, sendo que há 10 firmas e 3 atores não-firmas (CTBE, IPT e FTI Lorena) conduzindo/liderando as iniciativas de P&D. Para melhor compreender as características do esforço nacional no universo da tecnologia do etanol celulósico, bem como, para identificar as relações estabelecidas pelos atores no SSI da cana-de-açúcar, as iniciativas foram classificadas em quatro grupos:

- i) **Iniciativas Pioneiras** - FTI Lorena/SP; COALBRA; CODETEC e Dedini;
- ii) **Iniciativas Incipientes** - *Brasil Bioenergia; Jaraguá Equipamentos; Abengoa; Clariant e BP;*
- iii) **Iniciativas Exploratórias** - *IPT; CTBE; Petrobras; Oxitenio; Odebrecht Agroindustrial;*
- iv) **Iniciativas Estruturadas** – *CTC; GranBio e Raízen* (portadoras de futuro).

Esta estrutura analítica facilita a interpretação do esforço nacional e vai além do mapeamento de atores, mostrando os avanços, os problemas e as particularidades do SSI da cana-de-açúcar na(s) rota(s) do etanol celulósico - com particular atenção aos casos dos anos 2000 (Iniciativas Estruturadas).

As Iniciativas Pioneiras correspondem aos projetos industriais implementados no Brasil na década de 1980, ações que iniciaram as pesquisas e estabeleceram os primeiros passos nacionais nesta tecnologia. Distinguem-se das outras iniciativas pelo seu turno temporal e principalmente, pela opção tecnológica (rota ácida).

As Iniciativas Incipientes são os projetos e as ações que não atingiram maturidade, ou seja, não foram capazes de sair do nível da especulação, da elaboração dos projetos, ou ainda, não atingiram os objetivos propostos pela própria iniciativa, sendo interrompidos de maneira abrupta (forças do contexto e/ou reformulação da estratégia da firma).

As Iniciativas Exploratórias são basicamente as ações de pesquisa no nível laboratorial ou em escalas-reduzidas (bancada e piloto). Estas iniciativas caracterizam-se por não atingirem o estágio de *early commercial deployment* (Stafford et al., 2017), ou seja, não estabelecerem concretamente unidades de processamento de biomassa, sendo incapazes de estudar/resolver de maneira direta questões relacionadas à fabricação, manuseio e processamento da matéria-prima, eficiência energética e resíduos.

Por sua vez, as Iniciativas Estruturadas são aquelas que atingiram “maturidade” e materializaram-se na realidade do SSI da cana-de-açúcar – estando em um nível à frente das Iniciativas Exploratórias. São capazes de produzir etanol celulósico, mesmo que por um curto período de tempo e sem atingir a sua capacidade projetada. Entretanto, são ações que municiam o SSI com novas informações estratégicas, já que presenciaram na execução dos seus projetos situações e problemas que até então não tinham sido sequer aventados pelo setor sucroalcooleiro.

Desta forma, as ações estruturadas imprimem um ritmo mais acelerado e territorializado no processo de aprendizagem do SSI da cana em relação à tecnologia de conversão da biomassa, visto que os experimentos e os problemas vivenciados por meio das estruturas em funcionamento promovem conhecimentos impossíveis de serem obtidos em escala laboratorial ou no nível da teoria científica.

Os *highlights* a seguir dão uma noção geral do esforço nacional e levantam pontos que devem ser levados em consideração no momento da avaliação sistemática sobre a trajetória adotada pelo Brasil nessa tecnologia. Os destaques são:

- No decorrer da trajetória brasileira, tem-se uma mudança de rota tecnológica: as Iniciativas Pioneiras eram calcadas na hidrólise ácida, já as iniciativas realizadas nos anos 2000 pautam-se na sua maioria na hidrólise enzimática e na busca pela exploração da C5 (Xilose e Pentose) por meio de leveduras adaptadas geneticamente (*OGMs*) - fermentação de alto rendimento. A exceção fica por conta do caso do IPT, que baseia a sua tecnologia no processo de gaseificação da biomassa;

