

ROADMAP TECNOLÓGICO EM MATÉRIAS-PRIMAS RENOVÁVEIS: UMA BASE PARA A CONSTRUÇÃO DE POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS NO BRASIL

Paulo Coutinho

IDEOM/BRASKEM, Av. das Nações Unidas, 8501, 24º andar, 05425-070 São Paulo – SP, Brasil

José Vitor Bomtempo*

Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Bl. E, Ilha do Fundão, 21941-909 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Recebido em 19/4/10; aceito em 3/11/10; publicado na web em 25/2/11

A TECHNOLOGY ROADMAP IN RENEWABLE RAW MATERIALS: A BASIS FOR PUBLIC POLICY AND STRATEGIES IN BRAZIL. This paper presents a technology roadmap applied to renewable raw materials as a basis for public policy and strategies in Brazil. The roadmap, developed by Braskem professionals and academic experts, intends to be a basis of discussion and common language creation regarding the possible utilization of renewable raw materials for biofuel and chemical production in Brazil. Following this perspective, the roadmap is presented to public debate and contribution from the stakeholders. The paper describes the roadmap construction and presents the main implications for policy and strategy goals. An analysis of the innovation dynamics in renewable raw materials is developed as an outcome of the roadmap.

Keywords: technology roadmaps; biofuels; bioproducts.

INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas e as medidas que vêm sendo adotadas no mundo para seu controle deverão ter impacto direto na atividade industrial. Essa perspectiva tem levado ao crescimento de investimento em tecnologias e produtos mais “limpos”. Na área de energia em particular, somam-se ainda para muitos países questões estratégicas ligadas à segurança de abastecimento e busca de níveis menos desconfortáveis de dependência. Nesse contexto, abrem-se oportunidades para o desenvolvimento de uma indústria baseada em matérias-primas renováveis (MPR). Além dos biocombustíveis já conhecidos, um fluxo de inovações em desenvolvimento pode estar lançando as bases de uma indústria integrada de exploração da biomassa. Essa indústria pode ultrapassar os limites da produção de biocombustíveis e oferecer rotas para a substituição de matérias-primas fósseis e introdução de novos produtos químicos. No futuro, quando a base de matérias-primas deixar de ser fóssil, energia e química serão certamente indústrias muito diferentes das atuais.

O Brasil tem uma posição interessante nesse cenário. O país é líder na utilização de matérias-primas renováveis para fins energéticos – a indústria do etanol é a referência mundial no setor. A petroquímica, construída nas últimas quatro décadas com base em tecnologias externas, consolidou-se recentemente em empresas de porte internacional. À primeira vista, parecem existir vantagens comparativas para a participação brasileira na indústria do futuro baseada em MPR. Entretanto, essa indústria, ainda em construção, pode exigir um esforço tecnológico considerável. Como se caracteriza a dinâmica tecnológica dos desenvolvimentos em curso no mundo? Que políticas e estratégias de inovação podem preparar o país para disputar uma posição de destaque nessa área? Em que medida a atual vantagem competitiva em etanol pode ser mantida ao longo do tempo? Ou melhor, em que medida a vantagem competitiva em etanol pode

ser transferida para a indústria do futuro baseada em MPR e levar o país a ter uma posição proativa nessa indústria?

Essas questões trazem à tona um problema central: como realizar um planejamento tecnológico que possa servir de base para as políticas e estratégias de ciência, tecnologia e inovação adequadas à indústria do futuro? Diversos exercícios de planejamento têm sido usados para orientar a reflexão e a elaboração de estratégias em novas tecnologias. A construção de *Technology Roadmaps* é uma dessas ferramentas.^{1,2} Ao conectar mercados, produtos e tecnologias em relação ao tempo, essa ferramenta fornece um modo de identificar, avaliar e selecionar alternativas tecnológicas que podem ser usadas para responder aos problemas do presente e do futuro.³⁻⁷ A contribuição dos *roadmaps* às organizações, sejam elas empresas ou organismos governamentais, se dá principalmente pela orientação que propiciam ao monitoramento do ambiente e à avaliação e acompanhamento de tecnologias específicas. Incluem-se aqui as tecnologias de ruptura,⁸ que podem ter o potencial de redefinir uma indústria ou eventualmente de criar uma indústria inteiramente nova. Os *roadmaps* de tecnologias de ruptura⁹ podem ser particularmente úteis no cenário atual das indústrias química e de energia.

Nessa linha de pensamento, a Braskem realizou durante o ano de 2009 um processo de reflexão que congregou, ao lado dos departamentos da empresa, a universidade e instituições de pesquisa. Esse processo envolveu a elaboração de estudos, a realização de reuniões conjuntas e outras atividades interativas envolvendo as diversas instâncias mobilizadas. Um dos resultados foi a elaboração de um *roadmap* tecnológico para as MPR com base em metodologia própria adaptada das principais referências da literatura.^{5-7,10} O *roadmap* não representa a estratégia da Braskem mas, antes de tudo, pretende ser um documento de partida para discussão, a ser submetido aos diversos grupos de interesse envolvidos no futuro da tecnologia e da inovação no Brasil.

Este artigo apresenta o *roadmap* Matérias-Primas Renováveis (rMPR) desenvolvido sob a coordenação da Braskem e discute as

*e-mail: vitor@eq.ufrj.br

suas implicações tanto para as políticas científicas e tecnológicas quanto para as estratégias das empresas brasileiras interessadas em explorar oportunidades em MPR. O interesse principal deste trabalho é, portanto, a apresentação de um ponto de partida estruturado, de modo a facilitar a discussão sobre a posição estratégica que o país pretende ocupar no cenário futuro da indústria baseada em MPR. Esse ponto chama a atenção para o potencial brasileiro e, ao mesmo tempo, para os desafios envolvidos na mudança de base de matéria-prima na indústria química e a construção de vantagens competitivas no paradigma pós-petróleo.

