

A FORMAÇÃO E O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA TECNOLÓGICO DE INOVAÇÃO EM ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO BRASILEIRO

MARCELO FERREIRA TETE
Universidade Federal de Goiás, FACE/UFG, Brasil
mftete@hotmail.com

EDA CASTRO LUCAS DE SOUZA
Universidade de Brasília, PPGA/UNB, Brasil
edalucas@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar a gênese e o processo de evolução de um sistema de inovação brasileiro desenvolvido ao longo de quarenta anos (1975-2015) em torno do etanol de segunda geração (2G). Utilizando-se a abordagem teórica de sistemas tecnológicos de inovação (Hekkert et al., 2007; Markard e Truffer, 2008a), particularmente a *framework* das funções do sistema de inovação, a pesquisa realizada emprega a estratégia do estudo de caso descritivo e, com base na técnica da análise de conteúdo de documentos e entrevistas, identifica os principais eventos que moldaram as trajetórias tecnológicas adotadas para a viabilização desse biocombustível avançado no Brasil. Os resultados encontrados indicam que depois de diversas iniciativas malsucedidas, o etanol 2G finalmente atingiu a escala comercial em 2015, embora isso não tenha significado pleno êxito técnico e econômico do STI.

Palavras chave: sistemas tecnológicos de inovação; funções do sistema; etanol 2G.

1. INTRODUÇÃO

No início dos anos 1990, ocorreu na literatura em inovação tecnológica um desenvolvimento teórico que deslocou o enfoque da pesquisa acadêmica, até então concentrado na inovação realizada por firmas individuais e indústrias específicas, para um enfoque fundado na abordagem sistêmica da inovação. À frente dessa nova perspectiva surge o conceito de sistemas nacionais de inovação idealizado por Lundvall (1992).

A abordagem de sistemas nacionais de inovação, por sua vez, deu origem, nos anos 1990, a novas versões teóricas que enfatizaram as características sistêmicas da inovação, porém com foco em níveis de análise diferentes do estado nação (Lundvall et al., 2002). Os sistemas de inovação passaram, então, a ser estudados em nível regional, setorial e tecnológico, o que fez emergir uma literatura específica, respectivamente, em sistemas regionais de inovação (Cooke et al., 1997), sistemas setoriais de inovação (Malerba, 2002) e sistemas tecnológicos (Carlsson & Stankiewicz, 1991).

De modo particular, o interesse no surgimento de novas tecnologias e na mudança institucional e organizacional que ocorrem *pari-passu* com o desenvolvimento tecnológico fez emergir a

abordagem de sistemas tecnológicos de inovação (doravante chamada de STI) que, com seus pressupostos teóricos e conceituais, motivou estudos, principalmente, sobre a emergência de setores baseados em tecnologias ditas limpas (Bergek et al., 2015) ou inovações tecnológicas promotoras da chamada transição para a sustentabilidade (Markard et al., 2012). O termo STI remonta, originalmente, ao conceito de sistema tecnológico (Carlsson & Stankiewicz, 1991) – e sistema de inovação tecnológica específico (Hekkert et al., 2007) – que foi definido por Markard e Truffer (2008a, p. 611) como “o conjunto de redes de atores e instituições que conjuntamente interagem em um campo tecnológico específico e contribuem para a geração, difusão e utilização de variantes de uma nova tecnologia e/ou um novo produto”.

Quatro elementos estruturais podem ser identificados na definição de STI: atores, redes (de atores), instituições e tecnologia (Suurs, 2009; Hekkert et al., 2011). Esses elementos representam, segundo Suurs (2009), o aspecto estático do STI, uma vez que dizem respeito a fatores que são relativamente estáveis ao longo do tempo. Para Bergek et al. (2008a), esses elementos permitem conduzir a análise estrutural do STI, mas não necessariamente do seu desempenho, já que não há ligação clara entre os fatores estruturais e os resultados do sistema. Assim, para preencher essa lacuna, Bergek et al. (2008b) propuseram uma abordagem analítica dinâmica elaborada como nível intermediário que permite conectar a estrutura ao desempenho do sistema por meio do exame das funções, ou processos-chave, servidas pelo STI em questão.

Segundo Bergek et al. (2008a) e Bergek (2002), o conceito de funções em um STI refere-se às contribuições (positivas ou negativas) de um ou mais elementos estruturais para o objetivo geral de desenvolver, difundir e utilizar inovação dentro de um determinado campo tecnológico. Em outras palavras, as funções são categorias de análise que correspondem a tipos de atividades, ou conjuntos de atividades, que contribuem para o objetivo geral do processo de inovação em um STI e permitem com que o foco se concentre na dinâmica do sistema (Suurs, 2009). A abordagem analítica de Bergek et al. (2008b) é formada por sete funções: experimentação empreendedora, desenvolvimento e difusão de conhecimento; influência sobre a direção da busca; mobilização de recursos; formação de mercado; desenvolvimento de externalidades positivas; e legitimação. Essas funções são descritas a seguir.

A função experimentação empreendedora diz respeito ao papel do empreendedor em tornar o potencial do novo conhecimento, das redes e dos mercados em ações concretas para gerar e aproveitar novas oportunidades de negócio no STI (Hekkert et al., 2007). Essa função envolve projetos de empresas voltados para o teste da utilidade da tecnologia emergente em um ambiente de aplicação prática ou comercial conduzidos, geralmente, sob a forma de experimentos ou demonstrações (Suurs, 2009).

A função desenvolvimento e difusão de conhecimento envolve as atividades de aprendizado relacionadas principalmente à tecnologia emergente (Suurs, 2009) que, essencialmente, se dividem em aprendizado pela busca (*learning by searching*) e aprendizado pelo fazer (*learning by doing*) (Hekkert et al., 2007).

A função influência sobre a direção da busca trata das atividades dentro do STI que moldam as necessidades, exigências e expectativas dos atores em relação, por exemplo, aos aspectos técnicos ou de política pública, e que definem ou não o seu eventual apoio à tecnologia emergente (Suurs, 2009). Ela cobre também os mecanismos que influenciam a direção da busca pelos integrantes do STI por diferentes tecnologias concorrentes, aplicações, mercados ou modelos de negócio (Bergek et al., 2008b).

A função mobilização de recursos trata da alocação de recursos financeiros, materiais e humanos necessários ao desenvolvimento do STI (Suurs, 2009). Em outras palavras, essa função indica a capacidade que o STI tem de financiar investimentos, criar sistemas de produção eficientes e recrutar apropriadamente uma força de trabalho qualificada (Bergek et al., 2010).

