

SISTEMAS DE INOVAÇÃO: A GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NA AGROINDÚSTRIA BRASILEIRA DA CANA-DE-AÇÚCAR¹

Renata Martins Sampaio²
Alceu de Arruda Veiga Filho³
Maria Beatriz Machado Bonacelli⁴

RESUMO: Este estudo discute a geração de bioeletricidade pela agroindústria brasileira da cana-de-açúcar. O esforço encontra motivação no potencial de uso dos resíduos resultantes da produção de açúcar e etanol, o bagaço e a vinhaça, para a geração de bioeletricidade, assim como na trajetória virtuosa construída pelo sistema nacional de inovação da cana-de-açúcar. Para tanto, procura apoio na proposta teórica sobre sistemas de inovação para o tratamento de aspectos tecnológicos, econômicos e institucionais relacionados à geração de bioeletricidade da cana-de-açúcar. Os resultados apontam um novo ambiente institucional e econômico e, condições tecnológicas distintas para o uso do bagaço e da vinhaça, assim como o aproveitamento limitado desses resíduos frente ao potencial estimado. Nesse retrato pontuam-se desafios regulatórios, econômicos e tecnológicos ao sistema brasileiro inovação da cana-de-açúcar e suas interações com a dinâmica de produção e inovação de outros segmentos industriais.

Palavras-chave: energia elétrica, sucroenergético, bioenergia, políticas públicas, bagaço, vinhaça

INNOVATION SYSTEMS: BIOELECTRICITY GENERATION IN THE BRAZILIAN SUGARCANE AGRIBUSINESS

ABSTRACT: This study discusses the generation of bioelectricity for the Brazilian sugarcane agribusiness. This effort is motivated by the potential use of waste from the production of sugar and ethanol - bagasse and vinasse - for bioelectricity generation, as well as by the virtuous path built by the national sugarcane innovation system. To that end, it seeks support from the theoretical proposal on innovation systems for addressing the technological, economic and institutional aspects concerning the generation of sugarcane bioelectricity. The results show a new institutional and economic environment and distinct technological conditions for the use of bagasse and vinasse, as well as their limited use considering their estimated potential. This scenario portrays economic, regulatory and technological challenges to the Brazilian sugarcane innovation system and its interactions with the production and innovation dynamics of other industries.

Key-words: electric energy, bioenergy, public policy, bagasse, vinasse.

JEL Classification: O32, Q42, Q48.

¹Registrado no CCTC, REA-12/2014.

²Administradora, Mestre, Pesquisadora Científica do Instituto de Economia Agrícola, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: renata@iea.sp.gov.br).

³Economista, Mestre, Pesquisador Científico do Instituto de Economia Agrícola, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: alceu@iea.sp.gov.br).

⁴Economista, Doutora, Departamento de Política Científica e Tecnológica (DPCT), Instituto de Geociências (IG), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil (e-mail: bia@ige.unicamp.br).

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil, um dos líderes mundiais na produção e consumo de biocombustíveis, tem na produção de açúcar a origem de um complexo agroindustrial que, ao longo dos últimos 40 anos, consolidou-se, também, no fornecimento de etanol. Da biomassa, cana-de-açúcar, o aproveitamento de energia inicia-se em sua moagem, fermentação e destilação ou refinamento que resulta na produção de etanol e açúcar e de resíduos capazes de contribuir para a geração de energia elétrica, a bioeletricidade⁵.

Dentre esses resíduos, o bagaço da cana-de-açúcar quando queimado gera vapor (energia térmica) o qual é convertido em eletricidade destinada ao funcionamento do próprio sistema e com possibilidade de comercialização do excedente gerado. Além do bagaço, outra biomassa residual gerada na fermentação do caldo da cana, a vinhaça, é aproveitada no processo de fertilização dos canaviais, mas seu uso também pode ser direcionado à produção de eletricidade, por meio de tecnologias de conversão como, por exemplo, a biodigestão.

A integração desses processos de conversão representa a estrutura de geração de bioeletricidade a partir da cadeia agroindustrial da cana-de-açúcar. Porém, apenas o bagaço vem sendo utilizado e segundo Souza (2011), em 2010, foram aproveitados em torno de 30% do seu potencial de geração de energia elétrica, que, de acordo com Castro, Brandão e Dantas (2010), seria de 15.000 MW, ou seja, correspondente a 15% da demanda nacional. Dessa forma, Souza (2011) aponta como obstáculo a demanda por tecnologias e ações que permitam o melhor aproveitamento do potencial oferecido para geração de energia elétrica.

O histórico dessa agroindústria é marcado pelo desenvolvimento tecnológico, desde a produção agrícola até o processamento de seus resíduos industriais, bem como por instituições regulatórias e de pesquisa, desenvolvimento e inovação, e pela dinâmica econômica e socioambiental que impõe desafios e oferece oportunidades mesmo a um sistema de inovação consolidado (FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2011).

Esses aspectos são apontados por Kemp e Soete (1992) como recorrentes em outras estruturas voltadas à geração e uso de energia renovável. Dessa forma, quais seriam as condições de geração de bioeletricidade pela agroindústria da cana-de-açúcar? Que elementos tecnológicos, institucionais e econômicos podem ser observados?

O sucesso da produção e uso de etanol no Brasil, assim como o do açúcar, é resultado de esforços formadores de uma trajetória positiva de aprendizagem tecnológica e da construção de um sistema de inovação capaz de evoluir e desenvolver competências na solução de problemas relacionados ao mercado desses dois produtos e que oferecem oportunidades para a bioeletricidade. Assim, este estudo tem por objetivo discutir a geração de bioeletricidade pela agroindústria brasileira da cana-de-açúcar.

As contribuições teóricas sobre os sistemas de inovação, construídas por Freeman (1987), Lundvall (1988), Nelson e Winter (2005), Dosi e Nelson (2009) e outros autores, oferecem os elementos da discussão que agrupa a caracterização do sistema brasileiro de inovação da cana-de-açúcar e a inserção da geração de bioeletricidade, tomando como referência estudos recentes e informações secundárias disponibilizadas por órgãos públicos oficiais. Dessa forma, este artigo está organizado em cinco seções incluindo esta introdutória, seguida da apresentação teórica e metodológica, da identificação do sistema brasileiro de inovação da cana-de-açúcar e da quarta seção que trata da bioeletricidade e das condições de utilização do bagaço e da vinhaça. Na quinta e última seção são trabalhadas as considerações finais e conclusões.

⁵A bioeletricidade é uma energia limpa e renovável, feita a partir da biomassa: resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha), restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante e outras. No Brasil, 80% da bioeletricidade corresponde aos resíduos da cana-de-açúcar (BIOELETRICIDADE, 2014).