O artigo está organizado em três seções, além desta introdução. Em seguida, o rMPR é apresentado e são destacados os resultados obtidos em termos de mercados, tecnologias e produtos identificados. Apresenta-se, a seguir, com base nas informações organizadas no rMPR, uma discussão dos pontos centrais que caracterizam a dinâmica da inovação em MPR. Na última seção, as considerações finais complementam a discussão, sublinhando as implicações do rMPR para a formulação de políticas e estratégias em MPR no Brasil, e apresentam as conclusões do artigo.

APRESENTAÇÃO DO ROADMAP DE MATÉRIAS-PRIMAS RENOVÁVEIS (RMPR)

O rMPR foi desenvolvido conforme metodologia própria. Por meio de discussões internas foram levantados os *drivers*, ou elementos direcionadores do mercado para a indústria baseada em MPR. A partir daí, iniciou-se o exercício de prospecção tecnológica. Esse exercício contou com a contribuição de um grupo da universidade com experiência em prospecção tecnológica e, também, com visão abrangente das indústrias de energia e química. O objetivo foi identificar os produtos e tecnologias relacionados às MPR que, nos horizontes de 5, 10 e 15 anos, poderiam vir a ser desenvolvidos. A identificação dos produtos e tecnologias partiu do documento elaborado pela universidade e foi complementada em discussões internas e em interação com o próprio grupo. As informações consolidadas nesse processo foram passadas à área de Inovação Tecnológica Corporativa da Braskem, que construiu então a primeira versão do rMPR.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam o rMPR. Descreve-se, em seguida, o conteúdo das principais informações utilizadas na sua construção.

O ponto de partida para a construção do rMPR é a identificação dos *drivers* que contribuem para a utilização crescente de MPR. Esses *drivers* representam os fatores de mercado e de sociedade que devem impulsionar e orientar o ritmo de introdução dos produtos e processos. São descritas as evoluções das tecnologias, o que permite a identificação de produtos e a análise de projetos importantes em andamento na utilização de MPR.

Diversos fatores podem ser vistos como determinantes do interesse crescente pelas MPR, entre os quais os de maior peso são: o potencial da biologia industrial ou *white biotechnology*, as restrições ambientais ao uso de matérias-primas fósseis,¹¹ a orientação das estratégias empresariais¹² e a perspectiva da inovação tecnológica como saída de crise.¹³

Evolução dos mercados

Crescimento esperado dos biocombustíveis

Os biocombustíveis hoje comercializados são o bioetanol e o biodiesel. O bioetanol é produzido, atualmente, por fermentação a partir de biomassa que contenha quantidades significativas de amido (milho, trigo e outros cereais) ou açúcares (cana, beterraba).

Projeta-se um crescimento da ordem 14% a.a. para os biocombustíveis líquidos nos próximos 5 anos, sendo o mercado atual da ordem de US\$ 26 bi.¹⁴ Para o mercado americano em particular,

existe uma previsão de incorporação de biocombustíveis avançados que corresponde a uma taxa anual média de crescimento da ordem de 10% para os próximos 20 anos.¹⁵

Crescimento esperado de bioprodutos e biopolímeros

De maior interesse para a identificação dos mercados futuros da chamada *white biotech* são os produtos químicos por fermentação e por processos enzimáticos. Esses dois grupos representam hoje um mercado estimado em US\$ 15 bi. Incluem-se aqui a introdução e o crescimento de novos biopolímeros e de produtos químicos convencionais a partir de rotas biológicas. Estima-se um potencial de crescimento anual de 8%.¹⁴

Os biopolímeros incluem os polímeros extraídos diretamente da biomassa (ex: derivados da celulose e do amido), produzidos diretamente de micro-organismos no seu estado natural ou modificados geneticamente (ex.: PHA, PHB), novos polímeros obtidos a partir de biointermediários (PLA, Green PET), plásticos biodegradáveis obtidos por aditivação de plásticos convencionais (Ecoflex, poliéster biodegradável da BASF) e plásticos convencionais produzidos a partir de MPR (biopolietileno).

Uma questão importante no crescimento relativo desses biopolímeros será a definição da qualidade ambiental desses produtos que venha a se estabelecer na sociedade. Se a definição se der com base na carga de gases de efeito estufa gerados, o espaço de biopolímeros convencionais a partir de fontes renováveis sustentáveis (ex: polietileno a partir de etanol de cana) pode crescer de forma significativa. Se, entretanto, prevalecer uma visão de contestação da utilização de plásticos pela visibilidade da poluição gerada, o segmento pode favorecer os ditos biodegradáveis, em particular os produtos como o PLA.

As estimativas do mercado atual de biopolímeros são, em razão das diferentes definições adotadas, bastante discrepantes. De modo geral, o mercado europeu encontra-se bem mais desenvolvido do que o americano. Destaque-se em particular o potencial de crescimento dos biopolímeros. No período 2003 a 2007 a capacidade de produção cresceu na faixa de 40% ao ano e o potencial técnico de substituição de plásticos petroquímicos por bioplásticos é estimado em 90%.¹⁶ Destaquem-se as elevadas taxas de crescimento dos bioplásticos biodegradáveis, como PLA e outros, que são atualmente da ordem de 17% ao ano.¹⁶

O potencial de crescimento dos bioplásticos é ainda refletido na evolução do mercado de embalagens. O segmento dito de embalagens sustentáveis tem crescimento esperado para os próximos anos na faixa de 25% a.a.

