



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Instituto de Geociências

GUILHERME DE OLIVEIRA MARQUES

CAPACIDADES DINÂMICAS COMO INSTRUMENTO DE ADAPTAÇÃO E
SOBREVIVÊNCIA PARA EMPRESAS DE BASE TECNOLÓGICA: EVIDÊNCIAS DA
BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL

CAMPINAS
2019

GUILHERME DE OLIVEIRA MARQUES

CAPACIDADES DINÂMICAS COMO INSTRUMENTO DE ADAPTAÇÃO E
SOBREVIVÊNCIA PARA EMPRESAS DE BASE TECNOLÓGICA: EVIDÊNCIAS DA
BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL

TESE APRESENTADA AO INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR
EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBLES REIS DE QUEIROZ

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO GUILHERME DE
OLIVEIRA MARQUES E ORIENTADA PELO PROF. DR.
SÉRGIO ROBLES REIS DE QUEIROZ

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

M348c Marques, Guilherme de Oliveira, 1984-
Capacidades dinâmicas como instrumento de adaptação e sobrevivência para empresas de base tecnológica (EBTs) : evidências da biotecnologia digital / Guilherme de Oliveira Marques. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Sérgio Robles Reis de Queiroz.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Inovação tecnológica - Aspectos econômicos. 2. Industrialização - Economia. 3. Empresas novas - Estudo de casos. 4. Biotecnologia - Aspectos econômicos. I. Queiroz, Sérgio Robles Reis de, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Dynamic capabilities as a toll to adaptation and survival for technology-based companies : evidences from industrial biotechnology

Palavras-chave em inglês:

Technological innovation - Economic aspects

Industrialization - economy

New business enterprises - Case studies

Biotechnology - Economic aspects

Área de concentração: Política Científica e Tecnológica

Titulação: Doutor em Política Científica e Tecnológica

Banca examinadora:

Sérgio Robles Reis de Queiroz [Orientador]

Sérgio Luiz Monteiro Salles-Filho

José Vitor Bomtempo Martins

Pedro Wongtschowski

José Maria Ferreira Jardim da Silveira

Data de defesa: 19-12-2019

Programa de Pós-Graduação: Política Científica e Tecnológica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <http://orcid.org/0000-0003-0797-3094>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5663454122472203>



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AUTOR: Guilherme de Oliveira Marques

**CAPACIDADES DINÂMICAS COMO INSTRUMENTO DE ADAPTAÇÃO E
SOBREVIVÊNCIA PARA EMPRESAS DE BASE TECNOLÓGICA: EVIDÊNCIAS DA
BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sérgio Robles Reis de Queiroz

Aprovado em: 19 / 12 / 2019

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Sérgio Robles Reis de Queiroz - Presidente

Prof. Dr. Sérgio Luiz Monteiro Salles Filho

Prof. Dr. José Maria Ferreira Jardim da Silveira

Prof. Dr. José Vitor Bomtempo Martins

Dr. Pedro Wongtschowski

**A Ata de defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se disponível no
SIGA - Sistema de Fluxo de Tese e na Secretaria de Pós-graduação do IG.**

Campinas, 19 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Time is a device which prevents everything from happening at once (Paul Davison, 1991, pp. 130)

We are in a world where beliefs, strategies, and actions of agents are being “tested” for survival within situation or outcome or “ecology” that these beliefs, strategies and actions together create (Brian Arthur, 2015, pp. 7).

Agradeço, primeiramente, ao pessoal da secretaria de pós-graduação do IG, pelo apoio e pela solicitude ao longo dos últimos anos;

Agradeço aos companheiros do Grupo de Estudos em Economia Industrial (GEEIN) da FCLAr – UNESP. Agradeço, especialmente, ao João Furtado e ao Eduardo Urias, pelas contribuições fundamentais para este trabalho e, de modo geral, para minha formação;

Agradeço aos colegas e pesquisadores do DPCT que, de alguma forma, contribuíram para os resultados desta tese, e estendo este agradecimento aos demais membros das minhas bancas de qualificação e defesa. Agradeço especialmente ao Sérgio Queiroz, por acompanhar-me ao longo da jornada;

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido, na modalidade Bolsa de Doutorado (processo número 140209/2013-1);

Agradeço às pessoas que cederam entrevistas para a elaboração deste trabalho; e

Agradeço, por fim, à Ana Luiza e ao Joaquim, pela paciência e pelo carinho.

RESUMO

O aquecimento global e a perspectiva do esgotamento de fontes de recursos fósseis no longo prazo colocam sérios desafios à humanidade. Em decorrência desta conjuntura, torna-se fundamental a criação de métodos de produção ambientalmente mais seguros, baseados em recursos renováveis, que assegurem a manutenção de adequadas condições de vida em nosso planeta. O desenvolvimento da produção de biocombustíveis e bioprodutos de geração avançada através da biotecnologia industrial pode constituir uma parte importante da resposta a estes desafios, uma vez que estas tecnologias apresentam vantagens ambientais (e, em alguns casos, econômicas) em relação à contraparte fóssil. Por este motivo, no mundo todo, agentes públicos e privados têm dedicado esforços para a implementação e consolidação dessa indústria. No entanto, a produção destes bens, em especial de biocombustíveis avançados, tem se desenvolvido a um ritmo muito mais lento do que era esperado, em diferentes países, por diferentes razões. Os obstáculos que por hora obliteram o desenvolvimento da indústria de renováveis avançados, e os esforços dedicados a supera-los, têm feito com que a biotecnologia industrial tenha assumido trajetórias tecnológicas muito diferentes daquelas que eram esperadas em suas fases mais incipientes de desenvolvimento por experts, analistas e investidores. Em especial, há um movimento de migração da produção de biocombustíveis e commodities químicas para o desenvolvimento da produção de especialidades químicas e outros produtos especiais, que possuem relativamente um maior valor agregado e são produzidos em escalas comparativamente muito inferiores. Este trabalho tem como principal objetivo a demonstração de que esta *pivotagem*, quando realizada por empresas de base tecnológica (EBTs), frequentemente está apoiada na construção e na incorporação de novas competências organizacionais e, em especial, de capacidades dinâmicas. Com isso, a presente tese é uma contribuição ao debate sobre os fatores que se relacionam à sobrevivência de firmas cuja existência está apoiada no desenvolvimento de tecnologias revolucionárias, em um ambiente dinâmico e desafiador no qual predomina forte incerteza, como é o da biotecnologia industrial.