- As iniciativas brasileiras ocorrem em simultâneo com as ações conduzidas em outros países (no primeiro momento, final dos anos 1970 e início dos anos 1980; no segundo momento, início da segunda década de 2000). O Brasil segue a tendência mundial. Os dados de depósitos de patentes e publicações de artigos científicos trabalhados em Oliveira (2017) indicam essa condição.
- A iniciativa da Dedini é a mais duradoura do Brasil (23 anos) e antecipa a estratégia de estabelecer parcerias. Diferentemente dos casos dos anos 2000, suas relações de cooperação são estabelecidas com atores nacionais;
- Todas as iniciativas dos anos 2000 estabeleceram parcerias estratégicas⁸ com firmas estrangeiras. Este fato é o *modus operandi* para acessar tecnologias ligadas ao processo de pré-tratamento, hidrólise e fermentação da C5.
- O estabelecimento de parcerias com atores estrangeiros visa ter acesso a conhecimentos específicos, adquirir novas competências, adquirir insumos tecnológicos e utilizar estruturas de processamento de biomassa já em funcionamento para realização de testes (plantas-pilotos e plantas de demonstração). As parcerias com atores nacionais visam adquirir matéria-prima e compartilhar infraestrutura;
- Todas as Iniciativas Exploratórias e todas as Iniciativas Estruturadas receberam aportes diretos das agências e órgãos de fomento para as atividades de P&D. Com grande destaque ao programa PAISS Industrial, que sustentou financeiramente a construção das plantas industriais em escala comercial. O mapeamento de políticas públicas e análise dos casos demonstram que o esforço nacional foi estimulado e sustentado financeiramente pela ação do Estado Brasileiro (Oliveria, 2017).
- As iniciativas dos anos 2000 são conduzidas por atores distintos, principalmente, por firmas de diferentes “naturezas”. Este fato indica que o SSI da cana-de-açúcar passa por um movimento de ampliação das suas fronteiras setoriais – atores que agem sobre uma nova base tecnológica e de conhecimento;
- Os casos dos anos 2000 são conduzidos por novos atores do SSI da cana-de-açúcar (firmas e instituições criadas na última década), com exceção do CTC.
- Nas Iniciativas Exploratórias e nas Iniciativas Estruturadas é que se têm o desenvolvimento de competências nacionais na rota de E2G, pois firmas e instituições de pesquisa destinam recursos para apreender e desenvolver conhecimento economicamente útil na rota 2G. Ademais, os projetos de P&D são pensados e conduzidos para dar conta dos problemas do setor sucroenergético. Estas competências surgem como consequência de pesquisas e melhoramentos tecnológicos ocorrendo em território nacional e por meio do trabalho de pesquisadores, engenheiros e técnicos “brasileiros”;
- As Iniciativas Estruturadas geraram expectativas muito acima da realidade, tendo sido impactadas por problemas não previstos no início do projeto, assim como por momentos de menor credibilidade e de desenvolvimento menos acelerado. Com isso, tendem a contingenciar novos investimentos para novas plantas de E2G.

⁸ Define-se as parcerias estratégicas que visam o desenvolvimento de novas tecnologias ou a obtenção de competências tecnológicas como acordos cooperativos entre firmas independentes que compartilham objetivos tecnológicos comuns, tal ação afeta o posicionamento de mercado no longo prazo de pelo menos um dos parceiros. Dependendo do conteúdo tecnológico ou da base de conhecimento da firma/setor, os parceiros das empresas podem ser institutos de pesquisa e universidades.