Evolução das tecnologias

Algumas tecnologias chave devem ser desenvolvidas e ultrapassar o presente estágio de piloto ou demonstração para que a utilização de biomassa para a produção de biocombustíveis e bioprodutos possa se tornar presente de fato. Na conversão da biomassa destacam-se duas rotas: bioquímica e termoquímica. Essas duas rotas podem ser vistas como em competição, não sendo claro no estágio atual se uma delas virá a dominar o mercado ou se ambas se desenvolverão de forma complementar.

Além do desenvolvimento das tecnologias de conversão, existem ainda desafios a serem superados nas tecnologias de suporte, principalmente no pré-tratamento das matérias-primas e na separação dos produtos de conversão (pós-tratamento). Restaria, finalmente, a integração dos processos numa unidade comercial otimizada segundo os princípios da engenharia química.

Rota bioquímica

Os principais projetos em desenvolvimento pela rota bioquímica estão voltados para a produção de etanol a partir de materiais ligno-

celulósicos. Existem diversas unidades piloto em operação e algumas unidades de demonstração. As unidades em escala comercial ainda estão em construção ou, na maioria dos casos, apenas como projetos anunciados.

A rota de conversão bioquímica possui duas etapas. A primeira está relacionada à quebra do material lignocelulósico em moléculas fermentáveis. Na segunda etapa, essas moléculas são convertidas no produto desejado por fermentação, usando micro-organismos modificados ou não geneticamente. A primeira etapa foi alvo de um esforço específico do DOE que financiou pesquisas com metas de redução do custo da celulase. No final dos anos 1990, Genencor e Novozymes receberam, cada uma, cerca de US\$ 15 milhões para reduzir em 10 vezes o custo das enzimas. Os objetivos foram atingidos e o custo da celulase ficou abaixo de 50 ¢. Atualmente encontra-se entre 20 e 50 ¢/gal de etanol, sendo necessária ainda uma redução a 3 a 4 ¢/gal para atingir a paridade com o etanol de milho americano.¹⁷ Ressalte-se que o salto realizado em relação aos valores dos anos 90 reduziu o custo de produção de etanol celulósico de uma faixa superior a 6 US\$/L para pouco menos de 1,5 US\$/L em 2005. Isso sugere o enorme potencial dos processos enzimáticos a partir de biomassa, considerando-se que existe ainda potencial de redução de custos na matéria-prima e logística de suprimento, no pré-tratamento e na integração dos subprocessos.

Citam-se ainda trabalhos de melhoramento genético de micro-organismos e o uso de novos micro-organismos visando ao aumento de produtividade e/ou geração de novos bioprodutos. São processos capazes de melhorar os processos de produção de etanol (transformação de celulose a etanol em única etapa) ou de gerar novos produtos como alcoóis com maior número de átomos de carbono (ex: butanol e outros) ou outros produtos (ex: isoprenoides a partir da cana-de-açúcar que têm características de diesel).

Cabem aqui comentários a respeito do uso de algas para captura de CO₂ e produção de biomassa, bio-óleo e produtos de alto valor agregado (spirulina, astaxantina, carotenos, etc.). Apesar do grande interesse que a utilização de algas para a produção de biocombustíveis e bioprodutos tem despertado, os problemas existentes são vistos ainda como importantes. O potencial é reconhecido: alto rendimento em óleo (60%), rápido crescimento, utilização de terras e recursos de baixo custo de oportunidade, não competição com alimentos e captura e uso de CO₂. Por isso, os investimentos têm sido expressivos. Entretanto, ainda é necessária melhor compreensão dos princípios de base para que a *scale-up* comercial seja viável. Considerações tanto de biologia quanto de engenharia são críticas e P&D fundamental e aplicado ainda parece necessário.¹⁸

Rotas termoquímicas: gaseificação/pirólise/reforma

A rota termoquímica está sendo abordada segundo 3 diferentes linhas: gaseificação, pirólise e “reforma catalítica”. A gaseificação da biomassa, a exemplo da gaseificação já conhecida de carvão e gás natural, visa a produção de gás de síntese e posterior conversão, em geral via reação de Fischer Tropsch (FT), em combustíveis líquidos (diesel, nafta, querosene) ou produtos químicos e outros energéticos (DME, metanol e outros). A pirólise visa a produção de um bio-óleo a partir da exposição rápida da biomassa a elevadas temperaturas. O bio-óleo é estabilizado e, em seguida, encaminhado para processamento nas refinarias de petróleo. A pirólise pode ainda resolver o problema de logística relacionado ao transporte da biomassa. A reforma utiliza processos catalíticos – portanto, não necessariamente térmicos – também para a obtenção de bio-óleo. Nesse caso, diferentemente da pirólise, o processo já elimina o oxigênio existente na biomassa, não requerendo processamento posterior, o que facilita o encaminhamento para as unidades de refino existentes. Tanto a pirólise quanto a reforma catalítica podem gerar o que costuma ser chamado de “nafta verde”.

São citadas como vantagens da rota termoquímica: a flexibilidade na utilização de diferentes tipos de matérias-primas, como resíduos diversos e lixo; a obtenção de combustíveis semelhantes aos derivados do petróleo; a experiência acumulada em gaseificação de carvão e outros fósseis; a flexibilidade do gás de síntese para produção de combustíveis e químicos e a possibilidade de integração com as unidades de refino existentes.

No caso da gaseificação, registre-se que algumas alternativas em desenvolvimento buscam uma solução para os inconvenientes da gaseificação tradicional. É o caso principalmente da gaseificação por plasma, cuja grande vantagem seria a produção de um gás de síntese limpo a partir de qualquer tipo de matéria-prima. Existem algumas plantas piloto em operação, mas problemas de engenharia ainda têm que ser resolvidos para tornar esta tecnologia viável.