Palavras-chave: *transições tecnológicas; empresas de base tecnológica (EBTs); competências organizacionais; capacidades dinâmicas; biotecnologia industrial.*

ABSTRACT

Climate change and the prospect of the depletion fossil resources sources in the long term pose serious challenges to humanity. It is essential to create environmentally safe production methods, based on renewable resources, which ensure sustainable living conditions in our planet. The production of innovative biofuels and advanced generation bioproducts through industrial biotechnology can be an important contribution to address these challenges. These technologies have environmental (and, in some cases, economic) advantages over the fossil-based counterparts. For this reason, worldwide, public and private agents have dedicated efforts to the implementation and consolidation of biobased industries. However, the production of advanced renewable products, in particular advanced biofuels, has been developing at a much slower pace than expected. The obstacles currently hindering the development of these biobased industries, and the efforts to overcoming them, have led industrial biotechnology to take technological trajectories very different from those expected by analysts, investors and other experts in the early stages of its development. In particular, there is a movement of migration from the production of biofuels and chemical commodities to the production of chemical specialties and other special products, which have a relatively greater added value and are produced at comparatively much lower scales. This research has as its main objective the demonstration that this change in trajectory is often supported by the construction and incorporation of new organizational skills and, in particular, dynamic capabilities. Thus, the present thesis contributes to the debate on the drivers of survival start-ups developing revolutionary technologies, in a dynamic and challenging environment in which strong uncertainty prevails, such as the case of industrial biotechnology.

Key words: *technological transitions; technology-based firms; organizational capabilities; dynamic capabilities; industrial biotechnology*

Sumário

Introdução	10
Capítulo 1. Competências e aprendizado organizacional	21
1.1 Teoria Econômica Evolucionária: rotinas, busca e seleção	21
1.2 Paradigmas tecnológicos e trajetórias tecnológicas	23
1.3 Ambiente e mecanismos de seleção	26
1.4 Competências e aprendizado organizacional	28
Capítulo 2. A biotecnologia industrial como revolução tecnológica de base renovável	46
2.1 Introdução	46
2.2 Dinâmica tecnológica da indústria química em perspectiva histórica	48
2.3 A indústria química e a questão ambiental	52
2.4 Trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial	60
2.5 Desafios colocados à consolidação da biotecnologia industrial	81
2.5.1 Desafios de âmbito tecnológico	82
2.5.2 Desafios referentes aos mercados de insumos fósseis e seus derivados	85
2.6 Capacidades dinâmicas como instrumento da <i>pivotagem</i> na biotecnologia industrial	89
Capítulo 3. Resultados empíricos de pesquisa: estudos de caso e entrevistas	92
3.1 Estudo de caso de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial	93
3.1.1 Empresas manufatureiras	93
Amyris	93
Cool Planet (ex-CoolPlanetBiofuels)	104
Terravia (ex-Solazyme)	109
3.1.2 Firms licenciadoras de tecnologias ou prestadoras de serviços tecnológicos avançados	114
Genomatica	114
Arzeda	118
Ginkgo Bioworks	121
Zymergen	123
3.2 Entrevistas	125
3.3 Análise dos estudos de caso e das entrevistas	129
3.3.1 Análise dos estudos de caso de empresas de base tecnológica	129
3.3.2 Análise das entrevistas	133
a. Trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial	134
b. Desafios colocados ao desenvolvimento da biotecnologia industrial	136
c. Competências relacionadas à pivotagem de biocombustíveis e commodities para especialidades e produtos especiais	142
<i>c1. Competências relacionadas à ciência & tecnologia</i>	145

<i>c2. Competências de outra natureza</i>	147
Conclusões	149
Referências Bibliográficas	156
Anexo 1. Banco de projetos da biotecnologia industrial	181

Introdução

“A robust second-generation biofuels industry based on inedible cellulosic biomass available as wood, grass, and various wastes was widely expected to be in place by now. Anticipated benefits include climate change mitigation and rural economic development while avoiding the limitations of first-generation biofuels. Progress has been made but at a much slower pace than expected. It is important to understand why. The experience of the past decade and the need for low-cost technology in a world of low oil prices necessitates a strategic reset for biofuels as part of a 'grand challenge' renewables strategy”.

Lynd, Lee. The grand challenge of cellulosic biofuels. Why cellulosic biofuels have fallen short of expectations and what we can do about it. *Nature Biotechnology*. Volume 35, Number 10, October 2017.

Na literatura econômica de tradição schumpeteriana, em especial dentre os autores da chamada teoria econômica evolucionária ou evolucionista (Nelson & Winter, 1982; Freeman & Soete, 1974; Rosenberg, 1982; Dosi, 1988), há um notável interesse pelo estudo do porquê, em uma transição tecnológica, alguns empreendimentos inovativos prosperam enquanto outros, concorrentes, sucumbem no avanço das ondas de ‘destruição criativa’, embora muitas vezes estes sejam parecidos com aqueles (em termos do desenho organizacional, da estrutura ou da base de conhecimentos utilizada).