A função formação de mercado envolve as atividades que contribuem para a criação de demanda para tecnologias emergentes como, por exemplo, apoio financeiro ao uso da nova tecnologia ou incentivos fiscais e tributários (Suurs, 2009). Tal função é particularmente importante em um STI emergente, ou em transformação, pois nestes casos os mercados para a nova tecnologia podem ainda não existir ou estar subdesenvolvidos (Bergek et al., 2008b).

A função desenvolvimento de externalidades positivas, para Bergek et al. (2008b), refere-se às economias externas pecuniárias e não pecuniárias produzidas pelos processos de inovação e difusão tecnológica e cumpre um papel chave na formação e crescimento do STI.

Finalmente, a função legitimação envolve a aceitação social e a conformidade com as instituições relevantes, ou seja, refere-se à tentativa por parte dos proponentes da tecnologia emergente em torná-la aceita e desejada por atores relevantes com vistas à mobilização de recursos, criação de demanda e ao fortalecimento político do STI (Bergek et al., 2008b).

No presente trabalho essas funções são utilizadas como recurso heurístico e categorias analíticas para o exame do desenvolvimento de um STI brasileiro voltado à produção do etanol de segunda geração. Essa opção inspira-se, particularmente, nos estudos conduzidos por Suurs e Hekkert (2009a; 2009b) no setor de biocombustíveis holandês.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho adotou-se a estratégia do estudo de caso descritivo para a operacionalização da investigação empírica – decisão que se coaduna com a tradição da pesquisa empírica da abordagem de sistemas tecnológicos de inovação, tal como se constata nos estudos, por exemplo, de Negro e Hekkert (2008), Negro et al. (2007), Markard e Truffer (2008b) e Suurs e Hekkert (2009a).

O caso selecionado para estudo é o STI do etanol 2G, entendido como um sistema de inovação estruturado em torno de tecnologias relacionadas voltadas à obtenção do etanol celulósico ou etanol de segunda geração. Assim, decidiu-se analisar o processo formativo desse sistema de inovação e a dinâmica de suas transformações no Brasil a partir das trajetórias tecnológicas adotadas por seus atores ao longo do período 1975-2015.

Em razão do recorte longitudinal que abrange um período de 40 anos, procurou-se mapear as organizações relevantes para a pesquisa, cujos representantes pudessem ser acessados para a recuperação de dados relativos à formação do STI. O mapeamento realizado identificou 36 organizações que foram classificadas de acordo com sua natureza ou papel no sistema. Dessa população obteve-se acesso a representantes de 19 organizações distribuídas da seguinte forma: 3 empresas produtoras de etanol 2G em escala comercial (uma delas já extinta), 4 empresas fornecedoras de tecnologia para produção de etanol 2G, 4 ministérios, 1 agência reguladora, 1 agência federal de fomento à P, D&I, 1 banco federal de desenvolvimento, 1 centro de ciência e tecnologia, 3 universidades e 1 associações de classe.

A coleta de dados se deu com base em duas técnicas: levantamento documental e entrevistas semiestruturadas. No caso da primeira, foram analisados 216 documentos de natureza pública,

obtidos por meio de websites e bibliotecas físicas ou virtuais, e de natureza privada fornecidos com expresse consentimento dos entrevistados. No caso das entrevistas, estas foram do tipo semiestruturada, baseadas em roteiros desenvolvidos conforme o tipo de organização à qual o entrevistado estava vinculado.

A narrativa temporal da formação do STI do etanol 2G brasileiro foi escalonada em três períodos sucessivos que emergiram da análise dos dados empíricos. O primeiro período cobriu o intervalo entre 1975 a 1986, o segundo período abrangeu o intervalo 1987-2010 e o terceiro período contemplou o intervalo 2011-2015. Com o objetivo de captar a dinâmica do processo de formação do STI ao longo desses períodos, conduziu-se uma interpretação dos documentos levantados e das transcrições das entrevistas informada pelas funções do sistema tecnológico de inovação, cuja operacionalização foi apoiada por uma abordagem processual baseada no mapeamento e análise histórica de eventos, conforme recomendam Hekkert et al. (2007).

A análise dos eventos identificados seguiu três passos: identificação dos eventos, construção de um banco de dados de eventos e vinculação dos eventos às funções do sistema. A Figura 1 apresenta os tipos de eventos pré-definidos para cada função do STI do etanol 2G, com base em Suurs e Hekkert (2009a; 2009b)

Figura 1: Tipos de eventos indicadores das funções do STI do etanol 2G.

Funções do STI	Tipos de eventos
Experimentação empreendedora [F1]	Novos entrantes (incluindo firmas estabelecidas diversificadoras), projetos comerciais iniciados e encerrados; projetos demonstrativos iniciados e encerrados
Desenvolvimento e difusão do conhecimento [F2]	Estudos, testes de laboratório, experimentos-piloto, alianças e parcerias de P&D, redes de pesquisa, infraestrutura de ciência e tecnologia, patentes, conferências e outros eventos de comunicação científica e tecnológica.
Influência sobre a direção da busca [F3]	Resultados de pesquisas e estudos, regulamentações governamentais, políticas públicas, definição de padrões, visões e expectativas sobre o futuro da tecnologia e da P&D, problemas tecnológicos.
Mobilização de recursos [F4]	Investimentos em pesquisa científica e aplicada, financiamento público e privado de P&D (crédito, subsídios, fomento, subvenções), investimentos em plantas de produção, formação de recursos humanos.
Formação de mercado [F5]	Regulamentações e/ou padrões específicos para a nova tecnologia/produto, políticas de apoio à formação de nichos de mercado, incentivos tributários, mandatos, compras governamentais.
Desenvolvimento de externalidades positivas [F6]	Emergência de agrupamentos de mão de obra especializada, surgimento de fornecedores de bens intermediários e serviços especializados, espraiamento de conhecimento para outros setores, Pareceres ou avaliações técnicas de externalidades positivas
Legitimação [F7]	<i>Lobby</i> profissional, constituição de associações representativas, documentos oficiais de reconhecimento, pareceres/relatórios técnicos de conformidade, coalizões de defesa política.