Integração dos subprocessos, investimentos, custos e escalas das biorrefinarias

A obtenção de etanol de materiais lignocelulósicos pela via bioquímica contempla 8 subprocessos que devem ser desenvolvidos e integrados: pré-tratamento, fracionamento, produção de enzimas, hidrólise enzimática, fermentação das pentoses e hexoses, recuperação do etanol, recuperação da lignina e sua utilização e tratamento dos resíduos.¹⁹ Outros processos de conversão pela rota bioquímica devem considerar o uso de um ou mais desses subprocessos. Ocorre que alguns deles devem ser ainda desenvolvidos para atingir o estágio comercial, o que representa uma barreira importante para a concepção de projetos com custos de investimento e de operação dentro das faixas ideais.

As estimativas do custo do investimento para produção de etanol celulósico são muito variadas e dependem da matéria-prima e do tipo de pré-tratamento. Segundo *IEA Bioenergy*,¹⁹ os valores atuais oscilam entre US\$ 0,88/L e US\$ 1,20/L de capacidade, dependendo do tipo de pré-tratamento e da escala de produção considerada. Nas condições “ideais”, o custo de investimento deveria ser da ordem de US\$ 0,66/L para uma escala de 245 milhões de litros de etanol/ano.

A meta de custo para o etanol celulósico americano, indicada pelo DOE, é de atingir em 2012 um custo de produção de cerca de 0,28 US\$/L. Essa meta parece de difícil alcance, segundo *IEA Bioenergy*.¹⁹

Na busca de redução de custos, uma trajetória clássica na indústria química é a de aumento das escalas das plantas. A busca de uma trajetória de ganhos de escala está claramente explicitada no planejamento tecnológico americano. Almeja-se que as escalas médias se tornem cinco vezes maiores entre 2010 e 2030, o que vai exigir um considerável esforço de engenharia.¹⁵ O investimento nas biorrefinarias é capital intensivo. Estima-se que o investimento para uma biorrefinaria processando 4.000 t/d de milho (2.000 t de grão e 2.000 t de forragem) seja atualmente da ordem de US\$ 450 milhões.²⁰

Produtos

Os produtos com potencial de produção são, a seguir, apresentados nos horizontes de curto (2010-2014), médio (2014-2019) e longo prazo (após 2019). No curto prazo (Figura 1), encontram-se os produtos já com anúncio de produção comercial pelas empresas.

As patentes depositadas nos últimos 5 anos definem os produtos com produção potencial em médio prazo, entre 2014 e 2019 (Figura 2 a e b). Por fim, os produtos em estudos em universidades e centros de pesquisa foram identificados a partir da literatura científica e considerados em longo prazo (Figura 3) para depois de 2019. As discussões nos *workshops* de elaboração do rMPR levaram a alguns ajustes pontuais nos critérios acima.

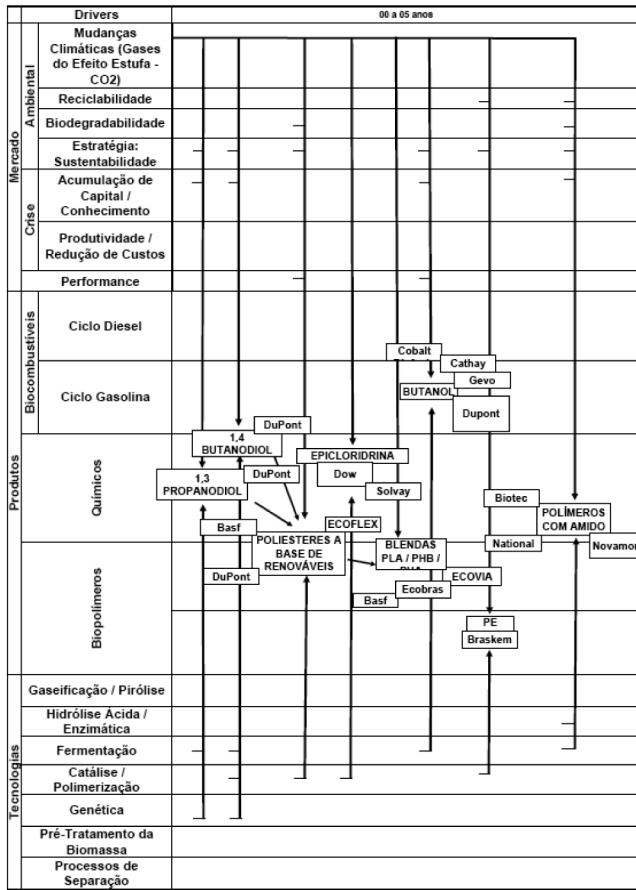


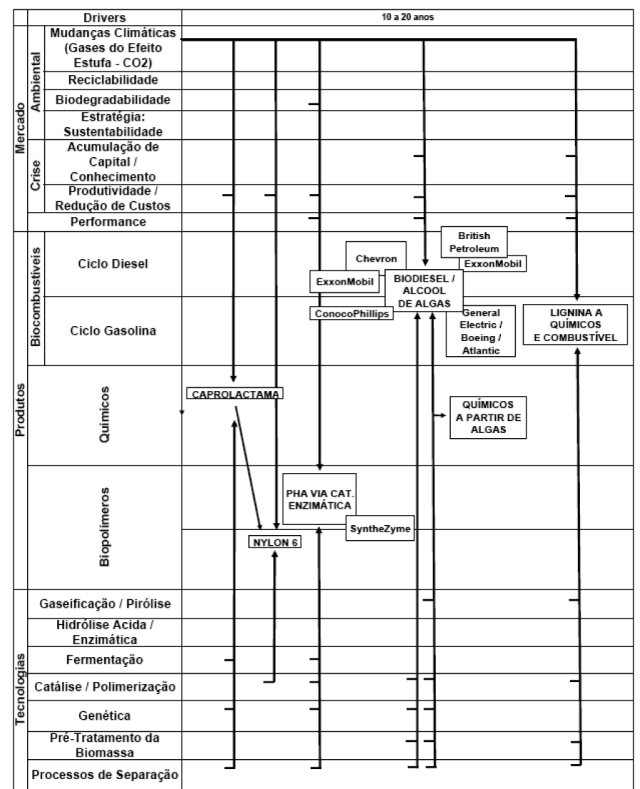
Figura 1. Roadmap tecnológico de matérias-primas renováveis - curto prazo