Há três dimensões centrais para a compreensão do sucesso (ou do fracasso) de um empreendimento baseado no desenvolvimento de uma nova e revolucionária tecnologia: o processo, o contexto e os resultados. Embora nosso conhecimento sobre a atividade empreendedora (no sentido schumpeteriano da palavra) tenha crescido vertiginosamente nas últimas décadas, resta-nos ainda muito a aprender sobre como os processos (ou as estratégias) interagem com o contexto (o ambiente) de modo a moldar os resultados de esforços inovativos (Aldrich & Martinez, 2007; Low and MacMillan, 1988).

A presente tese, *lato sensu*, é fruto de uma trajetória acadêmica e profissional que se iniciou em 2007, ano no qual ingressei no Grupo de Estudos em Economia Industrial (GEEIN), na UNESP em Araraquara (SP). Os anos de estudo e de reflexão

dedicados à economia da ciência, da tecnologia e da inovação, em termos gerais, e ao estudo do desenvolvimento tecnológico da biotecnologia industrial, especificamente, produziram uma monografia, uma dissertação de mestrado, diversos trabalhos técnicos¹ e científicos e, agora, este trabalho de doutoramento.

Esta tese tem dois objetivos. O primeiro é o de demonstrar que, embora exista uma transição tecnológica em curso na indústria química² - do paradigma fóssil para o paradigma renovável, que podemos contextualizar no surgimento de uma economia de baixo carbono ou, para utilizar o termo consagrado na literatura, da bioeconomia - esta transição assumiu contornos muito diferentes dos que eram inicialmente previstos por especialistas, analistas e tomadores de decisão. O foco de muitos esforços inovativos, inicialmente voltados ao desenvolvimento da produção em grandes volumes de biocombustíveis e commodities químicas³, tem migrado para um novo modelo, pautado no desenvolvimento da produção de especialidades químicas e produtos especiais, como nutracêuticos e ingredientes tecnologicamente avançados para cosméticos, com implicações de largo alcance para as trajetórias de desenvolvimento das tecnologias, para as estratégias tecnológicas e de negócios das firmas, para os padrões de concorrência e para a estrutura e organização industrial do setor.

Já o segundo e principal objetivo da tese é o de demonstrar que esta transição, denominada doravante *pivotagem*, está assente na construção e mobilização de novas capacidades dinâmicas, e identificar e descrever estas capacidades. A incorporação de competências destinadas à adaptação a condições cambiantes do ambiente no qual a firma está inserida é descrita na literatura como uma fonte importante de vantagens competitivas porque está relacionada a uma maior flexibilidade das estratégias tecnológica e de negócios. Quando a firma é capaz de se adaptar a mudanças nos parâmetros competitivos do ambiente no qual

¹Dentre os trabalhos técnicos, destaco o World Directory of Advanced Renewable Fuels and Chemicals. Lançado em 2014, trata-se de uma compilação de informações sobre 250 projetos inovadores para a produção de biocombustíveis e produtos químicos renováveis por rotas avançadas. A publicação, que conta ainda com uma taxonomia autoral de projetos e de uma análise científica de suas principais dimensões, foi patrocinada por empresas (Braskem, GranBio, Novozymes, Oxiten, Petrobras) e organismos públicos (BNDES, CNPEM, FAPESP, Finep).

² O termo 'indústria química', quando utilizado neste trabalho, refere-se ao código da mais recente versão da Classificação Nacional de Atividades Produtivas (CNAES) do IBGE C20 (fabricação de produtos químicos); Já o termo 'indústria petroquímica' refere-se ao código C19.2 (fabricação de produtos derivados do petróleo).

³ Segundo Wongschowski (2002), commodities químicas são "compostos produzidos em larga escala, frequentemente de matérias-primas cativas, com especificações padronizadas para uma gama variada de usos. Normalmente, as commodities têm as suas vendas concentradas em um número relativamente pequeno de clientes. Ex: amônia, ácido sulfúrico, eteno, metanol e gases industriais".

está inserida, ela se torna mais apta a lutar pela sua sobrevivência (Teece, 1988; Teece & Pisano, 1994; Teece, Pisano & Shuen, 2002; Zollo & Winter, 2002, Levinthal, 1996).

É importante ressaltar que esta tese não tem a pretensão de diferenciar, em termos da base de conhecimentos e de competências, firmas que realizaram com sucesso a *pivotagem* de firmas que sucumbiram às vicissitudes do ambiente competitivo e ‘morreram’ – até porque as informações disponíveis sobre estas últimas são muito mais escassas. Deste modo, o escopo do trabalho está delimitado à identificação e à análise das competências relacionadas à estratégia de transição em firmas que a empreenderam com sucesso.

Ainda sobre este tópico, é importante pontuar que não necessariamente a morte de alguma firma está estritamente vinculada à ausência de alguma competência específica. Revoluções tecnológicas são marcadas por uma alta taxa de entrada de firmas, muitas das quais nascentes. Estas firmas exploram novos campos nos quais diferentes alternativas tecnológicas concorrentes convivem, assim como modelos de negócios e estratégias, e algumas poucas acabam por se consolidar, eliminando as demais. A *seleção* que exerce o ambiente frequentemente é balizada por fatores que não são propriamente meritocráticos, no sentido estrito do termo (em termos de melhor desempenho), de modo que não é possível, em uma revolução tecnológica, afirmar quais serão as firmas (ou, como desdobramento, as tecnologias) que irão sobreviver, e quais aquelas que não irão, com base apenas na análise do conjunto de competências e de conhecimentos que cada uma destas possui *a partida*. Este trabalho tem a pretensão de identificar competências presentes em firmas que conseguiram realizar com sucesso a *pivotagem* identificada nas trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial, o que, aos olhos do autor, tem potencial para contribuir com o debate sobre os fatores que se relacionam à sobrevivência de empresas de base tecnológica (EBTs) em revoluções tecnológicas, utilizando como objeto de estudo a biotecnologia industrial.