2 - SISTEMAS DE INOVAÇÃO: a estrutura de análise

A preocupação com os processos de inovação tecnológica encontra argumentos na ruptura com a fundamentação de que os mecanismos concorrenciais vinculam-se apenas ao equilíbrio entre oferta e demanda representado pelos preços, condicionando as atividades das empresas à eficiência econômica na alocação dos recursos de produção para conferir o menor preço ao seu produto. Para Schumpeter (1961) a concorrência está na capacidade das empresas de inovar em produtos e processos, métodos e mercados, ocupando novos espaços e destruindo modelos estabelecidos, impulsionando a economia.

As contribuições dos trabalhos de Schumpeter a partir da inovação acomodam esforços em diferentes frentes na busca pela compreensão da dinâmica inovativa e de seus impactos no desenvolvimento das empresas, de setores econômicos e do desenvolvimento de regiões e países. Esses esforços originaram abordagens e modelos teóricos vinculados à escola evolucionária, como em Nelson e Winter (2005) que trazem a preocupação com o comportamento das empresas a partir das rotinas organizacionais e de produção construídas por meio de escolhas internas e da seleção externa. Tais argumentos permitem que os autores, dentre outros evolucionistas, tratem do crescimento econômico e suas relações com o avanço técnico e as instituições do capitalismo, dando um sentido de coevolução, ou seja, da interdependência das evoluções e mudanças.

Dosi (2006) segue o mesmo caminho e atrela a realidade fundamentada na interação entre progresso científico, mudança técnica e desenvolvimento econômico, abrindo espaço para a ruptura com a visão linear do processo de inovação vinculada às teorias de oferta e demanda que, por algum tempo, foi base para o entendimento do processo de inovação. Da mesma forma, a ênfase na análise do processo de inovação como resultado de um conjunto de atividades interligadas que envolvem aprendizado, uso e difusão condicionados por aspectos técnicos,

sociais, econômicos e políticos pode ser encontrada em Rosenberg (2006).

Para Freeman (1987) o processo de inovação é interpretado como uma construção coletiva que vincula vários elementos portadores de especificidades inerentes a determinados recortes que guardam a dificuldade de replicação em outras condições e que têm caráter sistêmico. Suas conclusões foram construídas ao estudar o sistema de inovação do Japão a partir da integração entre formas institucionais distintas e do processo de inovação inserido na compreensão em nível nacional de aspectos sociais, políticos e institucionais envolvendo as empresas, as organizações de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e os sistemas de educação e financiamento da ciência e tecnologia (C&T). A forma sistêmica está no tratamento do desempenho e das políticas de C&T dos países (NELSON; ROSENBERG, 1993) e nas formas de interação e aprendizado entre usuários e fornecedores (LUNDVALL, 1988).

O processo de aprendizado também é tratado por Dosi e Nelson (2009) que destacam sua importância para a acumulação de conhecimento tecnológico, relacional, econômico e institucional das organizações e dos sistemas que formam. Essa acumulação de conhecimento pautado no aprendizado torna-se essencial para inovações encadeadas a partir do sucesso de mudanças e condições anteriores. Os autores apontam, ainda, que a interação entre conhecimentos impulsionados pela pesquisa e os mecanismos de incentivo econômico vinculam-se a conhecimentos específicos para determinadas tecnologias e oferecem oportunidades condicionadas pelo mercado para a alocação de esforços na busca por diferentes tecnologias e produtos. A exploração dessas oportunidades envolve mudanças nas regras do ambiente econômico, de mercado e de seleção de técnicas e produtos; e, assim, a coevolução entre a estrutura de incentivos e a capacidade de aprendizagem do sistema de inovação.

A visão sistêmica acomoda vários estudos com desdobramentos e propostas que apontam para abordagens supranacionais, setoriais, regionais, locais, por produto, por função, dentre outras formalizações,

discussões e questionamentos. Carlsson et al. (2002) ressaltam várias possibilidades metodológicas para observação de um sistema de inovação, tomando como base uma determinada tecnologia, um produto, uma indústria, bem como por patentes. Da mesma forma, são caracterizados pela evolução de produtos, processos e tecnologias integradas e decorrentes do próprio sistema e outros contidos em outros sistemas. Assim, os contornos que imprimem uma nova dinâmica devem ser trabalhados na busca por agregar um novo conjunto de atores e de formas de interação, com mudanças na formação das redes, no ambiente institucional e nas condições socioeconômicas.

Nesse sentido, para discutir a geração de bioeletricidade pela agroindústria brasileira da cana-de-açúcar foram trabalhadas condições tecnológicas, econômicas e institucionais presentes tanto na produção de açúcar e etanol quanto no aproveitamento do bagaço e da vinhaça visando geração de energia elétrica. Para isso, foram organizados e discutidos resultados obtidos por estudos recentes complementados por informações e dados disponibilizados por órgãos públicos oficiais.

Esse caminho procurou explorar aspectos do sistema nacional de inovação da cana-de-açúcar, delimitando-o a partir da produção do açúcar e o etanol para mapear os atores envolvidos na pesquisa, produção e na formulação e execução de políticas, assim como a interação entre esses atores e a dinâmica do sistema ao longo do tempo. Essa etapa ofereceu a compreensão de elementos que caracterizam a geração de bioeletricidade a partir das biomassas residuais, bagaço e vinhaça, bem como os elementos para a discussão das condições tecnológicas e instituições formatadas para a comercialização e incentivar esse tipo de energia.

3 - SISTEMA NACIONAL DE INOVAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Esta seção apresenta os resultados alcançados no tratamento dos aspectos do sistema nacional de inovação da cana-de-açúcar, que tomou como

referência estudos que detalham com maior profundidade o sistema construído a partir dos produtos açúcar e etanol.

Os resultados da agroindústria brasileira da cana-de-açúcar estão relacionados, dentre outros elementos, com uma trajetória de inovação e difusão que proporcionou o aumento da produtividade e redução dos custos de produção em todas as etapas de produção, colocando o Brasil como principal produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar e segundo na produção de etanol. A cultura da cana-de-açúcar acompanha o Brasil desde o período colonial quando também era o principal exportador mundial de açúcar.

No estudo de Silva (2013), ao descrever em detalhes a criação do mercado de etanol no Brasil, é possível observar que o interesse pelo etanol no país data do início do século XX quando já realizava experimentos e fazia uso da sua mistura com gasolina; porém, só na década de 1930 sua produção começa a ser desenhada com a criação do Instituto de Açúcar e Alcool (IAA). O instituto tinha como atribuição o controle do mercado de açúcar e etanol e, na década de 1970, por meio de políticas de incentivo é que foi intensificada a produção de etanol como combustível. Essa ação pode ser evidenciada com a implantação do Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (Planalsucar) e do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL). Ainda em Silva (2013) é trabalhado o contexto dos anos 1990 quando foi extinto o IAA e a dinâmica econômica e política condiciona a retração da produção de etanol, bem como a maior atenção ao crescente mercado de açúcar. E na sequência, os anos 2000 quando é retomada a produção de etanol, que recebe incentivo pela adoção da inovação de dispositivo que permite o uso, nos motores de ciclo Otto, de etanol ou gasolina em qualquer proporção, os veículos *flex fuel*.