No decurso da descrição narrativa da formação do STI do etanol 2G, os eventos relevantes identificados foram associados às suas respectivas funções, as quais foram referidas no texto

analítico utilizando-se a codificação F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7 entre colchetes []. A reconstrução narrativa da história da formação do sistema de inovação em estudo foi levada a efeito com o suporte da técnica da análise de conteúdo operacionalizada, mediante o uso do software Atlas.ti. A pesquisa que deu origem a este artigo identificou 185 eventos relevantes para a formação do STI em estudo, mas por conta da limitação de espaço, serão descritos a seguir apenas os principais identificados ao longo dos três períodos estudados.

3. ANÁLISE DO PERÍODO (1976-1986)

A formação do STI do etanol 2G no Brasil está indissociavelmente ligada à expansão da produção e do uso do etanol de cana-de-açúcar (etanol 1G) a partir da criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). No âmbito desse programa, membros do governo brasileiro solicitaram ao Instituto Nacional de Tecnologia (INT), em 1976, a realização de estudos com etanol derivado de diferentes matérias-primas, incluindo madeira. Com base nessa demanda e em informações e material bibliográfico colhidos em uma viagem à União Soviética, o diretor do Laboratório de Proteínas do INT, João Consani Perrone, iniciou em 1977 o desenvolvimento do projeto “Aproveitamento integral de recursos renováveis por via hidrolítica” [F2]. Naquele mesmo ano, os conhecimentos preliminares acumulados nesse projeto por Perrone foram apresentados em um seminário organizado pela Sociedade Brasileira de Silvicultura [F2], no qual concluiu que, apesar dos altos custos de produção do etanol celulósico de madeira, não havia outra opção para o Brasil, senão adotar a tecnologia soviética (baseada no processo de hidrólise ácida de madeira denominado Scholler), pelo fato de ser a única solução utilizada à época em escala industrial e porque processos baseados na outra alternativa tecnológica possível, a hidrólise enzimática, ainda não se mostravam técnica e economicamente viáveis [F3].

Entretanto, um fato ocorrido ainda em 1977 parecia contrariar esse posicionamento, pois a empresa Bioquímica do Brasil S.A. (BIOBRAS) decidiu fundar em Montes Claros (MG) a Bioferm, empreendimento com o explícito objetivo de produzir etanol de bagaço de cana-de-açúcar por meio da tecnologia de hidrólise enzimática [F1]. Apoiada com recursos governamentais da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) para a implantação de uma planta-piloto [F4], a Bioferm se mostrou economicamente inviável devido à alta demanda de energia necessária ao processo de conversão e ao custo do bagaço, o que implicou no encerramento de suas atividades de produção de etanol em curto espaço de tempo.

Com o fracasso da Bioferm e seguindo as recomendações do INT de se investir na hidrólise ácida de madeira, o governo brasileiro decidiu criar, com um investimento de US\$ 12 milhões [F4], a Coque e Álcool de Madeira S.A. (COALBRA) [F1]. Essa empresa foi efetivamente inaugurada em 1983, no município de Uberlândia (MG), operando uma planta industrial em escala de demonstração com capacidade para aproximadamente 10 milhões de litros/ano de etanol de madeira (eucalipto). A assistência técnica para a construção dessa unidade e a tecnologia para sua operação foram fornecidas pelo governo soviético. Contudo, tal empreendimento não se mostrou viável comercial e economicamente, devido ao alto custo do etanol produzido e de falhas de projeto. Diante disso, o governo federal decidiu encerrar suas operações em 1986.

Ao longo do período em que a COALBRA foi constituída e encerrada duas outras plantas em escala piloto foram construídas com recursos majoritariamente públicos [F4] para a produção de etanol por hidrólise ácida. Uma delas foi instalada em 1980 mediante a parceria entre a empresa Aços Villares S.A., a Secretaria de Tecnologia Industrial/MIC e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), via Companhia de Desenvolvimento Tecnológico (CODETEC), para o

desenvolvimento do projeto Hidrólise Ácida Contínua (Projeto Hydrocon) [F2]. A outra foi erguida nas dependências da antiga Faculdade de Engenharia Química de Lorena (FAENQUIL), também com interveniência da Secretaria de Tecnologia Industrial/MIC, com capacidade para produzir 500 litros de etanol/dia, obtidos do processamento de eucalipto [F2].

No ano de 1984, a empresa Dedini, grande fornecedora de bens de capital para usinas de etanol 1G, manifestou seu interesse pelo processo de hidrólise ácida instalando um laboratório de bancada com vistas à realização de sua P&D no âmbito dessa rota tecnológica [F2]. A partir dessa pequena estrutura, a empresa iniciou, com recursos financeiros próprios [F4], o desenvolvimento do seu próprio processo de hidrólise ácida, firmando, para tanto, um acordo com um cientista canadense detentor da patente de um processo de hidrólise de madeira. Esse acordo estabelecia que, no prazo de dois anos (provavelmente até 1986), o projeto ACOS (Álcool Celulósico Organosolv), que visava à obtenção de etanol de bagaço de cana-de-açúcar, deveria estar concluído. No entanto, o processo não apresentou bons rendimentos quando comparados aos obtidos com a madeira canadense. Assim, diante do insucesso dos testes realizados, a Dedini decidiu cancelar o acordo¹, optando por dar continuidade ao projeto individualmente [F2] com base em conhecimentos disponíveis na literatura científica e, portanto, não protegidos por patentes.

Todas as iniciativas acima relatadas, exceto o caso da Dedini, contaram com aportes de recursos financeiros estatais e perseguiram, exclusivamente, a rota tecnológica da hidrólise ácida [F3]. A hidrólise enzimática, apesar do insucesso da Bioferm, não foi de todo abandonada, pois ao menos no meio acadêmico gradativamente se tornou objeto de estudos de uma pequena comunidade de pesquisadores que, em 1983, compartilhou os resultados de suas investigações no I Seminário de Hidrólise Enzimática de Biomassas (SHEB) [F2], na cidade de Maringá (PR). Nesse evento científico, que contou com a presença de 51 participantes, foi redigido um documento com as seguintes recomendações ao poder público e à iniciativa privada para a viabilização da tecnologia enzimática [F3]: (i) construção de uma planta-piloto visando ao *scale-up* do processo de hidrólise enzimática, utilizando prioritariamente o bagaço de cana-de-açúcar; (ii) realização de estudo técnico e econômico sobre a conveniência da centralização ou descentralização da produção de enzimas; (iii) obtenção de maior suporte financeiro para pesquisas básicas; (iv) obtenção de apoio político; (v) promoção do intercâmbio de informações entre grupos de pesquisa e indústrias.