Atualmente, uma legião de novas firmas dedica-se à tarefa de desenvolver a produção de compostos químicos e combustíveis avançados utilizando a biologia, um ramo de atividade que é denominado de biotecnologia industrial⁴. A mudança pode ainda não ser óbvia. Muitas destas firmas ainda não têm forte penetração comercial, mas estão trabalhando no

⁴ Haverá adiante um capítulo específico para definição do termo, mas no momento basta dizermos que a biotecnologia industrial é a aplicação de ferramentas biotecnológicas a processos industriais próprios da indústria química, o que não inclui a farmacêutica. Assim, a produção de combustíveis, produtos químicos, materiais e energia pautada no uso de biotecnologias compõe o conceito de biotecnologia industrial adotado neste trabalho.

desenvolvimento de novos produtos e processos de base biológica, mais eficientes e rápidos que seus antecessores, a partir de tecnologias avançadas.

Estas firmas estão impulsionando a transição do uso de carvão, petróleo e gás para o uso de madeiras, gramíneas, resíduos agrícolas e açúcares enquanto fontes de matérias-primas na indústria química. Ao invés de catálises inorgânicas, utilizam enzimas avançadas, produzidas sob demanda. Este é um movimento irreversível, sujeito, entretanto, a acelerações e desacelerações ao sabor de alterações nos condicionantes do ambiente. Como pontuou o periódico *Biofuels Digest* em uma reportagem de 2016:

Out with the old inorganic feedstocks like coal, oil and gas. In with the new feedstocks like woods, grasses, fibers and sugars. Out with the old inorganic catalysts, and in with the new ones like enzymes. Out with the old digital sensors and in with new skin-like sensors based on the way organisms sense light, heat, sound, pressure, velocity and more. Out with the old manufacturing trains made with steel, glass and plastic, and in with new organic materials with better functional properties and physical flexibility. Out with the old inorganic multi-step, analog chemical transformations, and in with one-step transformations achieved by a new generation of designer microorganisms.

Based in microbes, the new organic manufacturing offers the promise of a billion manufacturing sites in a teaspoon — rolled up into giant industrial symbiosis that is sustainable, affordable, and reliable and can be adjusted to account for new innovation not with costly hardware retrofits but with simple software upgrades (Biofuels Digest, 2016a).

A biotecnologia industrial tem seu cerne na geração, no processamento e na aplicação comercial de novas informações e conhecimentos. Suas tecnologias são de base científica, e frequentemente seu desenvolvimento é apoiado na combinação sinérgica de conhecimentos “de fronteira” de campos aparentemente tão distantes como a biologia, a informática e a engenharia.

A biotecnologia industrial compõe um movimento mais amplo, global, que busca desenvolver métodos produtivos mais limpos e sustentáveis do que os que atualmente conhecemos: a bioeconomia. A bioeconomia já é parte importante do Produto Interno Bruto (PIB) de muitos países. Estudo de 2018 do BNDES apontou que as vendas atribuíveis à bioeconomia brasileira em todo o mundo totalizaram,

em 2016, o valor de US\$ 326,1 bilhões. Segundo o mesmo estudo, no Brasil, em 2016, o valor das vendas atribuíveis a sua bioeconomia alcançou US\$ 285,9 bilhões (Silva, Pereira & Martins, 2018). Muitos produtos químicos amplamente conhecidos são atualmente produzidos principalmente por rotas biotecnológicas. Por exemplo, a Cargill Inc., multinacional estadunidense do setor de alimentos, produz ácido láctico para aplicações em polímeros a escalas petroquímicas em sua planta de Blair, Nebraska, utilizando um processo proprietário baseado em fermentação de leveduras. A Dupont Tate & Lyle Bioproducts Co., uma multinacional também estadunidense, produz Propano-1,3-diol a partir de uma rota biológica, com vantagens de custo sobre a contraparte petroquímica. A BASF e a Novamont, por sua vez, possuem uma parceria para produção de Butano-1,4-diol a partir de leveduras geneticamente modificadas (Elabora Consultoria, 2014).

Embora o universo de atores da biotecnologia industrial tenha grande diversidade, o objeto de estudo deste trabalho se restringe a empresas de base tecnológica (EBTs), uma vez que o estudo de firmas desta natureza permite observar os processos organizacionais que influenciam o acúmulo inicial de competências nas firmas. Avaliar as diferenças de desempenho entre projetos desta natureza é uma maneira útil de observar o aprendizado organizacional e a formação da base de conhecimentos e competências *in action* (Pisano, 2002).

Empresas de base tecnológica (EBTs) são aquelas cuja operação está amplamente baseada na exploração de uma ou de algumas tecnologias emergentes, através da aplicação sistemática de conhecimento técnico-científico “de fronteira” destinado à criação de novos produtos ou serviços. Estas firmas têm uma alta proporção de gastos com P&D, empregam uma alta proporção de pessoal técnico-científico e de engenheiros, frequentemente portadores do título de doutor (Campos et al. 2009).