O caminho percorrido pela agroindústria sucroalcooleira e agora sucroenergética tem como característica a concentração dos atores que compõem o sistema de inovação no Estado de São Paulo. Esses atores podem ser distribuídos de acordo com atividades desenvolvidas. Assim, na pesquisa agro-

nômica pública paulista está a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), que desenvolve atividades de pesquisa e formação de recursos humanos, e o Instituto Agrônomo (IAC), vinculado à Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), que desenvolve o programa de pesquisa Procana, por meio da descentralização das atividades em várias estações experimentais e em parcerias com o objetivo de obter novas variedades e novos métodos de produção, conforme pode ser observado no estudo de Hasegawa (2005).

Ainda na pesquisa pública, porém em âmbito federal, está a Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (Ridesa), formada pelas universidades federais que absorveram competências técnicas e material genético do então Planalsucar e que atualmente desenvolvem pesquisas em melhoramento para novas variedades e formação de recursos humanos⁶. Na esfera federal, vinculado ao Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), está o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), voltado ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para os processos de hidrólise, plantio e colheita mecanizada e biorrefinarias (FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2011).

A iniciativa privada paulista também participa do sistema de inovação Furtado, Scandiffio e Cortez (2011) destacam o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) no desenvolvimento de novas variedades, de equipamentos agrícolas e nas tecnologias de extração e de processamento industrial; e ainda outras duas empresas voltadas à biotecnologia em variedades de cana: a Canavialis que atua com duas estações experimentais e contratos com usinas e a Allelyx que busca obter variedades de cana geneti-

camente modificadas⁷. Na mesma condição está a Dedini SA, principal fornecedora de bens de capital para as usinas e destilarias, fundada na década de 1920, e que também atua em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Nos últimos 30 anos, a empresa depositou 64 patentes dentre elas, conforme Silva (2013), a relacionada ao processo de hidrólise (DHR) na busca pelo etanol de segunda geração.

O financiamento às atividades de pesquisa pode contar com várias iniciativas e fontes de financiamento tanto no âmbito federal como no estadual por meio das Fundações de Apoio à Pesquisa (FAPS) como a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). De toda forma, conforme Pereira (2013), uma iniciativa recente é o Plano de Apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), criado em 2011, por meio de ação conjunta entre a Financiadora de Estados e Projetos (FINEP) e o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), que tem por objetivo a seleção de planos de negócio e fomento a projetos que contemplem o desenvolvimento, a produção e a comercialização de novas tecnologias industriais destinadas ao processamento da biomassa oriunda da cana-de-açúcar e organizadas em três linhas temáticas: bioetanol de segunda geração; novos produtos de cana-de-açúcar e gaseificação, tecnologias, equipamentos, processos e catalisadores.

Na dinâmica do Sistema Nacional de Inovação da Cana-de-açúcar, Furtado, Scandiffio e Cortez (2011) destacam a intensa interação entre os vários atores que se revela na reorganização dos centros de pesquisa frente a diferentes ambientes de regulação, mantendo a capacidade de resolução dos problemas assim como a manutenção de sua *expertise* técnico-científica e habilidade de transferir tecnologia. Além disso, os autores apontam outra particularidade, a presença da iniciativa privada tanto em P&D quanto no seu financiamento, ocupando importante função

⁶A Ridesa possui 21 estações experimentais localizadas nos principais estados produtores do Brasil com 141 pesquisadores e 82 técnicos. Seu programa de pesquisa envolve 10 universidades federais (Paraná, São Carlos-SP, Viçosa-MG, Rio de Janeiro, Sergipe, Alagoas, Goiás, Piauí e Mato Grosso). Conforme Salles-Filho et al. (2011), a Rede produz 2 milhões de plântulas por ano, que são a origem das variedades comerciais de cana-de-açúcar.

⁷Empresas vinculadas aos investimentos do Grupo Votorantim, em 2009, foram adquiridas pela Monsanto, causando certo desconforto entre os agentes da cadeia de produção, assim como entre os pesquisadores. Há também acusações de uso de material genético desenvolvido pela Ridesa (FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2011).

de interação e articulação do sistema, uma realidade diferenciada quando se observa a pesquisa agropecuária. Dessa forma, o sistema se destaca não só pelos resultados alcançados e construção de sua trajetória virtuosa, mas, também, pela capacidade de adaptação e evolução na busca por soluções que expõem competências capazes de superar novos desafios, como a geração de bioeletricidade a partir dos seus resíduos, bagaço e vinhaça, trabalhada na próxima seção.

4 - A BIOELETRICIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

Esta seção aborda, inicialmente, a geração de energia elétrica no Brasil e a inserção da bioeletricidade com ênfase na utilização da biomassa de cana-de-açúcar e em especial do bagaço. Em seguida são tratados os resultados vinculados aos aspectos institucionais, econômicos e tecnológicos, agrupados para o bagaço, por ser o resíduo que efetivamente vem sendo utilizado na geração de bioeletricidade; para então, explorar as condições e possibilidades da utilização da vinhaça para esse fim.

No cenário nacional de geração de energia, considerando o ano de 2013, as fontes renováveis responderam por 41% da energia gerada; uma situação distante da encontrada em outros países, uma vez que a média mundial é de 13,0% de participação das fontes renováveis na matriz energética. Nesse contexto e ainda em 2013, as principais fontes renováveis utilizadas foram a cana-de-açúcar, com 16,1% de participação, e a hidráulica com 12,5%; o restante distribuído entre lenha e carvão vegetal (8,3%) e lixívia e outras com 4,2%. Dentre estas, a hidráulica destina-se exclusivamente à geração de energia elétrica e a cana-de-açúcar também contribui para segmento de transportes, com a produção de etanol que, em 2013, respondeu por 14,3%⁸ do total consu-

mido por esse segmento (MME, 2014).

A geração de energia elétrica, também no ano de 2013, teve em torno de 70,6% de origem hidráulica, enquanto a biomassa, incluindo lenha, bagaço de cana-de-açúcar, lixívia e outras recuperações, respondeu por 7,6% do total gerado, com o restante correspondendo à soma das participações das fontes não renováveis: gás natural (11,3%), derivados de petróleo (4,4%), nuclear (2,4%), carvão e derivados (2,6%), e eólica (1,1%) (MME, 2014).