Período 2010-2014

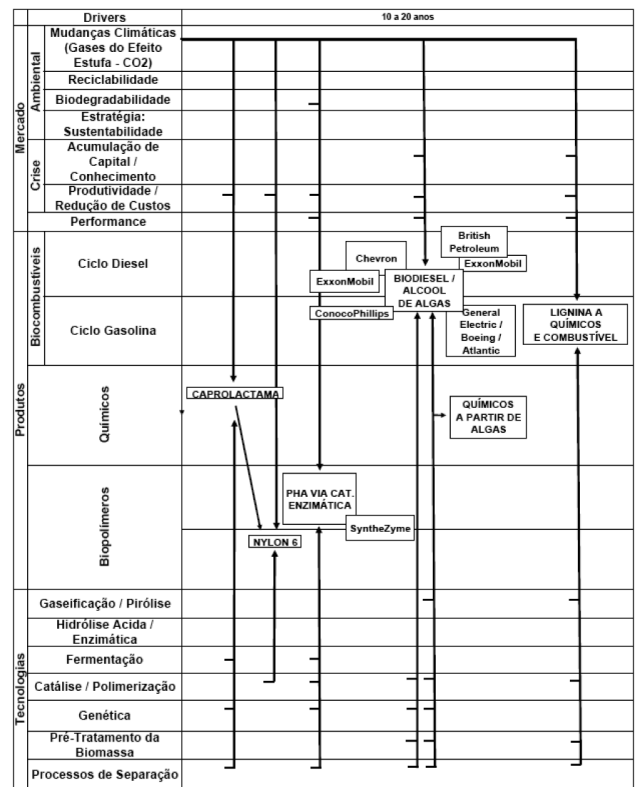
No período, devem ser consolidados os investimentos na área. Os poliésteres da Du Pont, que utilizam propanodiol e butanodiol de fontes renováveis, deverão ganhar mercado. As boas características do butanol, como combustível e como intermediário químico, têm trazido alguma atenção para o desenvolvimento de processos de produção do biobutanol. Alguns projetos estão em andamento, destacando-se o da Butamax (Du Pont/BP) e o da Gevo. Considera-se a possibilidade de produção comercial em curto prazo. As apostas da Du Pont no biobutanol têm sido respaldadas por uma base de patentes, sendo 12 nos 2 últimos anos. Citam-se ainda outras iniciativas para a produção de biobutanol: *Cathy* (China) e *Usina Paraíso* (Brasil) a partir de açúcares, *Cobalt Biofuels* (EUA) e *Green Biologics* (Reino Unido), que utilizam a biotecnologia moderna em seus processos. Uma estratégia que pode facilitar o desenvolvimento da produção é a adaptação de unidades de produção de etanol, o que reduz consideravelmente o custo do investimento.

BASF deve aumentar os investimentos na comercialização de seus plásticos biodegradáveis e compostáveis. A empresa tem trabalhado com blendas biodegradáveis, combinando biopolímeros com polímeros convencionais para obter as propriedades desejadas. BASF tende a incorporar MPR em seus processos. Solvay e Dow estão anunciando plantas para produção de epícloridrina a partir de glicerina. Braskem deverá iniciar ainda em 2010 a produção de biopolietileno a partir de etanol. Dow tem projeto semelhante.

Um produto com perspectivas de crescimento expressivo no período é o PLA. As dificuldades para maior difusão desse plástico estão em limitações nas propriedades e o alto custo de produção. O produto concorre principalmente com o PET e o poliestireno. *Natureworks* (Cargill) é a principal produtora. *Teijin* e *Purac* estão também



A



B

Figura 2. Roadmap tecnológico de matérias-primas renováveis : (a) médio prazo; (b) médio prazo - continuação

interessadas no desenvolvimento do mercado e procuram alternativas de aplicações e de tecnologias de produção. Existem esforços em

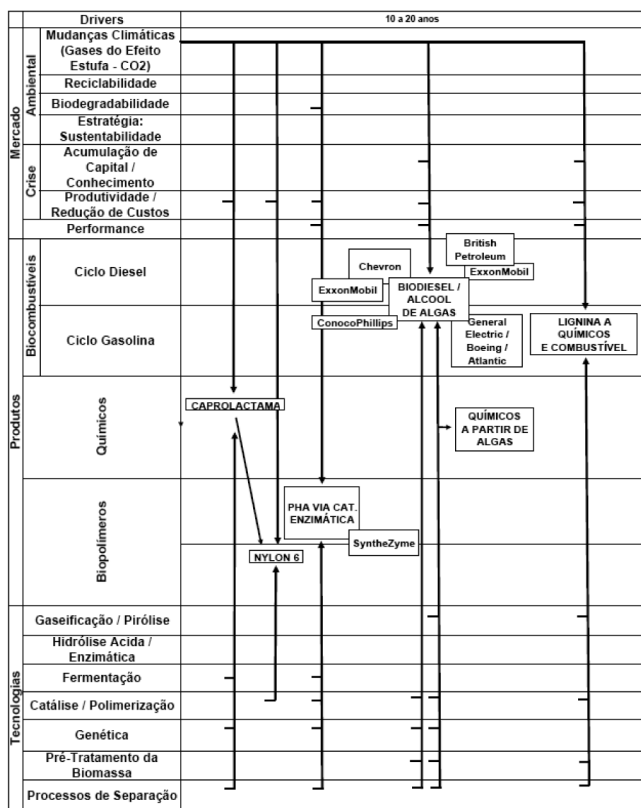


Figura 3. Roadmap tecnológico de matérias-primas renováveis - longo prazo

curso buscando melhores propriedades e processos de produção mais simples, de forma a tornar o PLA mais competitivo no mercado.