3.1. Iniciativas Estruturadas: desenvolvimento e adoção da tecnologia de etanol celulósico no Brasil

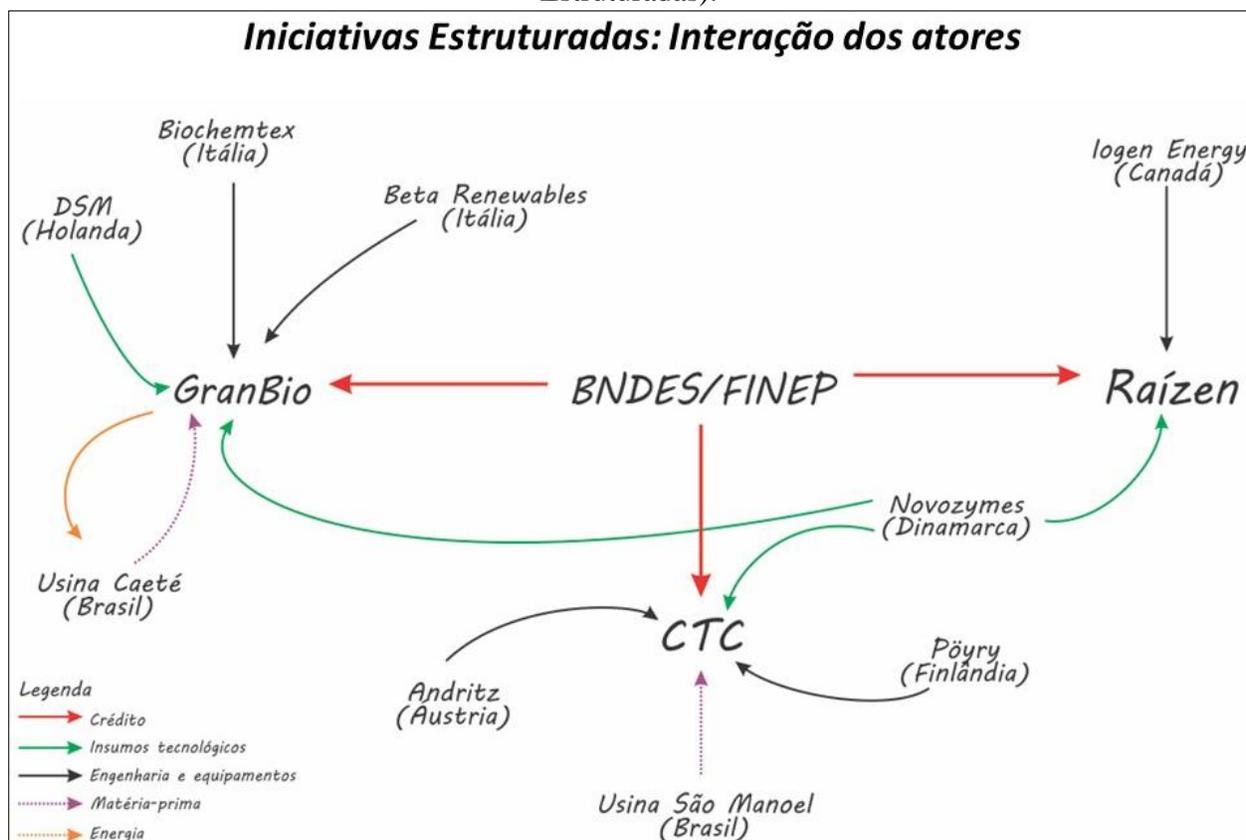
As Iniciativas Estruturadas, representadas pelas experiências de CTC; GranBio e Raízen, aborcam os projetos que seguiram a rota bioquímica e atingiram o *status* de plantas de demonstração e plantas comerciais, sendo capazes de trabalhar em condições reais, explorando o cotidiano e vivenciando os problemas da produção industrial do E2G. quadro 3 e figura 1 indicam os detalhes dos projetos industriais em curso no Brasil, todas ainda em operação, sinalizando para a capacidade produtiva instalada.

Quadro 3. Projetos industriais de etanol celulósico no Brasil (Iniciativas Estruturadas) (2017).

Características/Firma	CTC	GRANBIO	RAÍZEN
Projeto	Demonstrativo	Comercial	Comercial
Matéria-prima	Bagaçõ	Palha/bagaço	Bagaçõ
Rota tecnológica	Bioquímica	Bioquímica	Bioquímica
Capacidade produtiva (milhões de litros/ano)	-	82	40
Integração 1G/2G	Sim	Não	Sim
Crédito via BNDES Planta industrial (Milhões de R\$)	71.100.000	300.295.000	207.762.000
Parceiros para desenvolvimento do Projeto	Novozymes	Beta Renewables	Iogen Energy
Tipo da parceria	P&D conjunta	Licenciamento tecnológico	<i>Joint Venture</i>
Patentes Brasil (Firma líder do projeto)	1	3	-
Patentes Brasil (Firma Parceira)	69	-	14
Start up	2014	2014	2015
Certificados	-	<i>ARB (Air Resource Board)</i>	-

Fonte: elaboração própria

Figura 1. Interação nos projetos industriais de etanol celulósico no Brasil (Iniciativas Estruturadas).