A energia elétrica gerada a partir do bagaço tem origem nos sistemas de cogeração adotados para alimentar os processos de produção dos dois principais produtos da cadeia de produção da cana-de-açúcar: açúcar e etanol. A cogeração tinha por objetivo utilizar o máximo de resíduo possível visando evitar o acúmulo de um excedente de comercialização restrita e de difícil estocagem; assim a eficiência na cogeração de energia não se mostrava como uma prioridade. Na década de 1990 e início dos anos 2000, as novas regras do sistema elétrico brasileiro e a expansão da produção de cana-de-açúcar, bem como dos mercados de etanol e de açúcar, ofereceram condições para novos investimentos e busca de maior eficiência na cogeração com a possibilidade de ofertar eletricidade, ou exportar o excedente gerado. Essa dinâmica constrói condições que apontam novos indicadores de eficiência na geração elétrica, passando de 40 kWh para 96 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada, sendo que, em média, 80 kWh podem ser exportados (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2010).

Parte desse excedente vem sendo comercializada principalmente junto às distribuidoras de energia elétrica. Segundo Bioeletricidade (2014), sua participação atingiu, em 2010, 2% do consumo nacional de eletricidade e 5% no Estado de São Paulo, principal estado brasileiro na produção de cana-de-açúcar. Os resultados apresentados são considerados pequenos frente ao potencial energético oferecido pelo segmento agroindustrial que, de acordo com Castro, Brandão e Dantas (2010), no final desta dé-

⁸Cabe ainda destacar que, em 2013, o segmento dos combustíveis líquidos voltados aos transportes consumiram 32% da energia gerada no Brasil, sendo 14,3% desse total representados pelo consumo de etanol, 46,4% óleo diesel, 29,4% gasolina e o restante

distribuído entre óleo combustível, querosene, biodiesel e outros (MME, 2014).

cada seriam 15.000 MW ou 15% da demanda nacional. Em Souza (2011), essa discussão é colocada a partir do aumento do fornecimento de energia elétrica de 1.103 GWh em 2005 para 8.744 GWh em 2010, condicionado ao aproveitamento de 30% do potencial total. Souza (2011) ainda ressalta que em 2010, no Estado de São Paulo, responsável por 57,7% do total da bioeletricidade de bagaço de cana-de-açúcar, em torno de 54,0% foram exportados para a rede e o restante ficou para consumo próprio das usinas.

Nyko et al. (2011) também enfatizam a diferença entre o aproveitamento efetivo e o potencial energético oferecido, destacando a possibilidade de produção de eletricidade de cana-de-açúcar de forma distribuída, próxima aos centros consumidores e como fonte complementar ao parque hidrelétrico brasileiro ao conferir maior capacidade de geração de energia justamente no período de menor oferta hídrica, especialmente na Região Centro-Sul, onde estão localizados 70% da capacidade dos reservatórios brasileiros, em razão de a colheita de cana-de-açúcar ocorrer no período seco. Além disso, as usinas térmicas movidas com biomassa têm vantagem em relação às movidas à óleo diesel ou gás natural, por serem de fonte renovável, apresentam baixa utilização tanto de insumos fósseis quanto de emissão de gases de efeito estufa.

A indicação do restrito aproveitamento do potencial de energia, a partir do bagaço da cana-de-açúcar, assim como o levantamento de dados e informações têm motivado vários estudos. Um exemplo desse esforço está em CONAB (2011), que coletou informações sobre as usinas de cana-de-açúcar em funcionamento no Brasil na safra 2009/10, num total de 393 unidades de produção (usinas e destilarias) distribuídas nas regiões produtoras. Os resultados apontaram a produção em torno de 167 milhões de toneladas de bagaço e desse total em média 23% foi destinado à geração de bioeletricidade comercializada, o restante do bagaço foi utilizado para o atendimento das necessidades das próprias unidades e uma pequena parcela para outros usos.

Para a mesma safra 2009/10, Nyko et al. (2011) também procuraram reunir informações de

438 unidades produtoras por meio de questionários. Desse total, 207 unidades participaram do estudo, das quais 92, responsáveis por 60% do processamento da cana-de-açúcar da amostra, exportaram o excedente de bioeletricidade gerado e 115 unidades não realizaram essa operação e foram responsáveis pelo processamento de 40% do total de cana-de-açúcar produzido pela amostra⁹. No Estado de São Paulo, responsável por 67% da moagem de cana-de-açúcar da amostra, 50% das unidades exportaram a bioeletricidade gerada e, em Minas Gerais, foram 15 unidades dentre as 29 que participaram do estudo.

A busca por compreender a realidade na produção paulista também está no trabalho de Torquato e Ramos (2013), que consolidaram informações coletadas em 163 usinas localizadas no Estado de São Paulo e signatárias do Protocolo Agroambiental¹⁰; os resultados apontam que 41,7% das unidades relacionadas exportam bioeletricidade, com destaque para as unidades localizadas na região de Orlandia no interior paulista.

O bagaço de cana-de-açúcar constitui uma realidade de aproveitamento dos resíduos da produção de açúcar e etanol voltado à geração de bioeletricidade. Esse cenário de oportunidades inclui ainda o potencial energético da vinhaça.

O destino da vinhaça percorreu um caminho diferente do bagaço, a cogeração, pois sua utilização foi vinculada ao desenvolvimento dos processos de fertirrigação dos canaviais. Sendo assim, o conhecimento técnico sobre a sua utilização na geração de

⁹Segundo Nyko et al. (2011), esse resultado relaciona-se ao fato de que as unidades maiores são originárias de recentes projetos *greenfield* (novas usinas) e de projetos de expansão, os quais apresentam maior rentabilidade dos investimentos em cogeração quando comparados a projetos de *retrofit* (atualização ou modernização de usinas em operação).

¹⁰Firmado em 2007, entre o Governo do Estado de São Paulo por meio das Secretarias do Meio Ambiente e de Agricultura e Abastecimento e a União da Indústria Sucroalcooleira (ÚNICA) e a Organização de Plantadores de Cana-de-açúcar da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA). O Protocolo antecipa os prazos legais paulistas para a eliminação da prática da queima, de 2021 para 2014 nas áreas onde já é possível a colheita mecanizada e de 2031 para 2017 nas áreas em que não existe tecnologia adequada para a mecanização. Trata-se de um acordo voluntário, que conta com a adesão das usinas de cana-de-açúcar e de associações de fornecedores.

bioeletricidade ainda é limitado quando comparado ao bagaço. Porém, conforme apontam Cortez et al. (2010), o potencial da vinhaça como fonte de biogás na geração de bioeletricidade tem atraído esforços de pesquisa e investimentos experimentais.

Nesse sentido, a seguir são abordadas variáveis institucionais e econômicas da geração de bioeletricidade, especialmente, relacionados aos leilões de compra e o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)¹¹; bem como o tratamento de aspectos vinculados ao uso de tecnologias, às atividades de pesquisa e aos atores envolvidos. Da mesma forma, a discussão adiante se estenderá ao tratamento dessas condições relacionadas à utilização da vinhaça.