Este trabalho tem como pano de fundo a dinâmica do desenvolvimento das trajetórias tecnológicas de bioprodutos e biocombustíveis de geração avançada⁵. A sua motivação central é a constatação de que enquanto algumas firmas pioneiras têm sucumbido às intempéries não esperadas que surgiram nos últimos anos no mercado de produtos renováveis, das quais falaremos adiante, algumas outras têm reformulado suas estratégias, tecnológicas e de

⁵ O termo “geração avançada” é utilizado neste trabalho para designar o desenvolvimento de tecnologias pautado na exploração de campos científicos de fronteira, como a biologia sintética. É utilizada aqui para diferenciar, por exemplo, a produção de biocombustíveis celulósicos de biocombustíveis “tradicionais”, como o etanol de cana-de-açúcar através da rota fermentativa ‘convencional’ (Speight & Singh, 2014; US Department of Energy, 2017).

mercado, suas competências e sua base de conhecimentos, migrando do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities químicas (também conhecidos como *bulk chemicals*), para o desenvolvimento da produção de especialidades químicas e produtos especiais, como ingredientes para a indústria alimentícia e a de cosméticos.

A primeira “onda” de projetos voltados ao desenvolvimento destes produtos esteve centrada em biocombustíveis, aproveitando o imperativo de muitos governos em encontrar uma fonte segura e barata de energia renovável. Com início que podemos datar da metade dos anos 2000 (Van Dien, 2013), esta primeira “onda” baseou-se na suposição de petróleo e petroquímicos permanentemente caros. Aqui convém qualificar o advérbio. Após a indústria superar a sua “infância”, ou seja, estar consolidada em relações sinérgicas envolvendo muitas firmas e muitas plantas, é possível sobreviver a períodos de petróleo barato, ainda que com prejuízo. No entanto, nesta fase inicial, na qual os custos de capital ainda não foram amortizados e a geração de renda ainda é ínfima, o preço do petróleo mantido abaixo de certo limiar, mesmo que por um período curto, é devastador.

A hipótese de insumos e produtos fósseis permanentemente caros mostrou-se depois errada, causando enormes prejuízos a tecnologistas, investidores e firmas. O comportamento do petróleo no período também impactou negativamente o resultado de políticas públicas destinadas à promoção da produção industrial de biocombustíveis⁶. Como veremos adiante, muitas das tecnologias de processo da biotecnologia industrial também não têm se comportado, ao nível comercial, como era esperado em suas fases mais incipientes de desenvolvimento, apresentando um desempenho mais pobre do que o imaginado⁷.

Em resposta a estas dificuldades, algumas firmas têm atuado para adaptar suas estratégias tecnológicas e suas bases de conhecimentos e competências, com o objetivo de buscar oportunidades em outros segmentos. Estes segmentos são aqueles nos quais os volumes são baixos e as margens altas, como especialidades químicas, nutracêuticos e outros produtos especiais (Molchanov, 2014; 2015).

⁶Segundo a U.S. Energy Information Administration (EIA), “*North Sea Brent crude oil prices averaged \$38/barrel (b) in December (2015), a \$6/b decrease from November (2015), and the lowest monthly average price since June 2004. Brent crude oil prices averaged \$52/b in 2015, down \$47/b from the average in 2014, as growth in global liquids inventories downward pressure on Brent prices throughout much of the year*” (EIA, 2016, pp. 1).

⁷“Volumetric productivities of commercial fermentation processes typically fall within the range of 3–5 g/L/hour which is as much as 10-fold less than of many chemical processes. Notwithstanding differences in productivities (inverse of reactor residence time) due to temperature and pressure effects on chemical and biocatalysts, fermentation processes would benefit from use of higher cell densities (lower water content). In other words, current fermenter productivities are typically limited by gas solubility, mixing and heat transfer rates” (Fonte: retirado de Sanford et al., 2016, pp. 116).

Aqui é preciso fazer uma diferenciação conceitual entre rentabilidade e lucratividade. A lucratividade de determinada atividade é um indicador utilizado para apontar o ganho líquido referente à operação. Em última análise, este indicador aponta se a continuidade da operação se justifica ou não (evidentemente, negócios não lucrativos podem ser mantidos em funcionamento por certo tempo, mas sempre objetivando a busca da lucratividade). A lucratividade de determinada operação tem que ver, portanto, com a diferença entre o fluxo de receitas e o de despesas. Já a rentabilidade é um indicador que avalia o retorno de determinado investimento, o que inclui gastos com P&D e marketing, por exemplo. Não necessariamente investimentos lucrativos são rentáveis. Em suma, a avaliação do resultado de determinada atividade produtiva precisa levar em conta o custo do investimento realizado para viabilizá-la.

Este trabalho pretende ser uma contribuição ao debate sobre os fatores que se relacionam à sobrevivência de empresas de base tecnológica em um ambiente dinâmico e desafiador, no qual predomina forte incerteza – como é o da biotecnologia industrial. Em especial, o trabalho volta-se a demonstrar a importância da construção de capacidades dinâmicas (Teece & Pisano, 1994; Teece, Pisano & Shuen, 1998; Zollo & Winter, 2002), que sejam capazes de alicerçar a adaptação de estratégias e de modelos de operação quando os parâmetros competitivos do ambiente mudam de modo significativo, rápido e, até certa medida, inesperado. A capacidade de adaptação é, no entendimento adotado neste trabalho, uma fonte importante de vantagens competitivas em ambientes tecnológicos dinâmicos, como identificado por Levinthal (1997, 1996).