Fonte: elaboração própria

A figura 1 demonstra o estabelecimento de relações e interações nas Iniciativas Estruturadas, estas aspiram o desenvolvimento do E2G ou a obtenção de competências tecnológicas para tal. As interações ocorrem com atores variados e com intencionalidades distintas, motivadas pela busca por crédito, insumos tecnológicos, engenharia e equipamentos. Os acordos cooperativos entre firmas independentes que compartilham objetivos tecnológicos comuns, tendem a afetar o posicionamento de mercado no longo prazo de pelo menos um dos parceiros. Dependendo do conteúdo tecnológico ou da base de conhecimento da firma/setor.

A dinâmica dos projetos de desenvolvimento da tecnologia industrial no Brasil reflete elementos da corrida tecnológica internacional, na qual atores heterogêneos buscam estabelecer um *standard* para a tecnologia de transformação da biomassa em etanol e em outros bioprodutos. A tabela 1 indica algumas das faces desse contexto, bem como, mostra o posicionamento das empresas brasileiras ante aos principais *players* internacionais, sendo os dois casos mais avançados GranBio e Raízen.

O etanol celulósico no Brasil apresenta algumas vantagens “de partida”, ou seja, uma situação favorável devido à sua base de recursos naturais e pela trajetória de aprendizagem desenvolvida no etanol de primeira geração (domínio das técnicas agrícolas, logística e infraestrutura para o consumo). Concomitante a estas vantagens, tem-se o fato que os novos processos de produção de etanol (2G) são baseados em resíduos agroindustriais que não competem com o uso da água ou com a produção de alimentos. Ademais, a cana-de-açúcar apresenta o melhor custo de matéria-prima, como fica evidente na observação da tabela 1.

Tabela 1. Características técnicas dos projetos industriais de etanol celulósico no mundo e custo de produção estimado no ano de 2016 (projetos em operação).

Características	Raízen	GranBio	Poet-DMS	Beta Renewables	DuPont	Abengoa
País	Brasil	Brasil	EUA	Itália	EUA	EUA
Capacidade (milhões de l/ano)	40	83	94	75	113	94
Custo de capital (milhões de dólares)	100	265	275	210	225	500
Matéria-prima	Bagaço de cana	Palha de cana	Palha de milho	Palha de Trigo	Palha de Trigo	Palha de milho
Custo da matéria-prima (US\$/ton)	38	40	90	75	52	90
Pré-tratamento	Ácido diluído	Explosão a vapor	Ácido diluído	Explosão a vapor	Alcalino	Ácido diluído
Potencial de geração de energia (MW)	7	16	17	13	N/A	21
Custos de produção (US\$/l)	0,26	0,3	0,52	0,53	0,54	0,63
Preço mínimo de venda do etanol celulósico (US\$/l)	0,57	0,7	0,8	0,87	0,88	1,2

Fonte: elaboração própria a partir de Nova Cana (2016)⁹.

O relatório “*Uncovering the Cost of Cellulosic Ethanol Production*” da Lux Research (2016) indica que os custos com a matéria-prima é o fator mais importante para determinar os custos de produção do etanol celulósico, correspondendo a 40% do total. Assim, a Raízen e a GranBio apresentam os menores custos de produção de etanol celulósico no mundo em 2016.

Os esforços de pesquisa desenvolvidos pelos atores brasileiros e por aqueles que aqui estão, pelo menos na sua formulação, predispõem-se ao desenvolvimento de competências para dominar a tecnologia de segunda geração. Visam assim aproveitar as condições vantajosas da base natural

⁹ As informações foram obtidas no resumo executivo do relatório e em reportagem especial do portal Nova Cana, o qual está disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/custo-producao-etanol-celulosico-usinas-mundo-150316/>> Acesso 10 Outubro 2016.

para ir além, com isso, explorar novos mercados por meio de novas tecnologias de transformação da biomassa em biocombustíveis, bioquímicos e biomateriais.