Apesar do aparente pragmatismo de tais sugestões, os conhecimentos e a tecnologia de hidrólise enzimática parecem ter ficado confinados apenas aos laboratórios científicos sem gerar nenhum novo empreendimento comercial para explorá-los ou mesmo projetos de P&D em escala piloto ou de demonstração, a exemplo do que fez a própria Bioferm em 1977. O SHEB contou com outras duas edições nos anos 1980 (1985 e 1987), mas sofreu em seguida uma interrupção de sete anos, sendo retomado somente em 1994, quando sua quarta edição ocorreu.

Tem-se, portanto, que no período 1976-1986 houve a proeminência da função desenvolvimento e difusão do conhecimento [F2], o que sugere que o início da formação do STI do etanol 2G se caracterizou pelo aprendizado sobre a tecnologia de hidrólise ácida. Conforme propõe Hekkert et al. (2007a), o aprendizado correspondente a essa função pode se dar de duas formas, ou seja, pela busca (*learning by searching*) e pelo fazer (*learning by doing*). No caso analisado, o aprendizado pela busca foi obtido por meio de missões de prospeção tecnológica na União Soviética e, pelo fazer, quando se tentou replicar a tecnologia obtida daquele país no Brasil, seja em escala de

¹ O ano em que o rompimento desse acordo ocorreu não foi identificado na pesquisa documental.

laboratório no INT e na FTI, seja em escala industrial na COALBRA. A função experimentação empreendedora/empresarial [F1], por sua vez, refletiu o papel do empreendedorismo estatal, capitaneando a tentativa frustrada de produção comercial do etanol 2G.

No mesmo período, as funções influência sobre a direção da busca [F3] e mobilização de recursos [F4] foram as responsáveis por permitir que o conhecimento sobre hidrólise ácida fosse gerado e difundido no Brasil. Confirmando Suurs (2009), a primeira contribuiu para a geração de expectativas positivas dos atores do STI do etanol 2G em relação ao futuro da tecnologia emergente (em um primeiro momento, e mais fortemente, em relação à hidrólise ácida e, posteriormente, em relação à hidrólise enzimática, ainda que de forma incipiente). Já a segunda, conforme sugerem Bergek et al. (2007b), expressou a alocação de recursos, predominantemente públicos, para o financiamento da P&D em hidrólise ácida (pesquisa de laboratório e plantas-piloto) e da produção industrial do etanol 2G (planta da COALBRA).

4. ANÁLISE DO PERÍODO (1987-2010)

4.1 A insistência na hidrólise ácida

A decisão da Dedini de levar adiante o projeto ACOS sozinha se deu em um período em que os investimentos governamentais no Proálcool estavam sendo gradualmente reduzidos. Diante dos grandes investimentos que seriam necessários para tal iniciativa, a empresa recorreu ao Banco Mundial e obteve recursos [F4] para a construção de uma planta-piloto [F2], concluída em 1989 e com capacidade para produzir 100 litros de etanol hidratado/dia.

Em 1992, o Proálcool já tinha praticamente chegado ao seu fim e a despeito desse fato desfavorável, a Dedini continuou a apostar no seu processo de P&D em etanol 2G, pleiteando e, conseqüentemente, obtendo a aprovação da FINEP para o financiamento [F4] da complementação e continuidade da operação de sua planta-piloto. Após a conclusão das melhorias necessárias, centenas de testes foram realizados, o que resultou no domínio da tecnologia de hidrólise ácida rápida (nomeada Dedidini Hidrólise Rápida - DHR) e, conseqüentemente, no depósito de uma patente internacional no ano de 1986 [F2].

No mesmo ano em que a referida patente foi requerida, a Dedini iniciou entendimentos com o Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), visando ao estabelecimento de uma parceria para a continuação da sua P&D em hidrólise ácida, o que, efetivamente, ocorreu em 1997 [F2]. Com o acordo firmado, a planta-piloto foi transferida para o CTC e lá foi utilizada em testes que produziram resultados promissores que motivaram a Dedini a ampliar a escala do processo DHR, ou seja, elevando-a de piloto para a escala de demonstração antes que o objetivo da produção comercial fosse alcançado. Dada a limitação de recursos para investir em tal *up-grade*, a Dedini resolveu buscar financiamento junto à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), valendo-se da parceria com o CTC (qualificado, como centro de pesquisas, a propor projetos e receber recursos públicos de entidades de fomento à pesquisa tecnológica) para legitimar o seu pleito.

Tal iniciativa resultou, em 2002, na parceria Dedini-CTC-FAPESP [F2] por meio do programa Pesquisa em Parceria para a Inovação Tecnológica (PITE). Firmada para executar o projeto “Processo DHR: projeto, implantação e operação da unidade de desenvolvimento de processo”, a parceria entre as três organizações foi estabelecida para vigorar de fevereiro de 2002 a agosto de 2007 [F2] e somente da FAPESP recebeu cerca de R\$ 3,8 milhões em recursos subvencionados [F4].

Tal como previsto nos termos da referida parceria, em novembro de 2002, a Dedini instalou, anexa à Usina São Luiz, localizada em Pirassununga (SP), a Unidade Semi-Industrial de Desenvolvimento de Processos (UDP), com capacidade para processar cerca de 2 mil quilos/hora de bagaço de cana-de-açúcar e produzir 5 mil litros/dia de etanol 2G [F1]. O aprendizado obtido com a operação dessa planta de demonstração parece ter contribuído para o aprimoramento do DHR, pois, em 2005, a Dedini requereu outra patente do processo a fim de incluir os aperfeiçoamentos realizados [F2]. Entretanto, apesar disso, as análises econômicas realizadas com a operação da planta demonstrativa indicaram a inviabilidade econômica do processo DHR devido a problemas com abrasão e corrosão de equipamentos que, por sua vez, exigiriam mais investimentos na compra de equipamentos específicos, caso se quisesse dar continuidade ao funcionamento da unidade produtiva. Além desses motivos, outra causa da inviabilidade do processo criado pela Dedini era a sua falta de sustentabilidade ambiental.