O trabalho está estruturado ao redor das seguintes questões de pesquisa:

1. Há trajetórias tecnológicas que têm se mostrado dominantes na biotecnologia industrial? Há migração de esforços tecnológicos das firmas entre diferentes trajetórias?
2. O desempenho obtido pelo setor (em termos da evolução da eficiência produtiva e do volume produzido) tem correspondido às expectativas depositadas sobre ele por diferentes sociedades?
3. Quais são atualmente os principais gargalos para a difusão e consolidação da biotecnologia industrial? Como estes obstáculos têm sido enfrentados pelas empresas de base tecnológica?
4. Quais são as competências que as empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial têm mobilizado no enfrentamento desses desafios?

Três etapas compõe a metodologia adotada, que é descrita a seguir:

1. Construção de um banco de dados e informações sobre projetos da biotecnologia industrial.

A metodologia adotada principia pela construção de um amplo banco de dados com informações sobre projetos voltados ao desenvolvimento da fabricação de renováveis avançados, no Brasil e no mundo, anunciados entre 2000 e 2017⁸. Para a construção deste banco, foram admitidos apenas projetos cujo objetivo fosse a construção de uma ou mais plantas industriais, de modo que projetos focados exclusivamente ou prioritariamente em pesquisa básica foram excluídos. Com isto, foram priorizadas atividades inovativas (cujo objetivo fosse a introdução comercial de tecnologias) e atividades inventivas.

Com base em informações obtidas em fontes como: i. notícias e relatórios de sites especializados no setor; ii. relatórios anuais e páginas na internet das firmas e; iii. relatórios (ou artigos) técnicos e científicos, o banco de dados contém, dentre outras, as seguintes informações para cada projeto identificado:

- I. Firmas e demais instituições envolvidas na condução do projeto (pesquisa, desenvolvimento e operação);
- II. Matérias-primas utilizadas;
- III. Plataformas tecnológicas (ou de conversão);
- IV. Produtos gerados;
- V. Marcos de desenvolvimento tecnológico (*milestones*);
- VI. Equipe científica envolvida no projeto;
- VII. Patentes relacionadas à tecnologia.

A construção do banco de dados mostrou-se importante para os objetivos desta tese pelos seguintes motivos:

1. Permitiu a identificação de firmas, tecnologias e atores relacionados à biotecnologia industrial, no Brasil e no mundo;

⁸ Ver o Anexo 1.

2. Permitiu segmentar o setor de biotecnologia industrial em diferentes dimensões (pelo tipo de matéria-prima utiliza, pelos produtos gerados ou pelas plataformas tecnológicas, por exemplo);
3. Por ser um banco em constante atualização, possibilitou acompanhar a evolução de cada projeto, de seus marcos (*milestones*) e do direcionamento dos esforços tecnológicos. Como as informações do banco foram constantemente atualizadas, é possível traçar um panoramada trajetóriade desenvolvimento de cada um dos projetos acompanhados. Neste sentido, o banco de dados é um ponto de partida importante para a identificação defirmasque migraram do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities químicas para especialidades e produtos especiais.

2. Estudos de caso de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial

A segunda etapa metodológica do trabalho é composta por um estudo de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial, identificadas com base no banco de dados da etapa metodológica anterior. Tal estudo é importante por exemplificar com casos concretos a referida transição do “modelo biocombustíveis e commodities” para o “modelo especialidades químicas e produtos especiais”, e por ajudar a identificar, ainda que incipientemente, capacidades dinâmicas associadas a esta transição.

As firmas selecionadas para os estudos de caso pertencem a dois grupos distintos, o que está refletido na estrutura no capítulo 3, que contém os resultados empíricos e analíticos da tese: firmas manufatureiras (Amyris, Cool Planete Terravia) e firmas prestadoras de serviços tecnológicos avançados no campo da biologia sintética e, em especial, da biologia digital (Genomatica, Arzeda, Ginkgo Bioworks e Zymergen). As firmas dos dois grupos têm atuado sinergicamente, através do estabelecimento de parcerias de P&D, bem como acordos comerciais e de produção, para a criação de novas oportunidades inovativas na biotecnologia industrial. Enquanto as primeiras são firmas que *pivotaram* do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities para especialidades químicas e produtos especiais, as segundas estão no cerne de uma revolução tecnológica que tem apoiado a transição.

3. Entrevistas semiestruturadas com atores-chave da biotecnologia industrial no Brasil

A terceira etapa metodológica consiste de entrevistas semiestruturadas com atores chave da biotecnologia industrial no Brasil. Trabalhos como os de Singleton et al (1993) e de Selltitz et al. (1975) apontam que entrevistas permitem obter informações sobre aspectos não diretamente observáveis de uma dada situação, e assim incorporar elementos analíticos de grande sutileza, que não são facilmente identificáveis.

A etapa de entrevistas iniciou-se pela construção de um guia, um instrumento para condução e encadeamento de tópicos e assuntos relevantes a serem abordados. Guias para entrevistas variam com relação à rigidez e liberdade que o entrevistado tem para criar a sua narrativa e expor as suas percepções sobre os assuntos em pauta. No entanto, todos os guias compartilham uma característica: eles auxiliam o entrevistador a saber o que perguntar, em qual sequência e a avaliar as respostas (Kennedy, 2006).

Neste trabalho, é adotada a abordagem semiestruturada, na qual o entrevistado tem relativa liberdade para expor suas percepções, sob condução do entrevistador. Neste sentido, o roteiro elaborado serviu como apoio para direcionar as entrevistas, sem, porém, obliterar a formulação de questões e de hipóteses derivadas, não previstas na partida, motivadas pelas respostas inicialmente obtidas. Esta abordagem, de natureza mais opinativa do que em entrevistas rigidamente estruturadas, tem a vantagem de capturar nuances na descrição do fenômeno estudado não prontamente observáveis e de possibilitar a incorporação de novos elementos e variáveis relevantes, até então (até o momento da entrevista) desconhecidos pelo pesquisador. Ademais, esta abordagem permite a formação de uma interação mais rica entre entrevistado e entrevistador, já que o desenho da entrevista pode ser adaptado *durante* a realização desta, a partir do diálogo desenvolvido e das respostas que vão sendo obtidas (Manzini, 2005).