A eletricidade gerada a partir do bagaço da cana tem na experiência adquirida nos processos de cogeração um importante elemento de construção de competências para atuar em uma nova realidade, como a reservada pelo mercado de energia elétrica. Essa condição pode encontrar analogia com a implantação do Proálcool, que no início partiu da experiência alcançada na produção de açúcar. Seguindo esse raciocínio, assim como na década de 1970 e o Proálcool, o ambiente em que se insere a produção de bioeletricidade conta com um aparato regulatório marcado pela realização de leilões¹² de compra de energia e por programas de incentivo à produção.

Nesse contexto, em 2005, foi realizado o primeiro leilão da chamada energia nova¹³ com a participação de sete Unidades Termelétricas (UTE) gera-

doras de eletricidade a partir do bagaço da cana, com entrega prevista para os anos de 2008 e 2009. Da mesma forma, em 2006, foram realizados o segundo e o terceiro leilões de energia nova, que se repetiram nos anos de 2009 e 2011, assim como os leilões de fontes alternativas e os leilões de energia de reversa¹⁴. Todos esses leilões foram conduzidos no Ambiente de Contratação Regulado (ACR), nos quais os preços máximos são estipulados pelo órgão de governo regulador e os empreendedores ofertam lances até que se iguale à demanda. Além do ACR, a eletricidade pode ser comercializada no Ambiente de Contratação Livre (ACL) em que há a contratação bilateral entre o fornecedor de energia e o comprador, desde que ambos tenham registros junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O ambiente de contratação vincula o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), que tem por objetivo aumentar a participação da eletricidade produzida por empreendimentos concebidos a partir de energia eólica, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Esse programa vincula a contratação da energia gerada e linhas de financiamento junto ao BNDES por meio do Programa de Apoio Financeiro a Investimentos em Fontes Alternativas de Energia Elétrica no âmbito do PROINFA, com recursos de até R\$5,5 milhões. Além desse programa, o BNDES dispõe de linhas de financiamento direcionadas às energias renováveis, com apoio à bioeletricidade, biodiesel, bioetanol, energia eólica, energia solar, pequenas centrais hidrelétricas (PCH) dentre outras iniciativas que contemplem investimentos mínimos de R\$10 milhões. Nessa linha de financiamento foram apro-

¹¹Conforme Decreto n. 5025 de 2004, Lei n. 11943 de 2010, Lei n. 10438 de 2002 e Lei n. 10762 de 2003. Estabelece ainda a garantia de contratação da energia por 20 anos pelas Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás).

¹²Os Leilões de Compra de Energia Elétrica de Novos Empreendimentos de Geração estão previstos na Lei nº 10.848, de 15/03/2004, que foi regulamentada pelo Decreto nº 5.163, de 30/07/2004. Esses leilões têm o objetivo de contratar 100% de energia elétrica para as concessionárias, permissionárias e as autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica, integrantes do Sistema Interligado Nacional.

¹³O leilão de energia nova tem como finalidade atender ao aumento de carga das distribuidoras. Neste caso são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas. Este leilão pode ser de dois tipos: A -5 (usinas que entram em operação comercial em até cinco anos) e A -3 (em até três anos).

¹⁴O leilão de fontes alternativas foi instituído com o objetivo de atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e aumentar a participação de fontes renováveis (eólica, biomassa e energia proveniente de Pequenas Centrais Hidrelétricas) na matriz energética brasileira. A contratação da energia de reserva foi criada para elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para esta finalidade, seja de novos empreendimentos de geração ou de empreendimentos existentes; sua contratação é viabilizada por meio dos leilões de energia de reserva, conforme §3º do art. 3º e no art. 3º-A da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, os quais foram regulados pelo Decreto n. 6.353/2008.

vados projetos de cogeração de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar (bagaço, palha e ponta da cana) da ordem de R\$120 a R\$152 milhões para disponibilizar entre 45 e 52 MW.

Conforme Nyko et al. (2011), os desembolsos do BNDES relacionados à bioeletricidade sucroenergética apresentam aumento significativo: em 2005 foram R\$450 milhões, em 2008 R\$1,87 bilhão e em 2010 R\$1,48 bilhão. Assim, no período de 2004 a 2010, o volume de recursos acumulado representou 25% do total destinado ao segmento. Esses desembolsos foram aplicados em 112 centrais de cogeração de biomassa de cana-de-açúcar, as quais têm potencial para adicionar 3.088 MW ao sistema elétrico brasileiro. Cabe ainda destacar que há prioridade para financiamento de empreendimento de cogeração de alta eficiência, portanto, destaca-se a relação direta com a tecnologia adotada que corresponde a caldeiras com pressão acima de 60 bar.

A decisão com ênfase na eficiência, segundo Leal (2010), relaciona-se com a vida útil das caldeiras, em torno de 30 anos, e com o alto valor do investimento envolvido, condicionando então o potencial de geração trabalhado em dois sistemas: o de turbo-geradores de contrapressão e o de turbogeradores de condensação/extração ou contrapressão/condensação. Assim, a atuação de fornecedores, que também estão vinculados a outras indústrias que também utilizam processos termoelétricos, ampliou as relações e o número de atores nesse elo da cadeia de produção da cana-de-açúcar¹⁵, inclusive com a participação e atuação de grupos de representação como: Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN), Associação Brasileira de Geradoras Termelétricas (ABRAGET), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), dentre outros colegiados.

O entrelaçamento das tecnologias, que envolvem os processos de geração de calor, e seus ajustes e adaptações incrementais destinados aos vários segmentos industriais também são percebidos quando consultados os grupos de pesquisa junto ao

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Num universo de 40 grupos de pesquisa que tratam da cogeração, prevalece a área de pesquisa em engenharia mecânica e linhas voltadas para termodinâmica, termelétrica e aproveitamento de fontes renováveis de energia. Os destaques são o Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e as universidades federais, estaduais e particulares localizadas no Sudeste brasileiro. Ou seja, uma ampla gama de possibilidades de P&D em que a biomassa da cana-de-açúcar aparece como mais uma fonte de matéria-prima dentre outras.

Essa condição pode ser observada quando são reunidas informações sobre autorizações concedidas pela ANEEL para empreendimentos termelétricos ou as Unidades Termelétricas (UTE), num total de mais de 650 unidades, sendo em torno de 22% a óleo diesel, 15% gás natural, 5% óleo combustível, 40% bagaço da cana e 6% outras biomassas, como casca de arroz e resíduos de madeira¹⁶. Do total de UTE autorizadas para bagaço de cana, 68% estão na modalidade de exploração Produção Independente de Energia (PIE) e o restante como Autoprodutor (AP)¹⁷. A aposta na produção independente, os leilões de reserva exclusivo para biomassa e a possibilidade de atuar no ambiente de contratação livre imprimiram uma nova dinâmica para a bioeletricidade (ANEEL, 2013).