Dois outros biopolímeros – PHA e PHB – estão em início de comercialização. A Metabolix, empresa de biotecnologia americana, em associação com a ADM (Telles) anunciou planta de 50.000 t/a para produção de PHA, para operação no final de 2009. PHA e PHB (Biocycle – empresa brasileira) são polímeros obtidos diretamente de micro-organismos e já produzidos comercialmente. Custos associados a dificuldades no controle do processo de produção e propriedades inadequadas respondem pela baixa penetração no mercado.

Cargill e Dow estão trabalhando no desenvolvimento e colocação no mercado de polióis verdes baseados em óleos vegetais e utilizados para a confecção de poliuretanos. Myriant está desenvolvendo a produção de ácido succínico.

Período 2015-2019

Assume-se, com base nos investimentos anunciados e no estágio atual da tecnologia, que o processo de obtenção de etanol a partir de celulose estará disponível no período entre 2015 e 2019. Com apoio do DOE, alguns projetos americanos são anunciados em escala comercial para o período: Abengoa, Iogen, Poet, pela via bioquímica, e Range Fuels, pela via termoquímica, entre outros. Alguns desses projetos têm previsão inicial de operação antes de 2015, mas dificuldades tecnológicas e de custo ainda existentes justificam que se considere o amadurecimento do etanol celulósico apenas em médio prazo. Petrobras está finalizando o projeto básico para uma planta piloto para produção de etanol a partir do bagaço de cana.

Na produção de etanol celulósico tem merecido destaque o processo combinado termo-bioquímico (gaseificação + fermentação do gás de síntese) da Coskata. Uma unidade de demonstração está operando e anuncia-se a construção de unidade comercial nos EUA. INEOS teria desenvolvido tecnologia similar e também anuncia plantas comerciais em médio prazo.

Outra tecnologia que deverá estar disponível nesse período é a de produção de hidrocarbonetos superiores (na faixa da gasolina e diesel) a partir de MPR. Na rota bioquímica pode ser citada a tecnologia da Amyris para produção de isoprenoides a partir de açúcares (fermentação) que possui planta piloto operando no Brasil. Outros projetos com objetivos semelhantes, utilizando outros conceitos têm surgido: LS9, Virent e KIOR. O grande ponto de atração desses projetos é a qualidade dos combustíveis produzidos que são substitutos “perfeitos” dos derivados do petróleo, o que os tornaria superiores ao etanol. Além de serem utilizados diretamente, sem necessidade de qualquer adaptação nos motores, não demandam também a construção de infraestrutura dedicada de transporte e distribuição.

O hidroximetilfurfural (HMF) é visto como um dos mais promissores compostos derivados de biomassa em razão do seu potencial como plataforma para novos produtos químicos e polímeros, além de combustíveis. Existe um fluxo importante de publicações científicas explorando a produção do HMF a partir da glicose e frutose e, mais recentemente, a partir da celulose. A simplicidade da transformação química da lignocelulose em HMF contrasta com a complexidade da rota bioquímica, o que parece estar atraindo uma atenção crescente para o HMF. Entretanto, ainda são poucas as iniciativas de projetos voltados para sua produção e comercialização. Notem-se as iniciativas da empresa holandesa Avantium, que parece ter uma base efetiva de expertise na tecnologia de furânicos. Avantium têm procurado estabelecer alianças para complementar sua expertise tecnológica. Registram-se alianças com *Royal Cosun* para apoio na seleção e isolamento de matérias-primas provenientes de resíduos agrícolas e com *Natureworks* (Cargill) para apoio no desenvolvimento de mercados e aplicações da linha de biopolímeros furânicos que a Avantium pretende produzir.

Período 2019-2030

Acredita-se que a produção em maior escala de biocombustíveis e bioprodutos a partir de algas somente venha a ocorrer comercialmente após 2019. Existem ainda desafios a serem vencidos nas áreas de genética e engenharia. Em médio prazo, devem surgir apenas alguns projetos pioneiros voltados para produtos especiais ou atraídos pelo abatimento de CO₂.

A obtenção de caprolactama via processos fermentativos poderá levar à produção competitiva de um nylon 6 verde.

A disponibilidade de lignina em decorrência dos processos de utilização da celulose deve gerar um interesse crescente no seu aproveitamento. Alguns produtos potenciais foram identificados e destacados por Holladay *et al.*:²¹ aditivos para combustíveis, produção de corrente de benzênicos BTX (que poderia ser tratada em unidades hoje disponíveis em centrais e refinarias petroquímicas), obtenção de fenóis e resinas fenólicas e produção de fibra de carbono. Vislumbra-se a produção de uma fibra de carbono de baixo custo que poderia encontrar grande mercado na indústria automobilística.

DINÂMICA DA INOVAÇÃO EM BIOCMBUSTÍVEIS, BIOPRODUTOS E BIORREFINO

As informações levantadas e processadas na seção anterior propiciam uma discussão da dinâmica do processo de inovação que se desenrola na construção da indústria baseada em MPR. Apresenta-se a seguir uma síntese dessa discussão.

No presente estágio de desenvolvimento das tecnologias não é possível antecipar as inovações que vão ser efetivamente adotadas no mercado de combustíveis e de bioprodutos. Trata-se de um processo voltado para a geração de variedades que, dentro da dinâmica da inovação, serão selecionadas ao longo do tempo e contribuirão para a construção da indústria baseada em biomassa do futuro. Os

projetos em desenvolvimento se voltam para a busca de melhores produtos, melhores processos e melhores matérias-primas (de preços mais baixos e estáveis, e de fácil disponibilidade) para a produção de biocombustíveis que possam superar as limitações atuais da indústria e de bioprodutos que possam se apresentar como alternativas aos produtos de base fóssil.