O objetivo desta etapa metodológica é o de confirmar a tese de que há uma transição tecnológica em curso entre trajetórias tecnológicas no escopo da biotecnologia industrial; avaliar a dimensão desta transição; e identificar competências mobilizadas pelas firmas que estão envolvidas na transição.

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira: após esta introdução, segue um capítulo de revisão bibliográfica sobre conceitos nos quais atese está assente. Em seguida, há um capítulo de definição do conceito de biotecnologia industrial, de contextualização do seu surgimento e de apreciação das suas trajetórias tecnológicas. O próximo capítulo traz os resultados empíricos de pesquisa da tese, compostos por estudos de caso sobre empresas de base tecnológica (EBTs) e entrevistas com atores-chave da biotecnologia industrial no Brasil. Por fim, há um capítulo de encerramento no qual é realizada uma reflexão analítica e são apresentadas as conclusões da tese, bem como uma tentativa agenda de pesquisa, derivada dos resultados obtidos neste trabalho.

Capítulo 1. Competências e aprendizado organizacional

Este capítulo apresenta um arcabouço teórico composto por conceitos que alicerçaram a construção da tese. Principia pela apresentação da corrente teórica que em economia convencionou-se denominar teoria econômica evolucionária (ou evolucionista), e conceitos fulcrais como o de *rotinas*, *busca* e *seleção*. Em um segundo momento, apoia-se no conceito de *paradigma tecnológico* (e de conceitos derivados, como de *trajetórias tecnológicas*) para alicerçar o estudo dos rumos do desenvolvimento tecnológico da biologia industrial. Por fim, o capítulo debruça-se sobre os conceitos de *aprendizado* e *competências organizacionais*, em especial *capacidades dinâmicas* voltadas à adaptação a mudanças rápidas e inesperadas, típicas de ambientes tecnológicos de grande dinamismo, como é a biotecnologia industrial.

1.1 Teoria Econômica Evolucionária: rotinas, busca e seleção

Em economia, convencionou-se denominar “teoria econômica evolucionária” (ou “evolucionista”) a corrente de pensamento desenvolvida a partir da inspiração obtida em ideias básicas da biologia evolucionária, assente principalmente nas contribuições de Charles Darwin, que se mostraram úteis para compreensão de fenômenos econômicos do mundo real.

A utilização do termo “evolucionário” indica uma preocupação desta corrente teórica com processos de mudança progressiva, de longo prazo. Na teoria econômica evolucionária, as regularidades observadas na realidade são interpretadas como sendo o resultado produzido por processos dinâmicos compreensíveis a partir de condições conhecidas ou conjecturadas que emergem do passado – e como “características do estágio a partir do qual um futuro bastante diferente do presente irá emergir por meio dos mesmos processos dinâmicos” (Nelson & Winter, 1982, pp. 31).

Na teoria econômica evolucionária, as firmas possuem padrões regulares e, até certo ponto, previsíveis de ação. Estes padrões são denominados por Nelson e Winter, em sua obra seminal de 1982, como *rotinas*. Este termo inclui características das firmas que variam “de rotinas técnicas bem especificadas para a produção de coisas, procedimentos para

contratações e demissões, encomendas de novos estoques, ou aumentar a produção de itens de alta demanda, até as políticas relativas ao investimento, à pesquisa e desenvolvimento (P&D) ou publicidade, e estratégias empresariais relativas à diversificação da produção e ao investimento no exterior” (Nelson & Winter, 2005, pp. 35).

As funções que as rotinas assumem na economia evolucionistasão semelhantes às que os genes representam na teoria evolucionária da biologia. Neste sentido, as rotinas são características persistentes do “organismo” e determinam seu comportamento possível (embora o comportamento *de factotambém* seja determinado pelo ambiente); elas são hereditárias no sentido de que os organismos de amanhã (uma nova fábrica, por exemplo) têm muitas das mesmas características dos organismos atuais, e são selecionáveis no sentido de que os organismos com rotinas mais adaptadas aos parâmetros de seleção do ambiente irão sair-se melhor do que seus concorrentes, de modo que os segundos tendem a serem “expulsos” do ambiente competitivo no longo prazo. No entanto, é preciso ressaltar que há elementos estocásticos atuando tanto sobre as decisões como sobre os resultados das decisões, ou seja, o resultado do processo de seleção está sujeito a fatores imponderáveis, sendo, portanto, impossível de determinar *ex-ante* (Nelson & Winter, 2005).

A qualquer tempo, as rotinas de uma firma definem uma lista de funções que determinam o seu comportamento em face a diversas variáveis externas e internas. A “rotinização” das atividades constitui a forma mais importante de armazenamento do conhecimento em uma organização, porque permite que este seja prontamente mobilizado frente aos problemas com os quais a firma se depara. O conceito de *rotina* engloba inclusive humores e heurísticas estratégicas relativamente constantes que moldam a forma com que a firma aborda os problemas não-rotineiros que enfrenta (como reagir à exploração de uma nova área tecnológica por um concorrente, por exemplo) (Nelson & Winter, 1982; Freeman & Soete, 2008).