As usinas têm comercializado energia elétrica tanto no ambiente regulado ou ACR quanto no ambiente livre ou ACL, mas cabe destacar os leilões,

¹⁶ Os 12% restantes utilizam gás de alto forno, gás de processo e biogás.

¹⁷ Conforme a Lei n. 9074 de 1995, considera-se produtor independente de energia elétrica a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco. O Produtor Independente de Energia elétrica estará sujeito às regras de comercialização regulada ou livre, atendido ao disposto na Lei, na legislação em vigor e no contrato de concessão ou no ato de autorização, sendo-lhe assegurado o direito de acesso à rede das concessionárias e permissionárias do serviço público de distribuição e das concessionárias do serviço público de transmissão. Ao autoprodutor é reservada a implantação de usinas termelétricas, de potência superior a 5.000 kW, destinada ao seu próprio uso.

¹⁵ Além da Dedini S/A, tradicional fornecedora de bens de capital para o segmento sucroenergético, pode-se apontar a DSJ Engenharia, Equipalcoo Sistemas, Zanini, Thamil, dentre outras.

como os Leilões de Energia de Reserva (LER) de 2008, exclusivo para usinas de biomassa, e os de 2010 e 2011, que também incluíram as usinas eólicas e as pequenas centrais hidrelétricas, totalizando, em 2016, 735 MW médios (Tabela 1). Soma-se a isso, a contratação de 215 MW médios no âmbito do Proinfa e as demais modalidades, totalizando, no ACR, a contratação em torno de 1,4 GW médios, em 2016. Além dessas, Brasil (MME, 2012) aponta a existência de excedente disponível para comercialização no Acl superior a 800 MW médios em 2016.

As projeções contidas em BRASIL (MME, 2012) apontam ainda o aumento da oferta de biomassa de cana-de-açúcar, considerando a palha e ponta da cana¹⁸, condicionado por estimativas de produção do Centro Sul do Brasil para atender às projeções de consumo de etanol e de açúcar, prevendo potencial técnico de exportação de energia elétrica, entre 9,2 GW médio e 14,5 GW médio em 2021¹⁹ (MME, 2012). De acordo com Walter (2010), esse potencial, em certa medida contido apenas em projeções, encontra restrições ao considerar os desafios técnicos no transporte e utilização da palha e da ponta da cana²⁰ e das possibilidades de gaseificação.

Os desafios também se relacionam a aspectos institucionais e seus condicionantes econômicos e financeiros envolvendo os valores praticados nos leilões de compra de energia, os custos e responsabilidade de transporte e conexão na rede de transmissão, criando dificuldades que podem explicar o predomínio da estratégia de autossuficiência das usinas em detrimento da ampliação da venda da bioeletrici-

¹⁸No Estado de São Paulo, Lei 11.241/2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da cana para colheita manual, nas áreas mecanizáveis até 2021 e nas áreas não mecanizáveis, ou com declividade superior a 12%, até 2031. Cabe destacar o Protocolo Agroambiental, firmado em 2007, que antecipa para 2014 as áreas mecanizáveis e para 2017 as não mecanizáveis.

¹⁹O potencial técnico do aproveitamento da palha e ponta foi calculado utilizando-se dois fatores de exportação de energia distintos: 500 kWh/tonelada de palha e ponta e 787,5 kWh/tonelada de palha e ponta (MME, 2012).

²⁰O estudo de Nyko et al. (2011), relacionado à safra 2009/10 e uma amostra de unidades de produção, aponta que apenas 2,5% da palha de cana-de-açúcar foi utilizada na geração de bioeletricidade, com destaque para o Estado de São Paulo, onde esse percentual atinge 6%.

dade (SOUSA; AZEVEDO, 2006). Além desses, Nyko et al. (2011) indicam o custo dos investimentos nas plantas e as condições de financiamento com juros altos e prazos curtos, além da carga elevada de tributos e encargos setoriais sobre o investimento e a operação.

Para a vinhaça as possibilidades encontram-se latentes. Esse resíduo das etapas de industrialização da cana-de-açúcar é utilizado como insumo na produção agrícola. Enquanto resíduo, a vinhaça, também chamada de vinhoto, restilo ou garapão, é resultado da destilação do vinho, produto da fermentação alcoólica do caldo de cana, do melaço ou da mistura de caldo e melaço para obtenção do álcool. Nesse processo, para cada litro de álcool produzido são gerados entre 10 e 15 litros de vinhaça, que se caracteriza pela alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) por ser uma mistura rica em potássio, enxofre, fósforo, nitrogênio, cálcio, magnésio, além de micronutrientes. Por conta da alta demanda de oxigênio e do grande volume produzido, em 2009 foram cerca de 350 bilhões de litros, seu descarte é regulado por uma ampla legislação voltada à segurança ambiental que estabelece normas e procedimentos para a destinação de resíduos de processos industriais e agrícolas (MUTTON; ROSSETTO; MUTTON, 2010).

Nesse cenário, a busca por alternativas abriu caminho para o uso da vinhaça na fertirrigação do solo. Inicialmente distribuída em altos volumes prejudiciais à qualidade do solo, encontrou nos esforços de pesquisa e seus resultados a indicação de volumes mais baixos e suficientes para suprir a necessidade de nutrientes. Da mesma forma, ao longo dos últimos 40 anos, as técnicas de aplicação também foram sendo desenvolvidas e modificadas e contaram com estudos conduzidos pelos atores que atuam no sistema de inovação caracterizado na seção anterior.

Apesar dos avanços e diante dos desafios frente ao grande volume de produção da vinhaça, vários caminhos vêm sendo explorados, tanto para sua utilização como fertilizante quanto para outras aplicações como o chamado solo-vinhaça para fabricação de tijolos e secagem para alimentação animal. Além disso, conforme apontam Cortez et al. (2010), cabe destacar os esforços no sentido de reduzir a

Tabela 1 - Energia Contratada e Comercializável por Usinas Sucroenergéticas Nacionais, 2011 a 2016
(em MW médios)

Ano	Leilões energia nova	Proinfra	Leilões fonte alternativa	Leilões energia de reserva	Contratação livre	Total
2011	166	215	137	469	776	1.763
2012	176	215	137	642	706	1.876
2013	211	215	137	681	676	1.920
2014	258	215	137	731	805	2.146
2015	269	215	137	735	791	2.147
2016	290	215	137	735	813	2.190

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de dados do MME (2012).

produção de vinhaça por meio de processos de fermentação como o chamado Biostil, o uso da refrigeração para reduzir a temperatura na fermentação e osistema com extração contínua através de vácuo. Há também iniciativas de concentração da vinhaça por meio da retirada da água utilizadas em usinas paulistas e desenvolvidas pela Dedini S/A e de evaporação da água contida na vinhaça, assim como experimentos e estudos para a geração de energia elétrica a partir de processos térmicos.