4.2 A transição tecnológica para a hidrólise enzimática

Nos anos 1990, enquanto a Dedini continuava a apostar na tecnologia nacional de hidrólise ácida, parecia não haver no Brasil um posicionamento claro em favor ou contra a alternativa da hidrólise enzimática. Discussões nesse sentido estavam ocorrendo com mais intensidade na comunidade científica em eventos periódicos como o SHEB (retomado em 1994), o Seminário Nacional de Tecnologia Enzimática (ENZITEC) e o Simpósio Nacional de Fermentação (SINAFERM) que, posteriormente, fundiu-se ao SHEB [F2]. Dos anos 1990 em diante, esses três fóruns de comunicação científica, em especial o SHEB e o ENZITEC, tornaram-se as principais referências direcionadoras da pesquisa acadêmica em hidrólise enzimática no Brasil [F3].

Dado o grau de internacionalização desses eventos, é possível que a comunidade de pesquisadores reunida por eles já estivesse repercutindo as mudanças na investigação científica e tecnológica relacionada ao desenvolvimento e à aplicação da hidrólise enzimática na produção de etanol 2G – em curso naquela década em países como Estados Unidos, por meio do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), e Canadá por conta da P&D conduzida pela Iogen, empresa que em 1999 deu início à construção da primeira planta de demonstração de etanol 2G do mundo.

Esses desenvolvimentos científico-tecnológicos parecem ter sido captados pelos formuladores das políticas de ciência e tecnologia brasileiros somente a partir de 2003, quando o Presidente Lula da Silva iniciando o primeiro de seus dois mandatos à frente do governo nacional determinou ao Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE), órgão diretamente ligado ao seu gabinete, que realizasse uma análise técnica de temas estratégicos para o país. Nesse sentido o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) foi contratado para conduzir um estudo prospectivo sobre o etanol.

Em face dessa demanda, o CGEE produziu o estudo “Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil” [F2]. Nesse trabalho, os custos de produção do etanol 2G foram prospectivamente estimados para os anos de 2004, 2010 e 2020 com base nos estudos do NREL que se dedicava ao desenvolvimento da tecnologia de hidrólise enzimática. A consideração dessa rota tecnológica coincidiu com a inauguração, em 2004, da planta demonstrativa da Iogen no Canadá (com capacidade para 7.600 litros de etanol/dia), primeira unidade produtiva no mundo a produzir etanol 2G via hidrólise enzimática. Além desse feito tecnológico da Iogen, no ano de 2005 outro evento relevante ocorreu na América do Norte quando o governo dos Estados Unidos lançou o *Renewable Fuel Standard* (RFS1), programa que fixou a meta de 250 milhões de galões

de etanol 2G/ano, produzidos à base de biomassa lignocelulósica, como volume mínimo a ser misturado à gasolina vendida no país a partir de 2013.

Diante das oportunidades que o RFS1 poderia representar para as exportações brasileiras de etanol, o governo brasileiro encomendou, ainda em 2005, um novo estudo ao CGEE para subsidiar a formulação de políticas públicas que orientassem a expansão sustentável da produção desse biocombustível no país. Esse estudo, para o qual foram destinados mais de R\$ 1 milhão [F4], chamado de Projeto Etanol, foi executado em três fases entre os anos 2005 e 2008 [F2]. No relatório da segunda fase, em particular, a opção tecnológica da Iogen, baseada em hidrólise enzimática, foi recomendada para o Brasil, assim como recomendou-se ao governo brasileiro que incentivasse a produção do etanol 2G, ampliasse a pesquisa em hidrólise e implantasse um centro de excelência em pesquisa e desenvolvimento de bioetanol de classe internacional, capaz de complementar e incrementar as competências nacionais em hidrólise de biomassa entre outras rotas tecnológicas [F3]. Tais recomendações parecem ter sido acatadas pelo governo brasileiro, pois em 2009 foi inaugurado oficialmente o Centro de Tecnologia do Bioetanol (CTBE) com investimentos públicos da ordem de R\$ 69 milhões² [F4].

Estimulado pelas oportunidades e desafios que a hidrólise enzimática representava, o coordenador do Projeto Etanol conduzido pelo CGEE, Prof. Rogério Cezar Cerqueira Leite, associou-se à professora Elba Bon, do Instituto de Química da UFRJ, para a criação de Rede Bioetanol, grupo formado por mais de 150 pesquisadores seniores ligados a quinze instituições universitárias brasileiras e quatro estrangeiras, assim como por companhias nacionais e do exterior [F2]. Uma das primeiras iniciativas dessa rede foi a submissão de um grande projeto à FINEP, intitulado Projeto Bioetanol I que, por sua vez, foi aprovado em 2006 e recebeu aporte de R\$ 3 milhões [F4] para sua execução entre 2006 e 2009.

Como o cerne do projeto conduzido pela Rede Bioetanol estava centrado na área de enzimas, a coordenação da área científica ficou sediada no Laboratório de Tecnologia Enzimática (ENZITEC) do Instituto de Química da UFRJ. Esse centro de pesquisa, após a execução do Projeto Bioetanol I, aproveitou o *know-how* acumulado e no fim de 2009 obteve financiamento de R\$ 9,9 milhões [F4] para o que ficou conhecido como Projeto Bioetanol II [F2], esforço de pesquisa que, entre outros resultados, culminou na construção do Laboratório do Bioetanol, inaugurado em 2013 na UFRJ.

Em suma, a análise do período 1987-2010 demonstra que neste interregno houve a predominância das funções desenvolvimento e difusão do conhecimento [F2] e mobilização de recursos [F4]. Ou seja, este foi um período da formação do STI do etanol 2G em que predominaram as atividades de P&D e o financiamento das mesmas com recursos majoritariamente públicos. Nessa fase do STI nota-se, também, a importância da função influência sobre a direção da busca [F3] que refletiu a mudança de trajetória tecnológica que, até então assentada na hidrólise ácida e representada exclusivamente pela experimentação empreendedora [F1] malsucedida da empresa Dedini (com sua planta em escala de

² Antes da inauguração do CTBE, mais especificamente no ano de 2007, a Petrobras construiu, em parceria com a UFRJ e outras universidades, a primeira planta-piloto do Brasil e da América Latina para produção de etanol 2G baseada em hidrólise enzimática [F2]. Com capacidade para produzir 220 litros de etanol por tonelada de bagaço de cana, a intenção com essa infraestrutura era estabelecer as bases para que, em 2011, a empresa pudesse inaugurar um planta semi-industrial (escala de demonstração) com capacidade para processar até 10 toneladas de bagaço a cada 32 horas. No entanto, a pesquisa documental identificou que em 25/11/2007, essa planta estava processando apenas 10 quilos de bagaço. Em 23/06/2008, uma reportagem veiculada no jornal O Estado de São Paulo informava que fontes de fora da Petrobras alegavam que a planta, até então, nunca chegara a funcionar plenamente, o que foi negado pela empresa.

demonstração), sofreu uma transição para um novo padrão tecnológico, baseado na biotecnologia (microrganismos e enzimas) e no aproveitamento da palha e bagaço da cana-de-açúcar. Em outras palavras, com a comprovação da inviabilidade da tecnologia desenvolvida pela Dedini, o paradigma da hidrólise ácida cedeu lugar para a hidrólise enzimática como paradigma dominante.