Alguns pontos devem ser destacados. O primeiro refere-se à quantidade e diversidade das alternativas propostas, o que sugere que a tecnologia se encontra na fase fluida. Não foram ainda definidos os processos e produtos que vão ocupar a maior parcela do mercado.

No que se refere à natureza das inovações, devem ser observados os aspectos relacionados às matérias-primas, aos processos e produtos.

Quanto às matérias-primas, os esforços se concentram na melhoria da produtividade de matérias-primas de diversos tipos utilizando conhecimentos de biotecnologia e engenharia genética. São desenvolvidas pesquisas em matérias-primas já consagradas, como a cana-de-açúcar, e em matérias-primas ainda não utilizadas largamente pela indústria, como os materiais celulósicos, as algas e novas plantas. Novos modelos de negócios utilizando o lixo como matéria-prima têm sido testados.²²

A análise das inovações de processo mostra, em primeiro lugar, uma amplitude de técnicas em desenvolvimento, utilizando diversas bases de conhecimento (fermentação, processos enzimáticos, catálise, engenharia genética, gaseificação, síntese química). A variedade de processos aponta ainda para a presença de empresas com *backgrounds* variados de conhecimento e que tradicionalmente não estavam presentes nos mercados de energia e de química. É o caso das empresas de biotecnologia, algumas com histórico de desenvolvimentos importantes em outras indústrias, como a farmacêutica.

A indústria de combustíveis líquidos costuma ter sua atenção voltada para as inovações de processo. Nessa linha, boa parte dos esforços está voltada para se desenvolver novos processos para a produção de combustíveis já conhecidos e utilizados, como o etanol. Mas o estágio atual da indústria vislumbra oportunidades de introduzir novos produtos, de origem renovável, que se aproximem da condição de combustíveis ideais e de outros bioprodutos que possam competir com produtos químicos de base fóssil.

Deve ser ainda mencionada a crescente importância do conceito de biorrefinaria. Esse conceito sugere que a exploração das MPR precisa integrar uma visão multiproduto, explorando diversas correntes e processos, à semelhança das refinarias de petróleo. No caso da biorrefinaria, os produtos energéticos aparecem ao lado de produtos químicos.

É interessante observar as empresas envolvidas e a variedade de abordagens estratégicas. Destacam-se as empresas que contribuem com o seu conhecimento tecnológico de base: empresas de biotecnologia em primeiro lugar, outras empresas de base tecnológica, empresas de química (Du Pont) e de enzimas (Novozyme, Genencor). Outro grupo importante é o das empresas detentoras de ativos complementares estratégicos (operação em escala, distribuição, comercialização, utilização): as empresas de petróleo, as montadoras e as empresas agroindustriais são os principais exemplos.

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um *roadmap* sobre matérias-primas renováveis (rMPR) desenvolvido pela Braskem e discutiu o seu conteúdo e implicações. O rMPR é visto como um exercício inicial cujo resultado é aberto às discussões e contribuições dentro da empresa e no ambiente externo dos grupos de interesse. O presente artigo cumpre parte desse propósito ao apresentar o processo de construção do rMPR, divulgar e discutir a sua versão inicial.

O objetivo central do rMPR é de ser um documento aberto para discussão do uso de matérias-primas renováveis nas indústrias de energia e química. Espera-se que, a partir de uma visão da indústria no mundo, o documento possa evoluir e representar uma base para a elaboração de políticas de ciência, tecnologia e inovação para a indústria baseada em MPR no Brasil.

Quanto ao conteúdo em si do rMPR, cabe destacar que o seu ponto central é a percepção de que a utilização de biomassas para a produção de biocombustíveis e de bioprodutos deve crescer e ter peso significativo na economia. Os biocombustíveis são o *driver* principal desse mercado e deverão definir os volumes demandados, mas o conceito em construção e que abre um grande número de oportunidades é o de aproveitamento integrado das biomassas para a geração de combustíveis, produtos químicos e eletricidade.

É notável a multiplicidade de rotas e soluções tecnológicas em desenvolvimento e que, de certa forma, estão em competição como candidatas a soluções vencedoras do processo de desenvolvimento e difusão das inovações. Destaque-se o impulso que a chamada *white biotech* começa a ter, mas alternativas como as rotas termoquímicas ou químicas estão presentes como opções tecnológicas possíveis; sem falar da combinação entre essas rotas. Uma grande atenção aos indicadores de evolução de mercados (apostas, comprometermos, marcos regulatórios) e às indicações de amadurecimento e aprendizado das alternativas tecnológicas deve ser desenvolvida tanto pelas empresas quanto pelas agências governamentais responsáveis pelas políticas de fomento ao setor.

Na atual fase da indústria, algumas características das iniciativas das empresas e agências governamentais devem ser enfatizadas. Do ponto de vista das agências, destaque-se o peso que tiveram e continuam tendo, em particular as ligadas à energia nos EUA (DOE, NREL, entre outros), na definição de agendas claras de pesquisa, muitas vezes com metas de desempenho a serem atingidas e alocação de recursos para os empreendimentos. Do ponto de vista das empresas, dois pontos são marcantes. O primeiro é a presença constante de associações em que se busca valorizar a complementaridade das competências. A segunda é a presença de novos *players* – a maioria com origem na biotecnologia e no *agribusiness* – que tomam iniciativas nos mercados de energia e de química. Na atual etapa da indústria, esses novos *players* têm convivido com as tradicionais empresas de energia e química, em associação com elas ou não. Somente o amadurecimento da indústria indicará se novos competidores efetivamente surgirão ou se a base tecnológica trazida pelas novas empresas será absorvida pelos *players* estabelecidos em energia e química, apoiados em seus ativos complementares.