As opções que se colocam para a geração de bioeletricidade a partir da vinhaça envolvem a produção de biogás, por meio da biodigestão e, também, da combustão direta. Para este último processo, as iniciativas e experiências são limitadas e de pouco sucesso. A biodigestão²¹ da vinhaça encontra espaço em ambiente que dispõe de vários exemplos de produção e aplicação do biogás em vários segmentos industriais. Salomon e Lora (2006) destacam o biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos como uma fonte promissora de energia e uma forma de reduzir o impacto ambiental de resíduos de alto DBO como resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos, resíduos animais e a vinhaça. Os autores apontam, ainda, as vantagens da produção de energia elétrica a partir de biogás: gera-

ção descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável tratada como resíduo; possibilidade de receita proveniente da venda; redução da compra de eletricidade vinculada à cogeração; redução da emissão de gases; créditos de carbono dentre outras. E também, os desafios: falta de tecnologia nacional de geração; limpeza do biogás; viabilidade econômica; falta de fiscalização; possíveis penalidades e cuidados nos processos de geração e uso, pois o biogás é um gás corrosivo pela presença de ácido sulfídrico que, no Brasil, é parte da política de padrão de emissões.

O biogás, a partir dos processos de biodigestão anaeróbia da vinhaça, tem nos biodigestores com reator Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) as principais experiências descontinuadas, com resultados limitados, e localizadas nos Estados de Alagoas, São Paulo e, recentemente, em Pernambuco, que contaram como apoio do BNDES, da Dedini S/A, do IPT e de outros centros de pesquisa e empresas. Investimentos recentes no desenvolvimento de tecnologias podem ser observados, como o Reator Anaeróbio de Circulação Interna (IC) (CORTEZ et al., 2010). Tais iniciativas encontram motivação no valor energético do biogás e na possibilidade que é apresentada pelo uso da vinhaça que, de acordo com Salomon e Lora (2006), corresponde a 14,23 m³ de metano para cada m³ de vinhaça²².

²¹Nos processos anaeróbios ou nos sistemas de biodigestão anaeróbia, a degradação da matéria orgânica envolve a atuação de microrganismos anaeróbios, cujas espécies pertencem ao grupo de bactérias hidrolíticas fermentativas, acetogênicas produtoras de hidrogênio e metanogênicas. A bioconversão da matéria orgânica poluente com produção de metano requer a cooperação entre diferentes culturas bacterianas (SALOMON; LORA, 2006).

²²A biodigestão anaeróbia da vinhaça resulta na formação de dois produtos: a vinhaça biodigerida e o biogás. Com relação ao biogás, devido à elevada concentração de metano aí presente, as principais aplicações referem-se à geração de energia (pelo seu potencial combustível). O poder calorífico do biogás se situa em

Segundo Cortez et al. (2007), a biodigestão anaeróbia da vinhaça, quando comparada a outros sistemas aeróbicos, pode apresentar como benefícios: menor consumo de energia; menor produção de lodo em virtude da menor produção de biomassa; possibilidade de aproveitamento do biogás gerado; e redução da carga orgânica da vinhaça para sua aplicação no solo. As desvantagens estariam no maior tempo de detenção e na produção de gases com odor desagradável e corrosivos.

Esse potencial de certa forma está presente nos grupos de pesquisa registrados no CNPq no ano de 2013, onde se observa para biodigestão 12 grupos que contemplam pesquisas em engenharia mecânica, agrícola e química além de zootecnia. Para a palavra vinhaça foram relacionados oito grupos de pesquisa concentrados em agronomia, que reforçam o caminho inicial de destinação da vinhaça, a fertilização do solo.

A geração de bioeletricidade a partir da vinhaça apresenta-se por meio de iniciativas pontuais, porém portadoras de possibilidades que demandam investimentos em pesquisa num ambiente marcado por outras fontes de biogás. Assim, embora ocupando um espaço diferente da bioeletricidade do bagaço da cana-de-açúcar e dos processos de cogeração e oferta do excedente, apresenta-se convergente quando consideradas as condições institucionais de comercialização e distintas em relação às econômicas e de desenvolvimento tecnológico.

Essa dinâmica mostra-se permeada por atores e fluxos que se entrelaçam com outros segmentos industriais e recortes que podem remeter à ampliação da caracterização do sistema brasileiro de inovação da cana-de-açúcar, tanto do ponto de vista da expansão de mais um produto, a bioeletricidade ao açúcar e etanol, quanto da formação de um subsistema de inovação voltado ao aproveitamento da biomassa residual, bagaço e vinhaça, dos processos de produção do açúcar e do etanol e, portanto, do potencial energético oferecido pela cana-de-açúcar.

torno de 5.000 a 7.000 kcal/m³; entretanto, este potencial pode atingir 12.000 kcal/m³, caso o CO₂ seja retirado da mistura (CORTEZ et al., 2007).

5 - CONCLUSÕES

Os resultados alcançados pela agroindústria brasileira da cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol foram construídos a partir da formação de um sistema de inovação capaz de se adaptar e reunir competências na solução de problemas desde o século XX. Essa trajetória virtuosa coloca novos desafios e oportunidades a esse sistema, dentre eles estão os que envolvem a geração e a comercialização da bioeletricidade do bagaço e da vinhaça e, assim, o aproveitamento do considerável potencial energético dessas duas biomassas residuais.

Nesse sentido, este estudo procurou discutir a geração de bioeletricidade pela agroindústria brasileira da cana-de-açúcar. Para tanto, buscou apoio na análise dos sistemas de inovação e suas abordagens que articulam o tratamento das condições institucionais, econômicas e tecnológicas, assim como os processos de aprendizado e a contextualização histórica. Essas condições foram trabalhadas por meio da reunião e análise de resultados de estudos recentes complementados por dados e informações disponibilizadas por órgãos públicos oficiais para, num primeiro momento, caracterizar o sistema brasileiro de inovação da cana-de-açúcar a partir da produção de açúcar e etanol e, em seguida, apresentar os contornos da bioeletricidade gerada pelo bagaço e vinhaça.

Os resultados mostram a consolidação e amadurecimento do sistema brasileiro de inovação da cana-de-açúcar que imprimiu um processo de aprendizado tecnológico distinto para as biomassas residuais aqui tratadas.