Esse novo direcionamento passou a guiar a P&D e os investimentos financeiros necessários para que novos processos de conversão fossem desenvolvidos e tornassem a produção de etanol 2G técnica e economicamente viável no Brasil. Esse processo foi caracterizado pelo aprendizado pela busca (*learning by searching*), segundo a classificação de Hekkert et al. (2007a), uma vez que as atividades de P&D conduzidas no país procuraram desenvolver novas soluções tecnológicas apropriadas à conversão da biomassa mais disponível no Brasil, ou seja, a cana-de-açúcar – matéria-prima não testada nos desenvolvimentos tecnológicos produzidos à época no NREL (Estados Unidos) ou na Iogen (Canadá).

5. ANÁLISE DO PERÍODO (2011-2015)

O período 2011-2015 continuou a ser marcado por iniciativas de pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico em hidrólise enzimática [F2] que foram levadas a efeito por instituições como a Embrapa Agroenergia³ e universidades públicas (UFRJ, UNICAMP, UNB, entre outras) que, apoiadas com recursos oriundos decorrentes da chamada “cláusula do 1%” da Lei do Petróleo - Lei n. 9.478/1997, que determina que os concessionários da exploração de petróleo e gás invistam em P&D valor equivalente a 1% da receita bruta que obtêm de campos de grande rentabilidade ou com grande volume de produção –, recursos governamentais (FINEP, por exemplo) ou recursos obtidos via cooperação internacional, possibilitaram importantes avanços nessa rota tecnológica. Todavia, esse foi o período da história do STI do etanol 2G em que houve um esforço significativo do governo federal em criar as condições de financiamento e regulamentação para que o biocombustível fosse produzido em plantas industriais em escala comercial.

Esse processo teve início ainda em 2010 com um estudo realizado por técnicos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e da FINEP diagnosticou a posição de desvantagem do Brasil na corrida mundial pelos biocombustíveis celulósicos (notadamente o etanol 2G). Diante dessa constatação, as duas organizações uniram esforços e recursos financeiros e, em 2011, lançaram o edital do Plano Conjunto BNDES-FINEP de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS Industrial). Com R\$ 1 bilhão de previsão orçamentária inicial [F4], esse programa de financiamento objetivou direcionar tanto os projetos de P&D [F2] quanto as iniciativas empresariais que visassem ao protagonismo produtivo e tecnológico do etanol 2G brasileiro no plano internacional [F3] e, sobretudo, à viabilização comercial desse biocombustível [F5], legitimando-o como opção estratégica para a matriz energética de transportes nacional [F7]. Nesta seção analítica, serão abordados três projetos apoiados pelo PAISS: sendo um de produção em escala de demonstração (CTC) e dois de produção em escala comercial (GranBio e Raízen), todos baseados em hidrólise enzimática, mas diferentes entre si em função de configurações tecnológicas específicas.

A primeira empresa a contratar e investir recursos do PAISS para a construção de infraestrutura para a produção de etanol 2G foi o CTC, cuja experiência na P&D em hidrólise enzimática remonta a 2007, quando estabeleceu uma parceria com a Novozymes (empresa dinamarquesa do

³ Instituição criada efetivamente em 2007 e inaugurada oficialmente em 2010.

segmento de enzimas industriais), e a 2009, com a instalação da planta-piloto resultante dessa parceria. Logo após assinar o contrato com BNDES e FINEP, em dezembro de 2012, no valor inicial de R\$ 227 milhões [F4] (que após suplementação alcançou R\$ 350 milhões), o CTC firmou contrato com a Usina São Manoel, localizada em São Manoel (SP), para a construção de uma planta demonstrativa de etanol 2G acoplada à sua infraestrutura de produção de etanol 1G. As obras dessa planta semi-industrial começaram em 2013 e, após quase um ano de trabalhos e investimentos, da ordem de R\$ 80 milhões, foi inaugurada em julho de 2014 [F1].

A GranBio, segunda empresa apoiada pelo PAISS, foi criada em junho de 2011 pelo ex-presidente de uma grande empresa petroquímica brasileira [F1]. O programa financiou R\$ 300 milhões [F4] para investimentos na primeira unidade e o BNDES, por intermédio da BNDES Participações (BNDESPAR), tornou-se sócio da empresa adquirindo 15% de participação acionária, o que resultou em um aporte de R\$ 600 milhões em seu capital [F4]. A unidade industrial da empresa, com capacidade para produzir 82,5 milhões de litros de etanol/ano foi construída em São Miguel dos Campos (AL) ao lado da Usina Caeté, com a qual foi compartilhada uma infraestrutura de cogeração de vapor e energia também montada como parte do projeto da operação industrial aprovado no âmbito do PAISS Industrial. Foram investidos nessas instalações R\$ 265 milhões, dos quais R\$ 190 milhões na planta de produção e R\$ 75 milhões no sistema de cogeração [F4]. A biomassa definida como matéria-prima do processo industrial foi a palha de cana-de-açúcar, fornecida pela própria Usina Caeté e por outras três usinas próximas à planta.

A terceira empresa a ser apoiada pelo PAISS foi a Raízen, joint venture criada em 2011 pela anglo-holandesa Shell e a brasileira Cosan. Em outubro de 2012, a Raízen anunciou o acordo com a Iogen (empresa em que a Shell também é acionista) visando ao investimento inicial em uma planta de produção de etanol 2G em escala comercial no Brasil. Em novembro de 2013, após aprovação de financiamento pelo PAISS Industrial da ordem de R\$ 207,7 milhões [F4], a Raízen anunciou o início da construção de sua primeira planta de etanol 2G com capacidade para 40 milhões de litros/ano, anexa à Usina Costa Pinto em Piracicaba (SP). Depois de um ano de obras e de um investimento de, aproximadamente, R\$ 240 milhões [F4], a Raízen inaugurou, em novembro de 2014, a sua planta integrada de etanol 2G produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar [F1].