4. Conclusões

A pesquisa trouxe elementos para compreender a dinâmica do etanol celulósico no Brasil, identificando quais são as ações nessa direção, ou seja, compreender como ocorre o movimento pela densificação e diversificação do SSI da cana-de-açúcar, condição *sine qua non* para o desenvolvimento de setores econômicos baseados em recursos naturais (Andersen, 2011. Furtado, 2014. Andersen, Johnson, Marín, Kaplan, Dave, Stubrin, Lundvall & Kaplinsky, 2015).

A análise dos projetos industriais de etanol celulósico fornece elementos para compreender a mudança setorial e identificar ações na direção do adensamento e diversificação do SSI da cana-de-açúcar, que ao fazê-lo, desloca as suas fronteiras setoriais, mediante a busca de novos conhecimentos e novas tecnologias. De maneira correlata, traz novos atores para o SSI, os quais somados aos já estabelecidos, introduzem novos processos produtivos e novos produtos.

A chave interpretativa é compreender a direção do desenvolvimento do setor, mas, principalmente, a maneira e a intensidade de como ocorre. Afinal, entender a dinâmica do desenvolvimento é identificar as características particulares desse processo, que em essência é permeado por dificuldades (técnicas e institucionais) e por incertezas promovidas pela própria natureza do processo inovativo.

Tais dificuldades residem na própria tecnologia de segunda geração, a qual exige uma transição qualitativa do modo de inovação do setor (mais ciência e tecnologia). Neste contexto, a grande questão é compreender como é possível promover esta transição. O Brasil, ainda que tenha plantas de etanol celulósico em operação e com custos melhores do que as concorrentes internacionais, revela enorme dependência em relação às tecnologias estrangeiras (equipamentos e insumos). Por outro lado, mesmo com tecnologias incorporadas, estabelecem-se processos de adaptação e desenvolvimento endógeno, e as ações da GranBio, da Raízen, do CTC e do CTBE indicam essa posição.

As iniciativas levantadas pela pesquisa indicam a ocorrência de ganhos de experiências e o desenvolvimento de competências locais, as quais foram conduzidas nas **Iniciativas Exploratórias** (*Oxitemo; Odebrecht Agroindustrial; IPT; CTBE; Petrobras/Cenpes*) e nas **Iniciativas Estruturadas** (*CTC; GranBio e Raízen*). Estas são frutos das novas políticas públicas

implementadas ao longo dos anos 2000 e dos esforços e recursos empregados na rota tecnológica do etanol celulósico advindos de diversos tipos de atores (firmas; ICTs e agências públicas – BNDES, FINEP, FAPESP).

Como exemplo destes ganhos tem-se: 1) o desenvolvimento de pesquisa junto a universidades (Oxiten, Odebrecht, GranBio e CTC); e 2) aquisição de competências em processos industriais não utilizados na produção do 1G, tais como a limpeza da biomassa; pré-tratamento; hidrólise enzimática e fermentação da C5.

Por mais que estes processos não estejam funcionando próximos das definições conceituais, pode-se afirmar que o SSI da cana-de-açúcar se aproxima muito mais da rota tecnológica do E2G em 2017 do que anteriormente. Como ilustração, para cada etapa do processo de produção, os atores (diferentes) têm implementado ações para solucionar ou aperfeiçoar esses processos: o CTC desenvolveu um “pacote” tecnológico com a possibilidade de integração de plantas industriais de E1G e E2G; a Raízen (por adaptação) criou um equipamento para limpar a biomassa; a GranBio criou uma nova cepa de leveduras capazes de fermentar C5; o CTBE desenvolve um “sistema” de produção de enzimas; a Petrobras/Cenpes também apresenta a competência tecnológica capaz de implementar uma planta de E2G.

Os casos que não atingiram a escala *TRL8/TRL9 (Early commercial deployment)* sinalizam as incertezas que pairam sobre esta rota tecnológica, bem como as barreiras que interferem na concretização de iniciativas inovadoras como um todo. Os esforços resultam em ganhos de experiência, mas nem sempre avanços de maneira concreta.

As maiores dificuldades encontradas pelas iniciativas brasileiras foram/são: **a)** entraves institucionais, os quais vão da demora em regular um organismo geneticamente modificado (OGM) até a ausência de instrumentos de política pública que fortaleçam a demanda do E2G; **b)** baixo desempenho da tecnologia importada (muitos problemas técnicos que derivam da interação com a realidade brasileira – biomassa e solo); **c)** contexto nacional e internacional permeado por incertezas de várias naturezas (crise política; questionamento crescente das políticas/ações pró-mudanças climáticas; “concorrência” com outras alternativas tecnológicas).