O aprendizado acumulado com a cogeração somado à expansão da produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol, assim como à institucionalização de novas regras para o sistema elétrico brasileiro, em especial os leilões que contemplam a biomassa e o Proinfra, ofereceram ambiente institucionalizado para a ampliação da geração e comercialização da bioeletricidade. Porém, observa-se que o aproveitamento energético do bagaço de cana ainda encontra-se abaixo do potencial que pode ser explorado, resul-

tando no apontamento de obstáculos regulatórios, econômicos e tecnológicos que se entrelaçam com outros sistemas de inovação industriais envolvidos em processos termelétricos e biomassas residuais.

A vinhaça tem na fertirrigação seu principal processo de aprendizagem e sua utilização na geração de bioeletricidade passa, ainda, por iniciativas experimentais que trilham, principalmente, a biodigestão para obtenção de biogás. O amplo volume de vinhaça assim como o bagaço alimentam discussões sobre o seu potencial latente, que também pode ser observado em relação a outros resíduos de alto DBO como os sólidos urbanos.

A interação entre aspectos institucionais, econômicos, tecnológicos e seus processos de aprendizado que envolve o aproveitamento do bagaço e da vinhaça para a bioeletricidade expõem desafios acomodados em uma dinâmica que acrescenta variáveis diferentes das encontradas na produção de açúcar e etanol. O novo contorno é permeado por elementos que podem ser vinculados a outros sistemas de inovação, em especial os que buscam soluções para processos termelétricos e de biodigestão, nos quais o bagaço e a vinhaça dividem espaço com outras fontes para geração de energia.

A discussão aqui colocada e os resultados alcançados oferecem alicerce para novos estudos que podem ser trabalhados em pelo menos duas frentes. A primeira voltada à análise dos desdobramentos das políticas públicas regulatórias e de incentivos à bioeletricidade para o segmento sucroenergético. A outra pautada nas construções teóricas sobre os sistemas de inovação e no tratamento dos seus contornos e critérios para definir recortes considerando elos e interações com outras atividades econômicas, assim como a ideia de subsistemas que formam sistemas de inovação complexos como pode ser considerado o de cana-de-açúcar no Brasil.

LITERATURA CITADA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Boletim de acompanhamento de autorização**. Brasília: ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/autorizacoes/default_aplicacao_acompanhamento.cfm?IDACOMPANHAMENTOTIPO=1>. Acesso em: nov. 2013.
- BIOELETRICIDADE. A energia verde e inteligente do Brasil. Disponível em: <http://www.bioeletricidade.com/cartilha_bioeletricidade.pdf>. Acesso em: maio 2014.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil: análise do desempenho da safra 2009/2010**. Brasília: CONAB, mar. 2011. 143 p.
- CARLSSON, B. et al. Innovation systems: analytical and methodological issues. **Research Policy**, Amsterdam, Vol. 31, Issue 2, pp. 233-245, 2002.
- CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. A bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica. In: SOUZA, E. L. L.; MACEDO, I. C. (Coords.). **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. p. 137-153.
- CORTEZ, L. A. B. et al. Biodigestão de efluentes. In: _____; LORA, E. S. (Coords.). **Biomassa para energia**. Campinas: UNICAMP, 2007. cap. 15, p. 493-529.
- _____. et al. Necessidades de P&D na área industrial em vinhaça. In: _____. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: FAPESP, 2010. p. 619-636.
- DOSI, G. **Mudança técnica e transformação industrial: a teoria e uma aplicação à indústria dos semicondutores**. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2006. 460 p.
- _____.; NELSON, R. R. Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes. **LEM Working Paper Series**, Italy, 2009, 89 p. (Laboratory of Economics and Management, Sant'Anna School of Advanced Studies).
- FREEMAN, C. **Technology policy and economic performance: lessons from Japan**. Londres: Frances Press, 1987.
- FURTADO, A. T.; SCANDIFFIO, M. I. G.; CORTEZ, L. A. B. The brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, Amsterdam, Vol. 39, Issue 1, pp. 156-166, 2011.
- HASEGAWA, M. **Avaliação das capacidades e dos spinoffs gerados por programas de P&D: o programa cana do IAC**. 2005. 202 p. Tese (Doutorado em Política Científica e Tecnologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- KEMP, R.; SOETE, L. The greening of technological progress: an evolutionary perspective. **Futures**, pp. 437-457, June 1992.
- LEAL, M. R. L. V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: FAPESP, 2010. p. 561-576.

- LUNDEVALL, B. Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national innovation system. In: DOSI, C. (Ed.). **Technological change and economic theory**. London: Printer Publishers, 1988.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Balço energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: MME, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em: jul. 2014.
- _____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Rio de Janeiro: MME, 2012. 386 p.
- MUTTON, M. A.; ROSSETTO, R.; MUTTON, M. J. R. Utilização agrícola da vinhaça. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: P&D para a produtividade e sustentabilidade. São Paulo: FAPESP, 2010. p. 423-440.
- NELSON, R.; ROSENBERG, N. Technical innovation and national systems. In: NELSON, R. (Org.). **National innovation systems**: a comparative analysis. Nova York: Oxford University Press, 1993.
- _____; WINTER, S. **Uma teoria evolucionária da mudança econômica**. 1. ed. São Paulo: Unicamp, 2005. 631 p.
- NYKO, D. et al. Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 421-476, 2011.
- PEREIRA, F. S. **Comparação internacional de programas de subvenção a atividades de PD&I em biocombustíveis**. 2013. 181 p. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- ROSENBERG, N. **Por dentro da caixa preta**: tecnologia e economia. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2006. 430 p.
- SALLES-FILHO, S. et al. C&T no setor agrícola no Estado de São Paulo. In: BRENTANI, R. R.; BRITO, C. H. (Coord.). **Indicadores de ciência, tecnologia e inovação em São Paulo 2010**. São Paulo: FAPESP, 2011. p. 10-63.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativas do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2006.
- SCHUMPETER, J. A. **Capitalismo, socialismo e democracia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961. 487 p.
- SILVA, G. **Aprendizado do etanol celulósico no Brasil**: o caso do projeto dedini de hidrólise rápida (DHR). 2013, 91 p. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 2, p. 179-199, 2006.
- _____. Bioeletricidade sucroenergética tem grande potencial para expansão. **Anuário de Energias Renováveis**, Paraná, p. 297-299, 2011.
- TORQUATO, S. A.; RAMOS, R. C. Biomassa da cana-de-açúcar e a geração de bioeletricidade no Estado de São Paulo: usinas signatárias ao protocolo agroambiental paulista. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 43, n. 5, p. 59-68, set./out. 2013.
- WALTER, A. Workshop potencial de geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana: oportunidades, desafios e ações necessários. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: P&D para a produtividade e sustentabilidade, São Paulo, FAPESP, 2010. p. 577-582.

Recebido em 12/08/2014. Liberado para publicação em 11/03/2015.