Em 2014, as três empresas (CTC, GranBio e Raízen) mobilizaram-se pela conquista de legitimidade por meio da criação da Associação Brasileira de Biotecnologia Industrial (ABBI) [F7], entidade formada por 12 empresas⁴, voltada para a defesa dos interesses da indústria de bioquímicos e, de modo especial, da indústria do etanol 2G. Em linhas gerais, a ABBI foi criada com o objetivo de promover a biotecnologia industrial, contribuir para o aprimoramento do marco regulatório da biotecnologia industrial no Brasil, discutir políticas públicas de incentivo para as empresas do setor, gerar e trocar conhecimentos de interesse da biotecnologia industrial, bem como contribuir para o desenvolvimento dessa área por meio de acordos com instituições de ciência e tecnologia. O potencial de contribuição para a sustentabilidade ambiental também parece ter sido o argumento central adotado pela entidade. O raciocínio subjacente a esse argumento foi resumido em um material de apresentação da associação em quatro áreas nas quais a biotecnologia oferece grande potencial de geração de externalidades positivas: 1) a capacidade de reduzir CO₂ da atmosfera; 2) redução no uso e na dependência de produtos petroquímicos e

⁴ As seguintes empresas participaram da fundação da ABBI: Abengoa, Amyris, BASF, Biochemtex, CTC, Dow, DSM, Du Pont, GranBio, Raízen, Novozymes, Rhodia-Solvay.

combustíveis fósseis; 3) redução no consumo de água e na geração de resíduos de processos industriais; 4) maior aproveitamento de todo o potencial da biodiversidade e dos produtos e resíduos da biomassa [F6].

Ainda no ano de 2014 outro importante evento contribuiu para a legitimação do STI do etanol 2G brasileiro: a atualização da Lei 12.490/2011, por meio da Resolução 14/2014 publicada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Essa resolução reconheceu o etanol de segunda geração como biocombustível apto a ser comercializado no país [F5]. Provavelmente influenciada pelos desenvolvimentos na P&D em etanol 2G promovidos por CTC, GranBio e Raízen, essa mudança conferiu ao etanol 2G um novo status e, portanto, legitimidade na política energética nacional, à medida que passou a se submeter aos mesmos critérios regulatórios que já eram aplicados pela ANP ao etanol 1G [F7]. Apesar desse marco regulatório ter garantido o acesso do etanol 2G ao grande mercado de biocombustíveis brasileiro, até o ano de 2015 sua produção e comercialização não havia sido viabilizada economicamente, sobretudo por conta de problemas tecnológicos enfrentados pelas empresas GranBio e Raízen que implicaram volume de produção muito baixo e, conseqüentemente, custos não competitivos com o etanol 1G.

O período 2011-2015 expressa, portanto, uma fase da evolução do STI do etanol 2G marcada pela operacionalização de todas as suas funções, embora com predomínio das funções experimentação empreendedora/empresarial [F1] e mobilização de recursos [F4] que foram fundamentais não só para a tentativa de viabilizar no Brasil a produção comercial de etanol [F5] por meio da escolha da rota enzimática (em torno da qual parecia haver consenso sobre o seu potencial de se tornar a tecnologia “vencedora” no país e no mundo [F3]), mas também para a continuidade do financiamento à P&D relacionada a essa tecnologia [F2].

Para Hekkert et al. (2007a), empreendedores podem ser novos entrantes ou empresas incumbentes, que diversificam suas estratégias de negócios para obterem vantagens resultantes de novos desenvolvimentos tecnológicos. No caso do STI do etanol 2G a importância desses atores ficou evidenciada entre 2011 e 2015 com o incentivo governamental ao surgimento de três empreendimentos [F1] que se enquadram nessa classificação. Ou seja, uma nova entrante sem experiência com a produção de etanol (GranBio) e duas empresas incumbentes, sendo uma com larga experiência na produção de etanol e maior *player* brasileiro nesse segmento (Raízen) e, a outra, com profundo conhecimento acumulado em P&D relacionada à cana-de-açúcar e etanol (CTC). Os recursos financeiros aportados pelo programa PAISS Industrial, do BNDES e FINEP, à implantação somente da infraestrutura produtiva dessas três organizações alcançou a cifra de R\$ 735 milhões [F4] (sem contar os R\$ 600 milhões investidos pelo BNDESPAR na GranBio a título de participação acionária).

A função legitimação também cumpriu um papel importante no desenvolvimento do STI, refletindo a busca dos atores do sistema pelo reconhecimento do etanol 2G como biocombustível estratégico para o Brasil [F7]. Conforme observam Bergek et al. (2008b), essa função refere-se à tentativa, por parte dos proponentes da tecnologia emergente, em torná-la aceita e desejada por atores relevantes com vistas à mobilização de recursos, criação de demanda e ao fortalecimento político do STI (Bergek et al., 2008b). No caso do STI do etanol 2G, a mobilização de recursos para o escalonamento de tecnologias de hidrólise enzimática partiu do governo federal (via BNDES e FINEP), pois o objetivo era criar as condições para que o etanol 2G pudesse ter comprovada a sua viabilidade técnica e econômica e, com isso, ser legitimado como biocombustível integrante da matriz energética nacional de transportes.

Além disso, depois que as empresas CTC, GranBio e Raízen construíram suas plantas industriais, foi iniciado entre elas um processo de articulação política que resultou na criação da ABBI, entidade que assumiu a responsabilidade pela legitimação e defesa dos interesses dos produtores de etanol 2G e da biotecnologia industrial perante, principalmente, o governo federal [F7]. Uma das pautas prioritárias da ABBI, desde a sua fundação, tem sido a negociação com instâncias do governo federal de uma política pública que estimule a demanda por etanol 2G e reconheça as suas externalidades positivas [F6]. Em outras palavras, esse esforço político da entidade, tem por objetivo central criar condições mínimas para a formação de um mercado [F5] assegurado para o etanol 2G.

Um passo nesse sentido foi dado com o enquadramento do etanol 2G no arcabouço regulatório da ANP, garantindo-lhe acesso ao grande mercado já ocupado pelo etanol 1G. Apesar disso, parece ser consenso entre os próprios atores do STI que, por conta do baixo volume de produção das duas únicas empresas aptas a produzi-lo comercialmente (GranBio e Raízen), e dos problemas tecnológicos enfrentados por elas, esse biocombustível não atingirá no curto prazo a economicidade necessária para competir nos mercados nacional e internacional.