O cenário ainda é incerto, mas as vertentes da transição do SSI estão postas e, aparentemente, não será uma via única, pois até o momento o setor apresenta ações que fortalecem a transição em uma ótica de dependência (incorporando pacotes tecnológicos e insumos biotecnológicos) e ora apresenta soluções endógenas que visam contrapor esta tendência. O que foi

exposto até o momento fornece um panorama geral dessa dinâmica, que certamente moldará o futuro da bioenergia no Brasil.

5. Referências

Andersen, A. D. (2011). *Innovation systems and natural resources: The case of sugarcane in Brazil*. Ph.D. thesis. Aalborg University, Department of Business and Management. Copenhagen, Denmark.

Andersen, A. D., Johnson, B. H., Marín, A., Kaplan, D., Stubrin, L., Lundvall, B-Å., & Kaplinsky, R. (2015). Natural resources, innovation and development. Aalborg Universitetsforlag. 10.5278/VBN/MISC/NRID.

Furtado, A. Scandiffio, M. Cortez, L. (2011). The Brazilian sugarcane innovation system. *Energy Policy*, v.39, n.1, p. 56-166.

Furtado, A. T. (2014) Sistemas de innovación basados en recursos naturales: balance de dos experiencias sectoriales brasileñas. In: Bruckman, M. (Org.). Ciencia, tecnología, innovación e industrialización en américa del sur: hacia una estrategia regional. Quito: UNASUR, p. 153-168.

Jensen, M. B.; Johnson, B.; Lorenz, E.; Lundvall, B.A. (2007). Forms of knowledge and modes of innovation. *Research Policy*, n 36, p. 680–693.

Joseph, K. J. (2009). Sectoral innovation systems in developing countries: the case of ICT in India. In Lundvall, A.B., Joseph, K.J., Chaminade, C. and Vang, J. (eds.) *Handbook of Innovation Systems and Developing Countries*. Building Domestic Capabilities in a Global Setting. Edward Elgar, Cheltenham, UK and Northampton, MA, USA.

Lundvall, B. A. (2007). Innovation System Research – Where it came from and where it might go, *Globelics Working Paper Series*, Globelics - Global Network for Economics of Learning, Innovation, and Competence Building Systems, Aalborg University, Department of Business and Management.

Lundvall, B.A., Vang, J., Joseph, K.J. e Chaminade, C. (2009). Innovation system research and developing countries. In: Lundvall, A.B., Joseph, K.J., Chaminade, C. and Vang, J. (eds.) *Handbook of Innovation Systems and Developing Countries*. Building Domestic Capabilities in a Global Setting. Edward Elgar, Cheltenham, UK and Northampton, MA, USA.

Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, n. 31, p.247-264.

Malerba, F. (2003). Sectoral systems and Innovation and Technology Policy. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas, v. 2, n. 2, p.329-375.

Nelson, R. (2007). Understanding economic growth as the central task of economic analysis. In: Malerba, F. and Brusoni, R. *Perspectives on innovation*, Cambridge University Press, New York.

Oliveira Filho, A. A. de; Silveira, M. R. (2013). Difusão tecnológica a partir das indústrias de bens de capital de Piracicaba/SP: modernização e diversificação do setor sucroalcooleiro. *Geografia*, Rio Claro, v. 38, n. 2, p.277-294.

Oliveira Filho, A. A. de. (2017). *Mudanças e permanências no Sistema Setorial de Inovação da cana-de-açúcar: o caso do etanol celulósico*. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, Brasil.

Stafford, W. Lotte, A. Brent , A. Maltitz, G. V. (2017). *Biofuels technology: A look forward*. WIDER Working Paper. Helsinki: UNU-WIDER.

Varrichio, P. de C. (2012). *Uma análise dos condicionantes e oportunidades em cadeias produtivas baseadas em recursos naturais: o caso do setor sucroalcooleiro no Brasil*. Tese (Doutorado) - Curso de Política Científica e Tecnológica, Departamento de Instituto De Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.