Finalmente, cabe destacar que a mudança de base de matéria-prima na indústria química (ou pelo menos o aumento significativo da importância de uma nova base de matéria-prima) é uma oportunidade histórica rara que empresas e países podem ter para modificar em seu favor as posições de liderança na indústria. Nessa direção, os indispensáveis esforços tecnológicos se associam à capacidade de perceber e influenciar as mudanças na organização da indústria e na estrutura produtiva.

A posição brasileira parece, portanto, viver um momento de definição. A indústria sucroalcooleira brasileira apresenta hoje um alto grau de desenvolvimento tecnológico, o que leva o país a ter uma grande vantagem competitiva. O cenário apresentado acima leva a crer que as tecnologias de aproveitamento da biomassa deverão dar um salto nos próximos anos. A questão que se impõe é: conseguiremos acompanhar este processo? Serão as vantagens competitivas da indústria baseada em matérias-primas renováveis da mesma natureza das que detêm hoje a indústria brasileira? O *roadmap* apresentado sugere uma sofisticação e uma maior complexidade dessa base tecnológica.

No que se refere especificamente às políticas de ciência, tecnologia e inovação voltadas para as matérias-primas renováveis no Brasil, é importante sublinhar que o cenário descrito pelo rMPR apresenta uma indústria baseada em MPR em grande dinamismo e evolução. Essa indústria tende a ser no futuro notavelmente diferente da que conhecemos hoje, baseando-se em tecnologias proprietárias e mais sofisticadas e complexas se comparadas às de primeira geração atualmente utilizadas. Assim, as políticas brasileiras precisam ter como balizamento a construção de uma posição de liderança na indústria do futuro e não se limitar à defesa de posições atuais. Nossas vantagens comparativas – matéria-prima, produção competitiva em escala, mercado de biocombustíveis, entre outras – são admiráveis mas não se transferem automaticamente em vantagens competitivas na indústria do futuro que se apoia em novos fatores de competitividade.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Além da seção “Nota metodológica: Roadmaps tecnológicos e a construção do rMPR”, são apresentadas extensões das seguintes seções que foram desenvolvidas de forma sucinta no texto do artigo: “Drivers para a utilização crescente de MPR”, “Evolução dos mercados” e “Dinâmica da Inovação em Biocombustíveis, Bioprodutos e Biorrefino”. Está disponível em <http://quimicanova.s bq.org.br>, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

REFERÊNCIAS

1. Willyard, C.; McLees, C.; *Res. Manage.* **1987**, Sep/Oct, 13.
2. Phaal, R.; Farrukh, C.; Probert D.; *Technol. Forecast. Soc. Change* **2004**, 67, 5.
3. Yasunaga, Y.; Watanabe, M.; Korenaga, M.; *Technol. Forecast. Soc. Change* **2009**, 76, 61.
4. Phaal, R.; (2009) Public-domain roadmaps, http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/ctm/trm/documents/published_roadmaps7_6_09.pdf, acessada em Fevereiro 2011.
5. Albright, R.; Kappel, T.; *Res. Technol. Manag.* **2003**, 46, 31.
6. Grossman, D.; *Res. Technol. Manag.* **2004**, 47, 41.
7. Phaal, R.; Muller, G.; *Technol. Forecast. Soc. Change* **2009**, 76, 39.
8. Christensen, C.; *Innovator's dilemma*, 1st ed., HBS Press: Boston, 1997.
9. Kostoff, R.; Boylanb, R.; Simons, G.; *Technol. Forecast. Soc. Change* **2004**, 71, 141.
10. Phaal, R.; Farrukh, C.; Probert, D.; *Res. Technol. Manag.* **2004**, 47, 26.
11. Liska, A. J.; Yang, H. S.; Bremer, V. R.; Klopfenstein, T. J.; Walters, D. T.; Erickson, K. G.; Cassman, K. G.; *J. Ind. Ecol.* **2009**, 13, 58; UNEP - United Nations Environmental Program, *Towards sustainable production and use of resources: assessing biofuels*, 2009, http://www.unep.fr/scp/rpanel/pdf/Assessing_Biofuels_Full_Report.pdf, acessada em Fevereiro 2011.
12. West, J.; E. I. Du Pont de Nemours and Company (A), case n.9-699-037, Harvard Business School Press: Boston, 1999; Holliday, C.; *Harvard Bus. Rev.* **2001**, 79, 129.
13. DOE Biomass program; www1.eere.energy.gov/biomass, acessada em Fevereiro 2010.
14. Riese J.; *White biotechnology*, http://www.dsm.com/en_US/downloads/sustainability/white_biotech_mckinsey_feb_2009.pdf, acessada em Fevereiro 2011.
15. Roadmap for bioenergy and biobased products in the United States BRDI, http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/obp_roadmapv2_web.pdf, acessada em Fevereiro 2011.
16. Shen, L.; Worrel, E.; Patel, M.; *Biofuels, Bioprod. Bioref.* **2010**, 4, 25.
17. Wilson, D. B.; *Curr. Opin. Biotechnol.* **2009**, 20, 295.
18. Darzins, A.; Garofalo, R.; *Biofuels, Bioprod. Bioref.* **2009**, 3, 426.
19. IEA Bioenergy; *From 1st to 2nd generation biofuel technologies*, OECD: Paris, 2008.
20. Bohlman, G. M.; *Chem. Eng. Prog.* **2005**, 101, 37.
21. Holladay J. E.; White J. F.; Bozell J. J.; Johnson D.; Pacific Northwest National Laboratory, 2007, http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16983.pdf, acessada em Fevereiro 2011.
22. McBride E.; *A special report on waste, The Economist* **2009**, 26th Feb.