6. CONCLUSÕES

No primeiro período de seu processo de formação (1975-1986), a formação do STI do etanol 2G foi liderada pelo governo federal que, por intermédio dos ministérios da Indústria e do Comércio (MIC), alocou substanciais recursos financeiros e humanos [F4] para a realização de atividades de P&D [F2] direcionadas, principalmente, para a rota tecnológica da hidrólise ácida [F3] – importada da União Soviética – aplicada ao processamento de madeira (eucalipto) e, em menor extensão, ao bagaço de cana-de-açúcar.

O segundo período da formação do STI do etanol 2G (1987-2010), a exemplo do primeiro período, também foi movido por atividades de P&D [F2] financiadas majoritariamente por recursos estatais [F4], mas que se orientaram em diferentes momentos por rotas tecnológicas distintas [F3]. No primeiro momento, entre 1987 e 2007, a dinâmica do STI foi protagonizada pelos esforços de P&D da empresa Dedini (coadjuvada pelo CTC entre 1997 e 2007) que, apoiada por recursos próprios e do governo do estado de São Paulo (via FAPESP), insistiu em desenvolver a rota da hidrólise ácida aplicando-a à conversão do bagaço de cana-de-açúcar em etanol (tecnologia DHR). A comprovação da inviabilidade da tecnologia da Dedini após testes em escala de demonstração, foi identificada como um dos marcos principais da inflexão da trajetória tecnológica do STI do etanol 2G que redirecionou os esforços de P&D para outra rota tecnológica, a hidrólise enzimática. Essa mudança de curso marca o início de uma nova fase do segundo período da evolução do STI que durou de 2007 a 2010.

Nesse segundo momento, a formação do STI foi protagonizada por redes de pesquisadores nucleadas em universidades públicas brasileiras que, financiadas com recursos majoritariamente do governo federal e em interação com empresas, centros de pesquisa e universidades internacionais, produziram importantes conhecimentos sobre conversão enzimática de bagaço e palha de cana-de-açúcar em etanol. Além da disponibilização de recursos financeiros para projetos de P&D [F4], o governo federal deu uma forte contribuição ao redirecionamento da trajetória tecnológica [F3] do STI do etanol 2G com a criação do CTBE, um importante centro de pesquisa que, entre outras linhas de pesquisa, dedica especial atenção à produção de etanol 2G pela via enzimática.

O terceiro e mais recente período da formação do STI do etanol 2G, correspondente ao intervalo 2011-2015, foi movido por recursos financeiros públicos [F4], empreendedorismo privado [F1], atividades de P&D acadêmicas e empresariais [F2] e pelas tentativas de legitimação do etanol 2G como biocombustível estratégico para o Brasil. Nesse período, o BNDES e a FINEP, em uma iniciativa conjunta, elaboraram o PAISS Industrial que disponibilizou crédito e subvenção econômica para o financiamento da construção de plantas industriais e atividades de P&D. Três empresas financiadas por esses recursos, em particular, levaram a efeito a instalação de plantas em escala comercial (GranBio e Raízen) e de demonstração (CTC), o que gerou uma competição pelo desenvolvimento do processo mais eficiente de conversão enzimática de biomassa de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- Bergek, A. (2002). Shaping and exploiting technological opportunities: the case of renewable energy technology in Sweden. PhD thesis, Department of Industrial Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Bergek, A., Hekkert, M., & Jacobsson, S. (2008a). Functions in innovation systems: a framework for analysing energy system dynamics and identifying goals for system-building activities by entrepreneurs and policy makers. In: Foxon, T., Köhler, J., & Oughton, C. (Eds.). *Innovations for a low carbon economy: economic, institutional and management approaches*. Cheltenham, Edward Elgar.
- Bergek, A., Hekkert, M., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, S., & Truffer, B. (2015). Technological innovation systems in contexts: conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, 51-64.
- Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S., Rickne, A. (2008b). Analyzing the functional dynamics of technological innovations systems: a scheme of analysis. *Research Policy*, 37, 407-429.
- Bergek, A., Jacobsson, Hekkert, M., & Smith, K. (2010). Functionality of innovation systems as a rationale for and guide to innovation policy. In: Smits, R., Kuhlmann, S., & Shapira, P. (Eds.). *Innovation policy, theory and practice: an international handbook*. Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- Carlsson, B., & Stankiewicz, R. (1991). On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics*, 1, 93-118.
- Cooke, P., Uranga, M.G., & Etxebarria, G. (1997). Regional innovation systems: institutional and organisational dimensions. *Research Policy*, 26, 475-491.
- Hekkert, M., Negro, S., Heimeriks, G., & Harmsen, R. (2011). *Technological innovation system analysis: a manual for analysts*. Faculty of Geosciences, Utrecht University, Utrecht.
- Hekkert, M. P., Suurs, R. A. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S., & Smits, R. E. H. M. (2007). Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 413-432.
- Lundvall, B.-Å. (1992). *National systems of innovation: toward a theory of innovation and interactive learning*. London, Pinter Publishers.
- Lundvall, B.-Å., Johnson, B., Andersen, E.S., & Dalum, B. (2002). National systems of production, innovation and competence building. *Research Policy*, 31, 213-231.
- Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31, 247-264.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41, 955-967.
- Markard, J., & Truffer, B. (2008a). Technological innovation systems and the multi-level perspective: towards an integrated framework. *Research Policy*, 37, 596-615.
- Markard, J., & Truffer, B. (2008b). Actor-oriented analysis of innovation systems: exploring micro-meso level linkages in the case of stationary fuel cells. *Technology Analysis and Strategic Management*, 20 (4), 443-464.

Negro, S. O., & Hekkert, M. P. (2008). Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany. *Technology Analysis & Strategic Management*, 20 (4), 465-482.

Negro, S. O., Hekkert, M. P., Smits, R. E. (2007). Explaining the failure of the Dutch innovation system for biomass digestion: a functional analysis. *Energy Policy*, 35, 925-938.

Suurs, R. A. A. (2009). *Motors of sustainable innovation: towards a theory on the dynamics of technological innovation systems*. Utrecht University, Utrecht.

Suurs, R. A. A., & Hekkert, M. P. (2009a). Competition between first and second generation technologies: lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands. *Energy*, 34, 669-679.

Suurs, R. A. A., & Hekkert, M. P. (2009b). Cumulative causation in the formation of a technological innovation system: the case of biofuels in the Netherlands. *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 1003-1020.