As rotinas das firmas são a contrapartida das habilidades dos indivíduos. Por “habilidade”, este trabalho entende a capacidade de ter uma sequência regular de comportamento coordenado, que em geral é eficiente em relação a seus objetivos, dado o contexto em que normalmente ocorre. As habilidades possuem três características fundamentais: são programáticas, no sentido de que envolvem uma sequência de etapas concatenadas; em grande parte são compostas por conhecimento tácito, ou seja, que não é facilmente codificável e que não é mobilizado de forma totalmente consciente (no sentido dos

detalhes do seu desempenho); e, por fim, envolvem numerosas “escolhas”, o que em parte ocorre de forma automática e inconsciente (Nelson & Winter, 1982).

No entanto, mesmo os comportamentos regulares e previsíveis se modificam ao longo do tempo, tanto de forma reativa - a alterações no ambiente ou ao comportamento de concorrentes - como em resultado da busca proativa por métodos mais eficientes de se responder aos problemas atuais. Os processos modificadores de rotinas – que são eles próprios guiados por rotinas - são denominados de “processos de busca” na teoria econômica evolucionária. *Busca*, assim, é o nome que se dá ao processo pelo qual as firmas modificam as suas rotinas, ou adquirem novas rotinas. Há uma série de variáveis que determinam os resultados do processo de busca - o que, novamente, pode incluir elementos estocásticos (Nelson & Winter, 1982; Freeman & Soete, 2008).

O conceito de *busca* constitui, assim, a contrapartida da mutação na teoria evolucionária biológica. E, assim como na biologia a mutação é em parte determinada pela constituição genética do organismo, na economia o processo de busca é parcialmente determinado pelas rotinas da firma.

As firmas competem entre si pela sobrevivência a um constante *processo de seleção*, que tende a separar as mais adaptadas ao ambiente daquelas menos adaptadas, que acabam por serem excluídas. No entanto, as firmas não ‘assistem’ inertemente à atuação do processo de seleção: os mesmos “sinais” (preços, por exemplo) que geram o *feedback* da seleção também influenciam as direções de busca das firmas, o que constitui um processo contínuo de *adaptação*. A busca e a seleção, assim, são aspectos simultâneos e interativos de um mesmo processo evolucionário. Como afirmam Nelson e Winter, “as firmas evoluem ao longo do tempo através da ação conjunta de busca e seleção, e a situação do ramo de atividade em cada período carrega as sementes de sua situação no período seguinte” (Nelson & Winter, 1982, pp. 40).

1.2 Paradigmas tecnológicos e trajetórias tecnológicas

Dosi define *paradigma tecnológico* (em analogia ao conceito de paradigma científico de Kuhn⁹⁹) como “um modelo e um padrão de solução de problemas tecnológicos selecionados, baseados

⁹⁹Kuhn, T. A estrutura das revoluções científicas, São Paulo: ed. Perspectivas, 3ª edição, 1992.

em princípios selecionados, derivados das ciências naturais, e em tecnologias materiais selecionadas”. Um paradigma tecnológico, portanto, é o resultado complexo da combinação de diferentes dimensões (tecnológica, organizacional e de marketing, dentre outras) que define a forma e a direção daquilo que é compreendido como *progresso* por diferentes atores. Como afirma Dosi, “assim como o paradigma científico determina o campo de inquirição, os problemas, os procedimentos e as tarefas, também o faz a tecnologia”. (Dosi, 2006, pp. 41).

A identificação de determinado paradigma, como afirma Dosi, “relaciona-se com o esforço genérico ao qual está aplicado, com a tecnologia material selecionada, com as propriedades físico-químicas exploradas e com as dimensões e os equilíbrios tecnológico e econômico focalizados” (Dosi, 2006, pp. 43). A ideia de progresso, nesse sentido, define-se pelos aperfeiçoamentos dos equilíbrios relacionados a estas dimensões. Assim como no arcabouço kuhniano a “ciência normal” representa o avanço nos caminhos que o paradigma científico define como relevantes, o *progresso técnico* é o padrão de atividade “normal” de resolução de problemas que o paradigma tecnológico define como relevantes. Estes caminhos de avanço “natural” definidos pelo paradigma são denominados de *trajetórias tecnológicas* (Dosi, 2006).

Uma trajetória tecnológica pode ser representada pelo movimento dos balanços multidimensionais entre as variáveis definidas como relevantes pelo paradigma (Dosi, 2006). O progresso, então, pode ser definido como o aperfeiçoamento destes balanços. Dosi descreve as seguintes características das trajetórias tecnológicas, definidas em termos dos paradigmas tecnológicos nos quais estão inseridas:

- a. Pode haver trajetórias mais genéricas ou mais circunscritas, mais poderosas ou menos poderosas.
- b. As trajetórias representam *complementaridades* entre diversas formas de conhecimento, experiências e habilidades. Como contrapartida, os desenvolvimentos realizados em determinada trajetória tecnológica podem estimular ou bloquear avanços em outras trajetórias.
- c. Pode-se definir *fronteira tecnológica* como o mais alto nível alcançado em relação a uma trajetória tecnológica, tendo como base dimensões tecnológicas e econômicas relevantes.
- d. O progresso em uma determinada trajetória tem aspectos *cumulativos*: a possibilidade de avanços futuro depende da posição atual ocupada por determinado ator.
- e. Quão mais “poderosa” for determinada trajetória, mais difícil será aos agentes migrar para uma trajetória alternativa.
- f. É questionável a possibilidade de comparação e de avaliação, a priori, da superioridade de certa trajetória em relação às alternativas. Critérios objetivos para tal tarefa podem existir, mas eles só podem ser definidos *ex-post*. Esta é uma das razões que faz com que as atividades inovativas carreguem um grande componente de *incerteza*.

Um paradigma tecnológico é altamente prescritivo: o paradigma define quais são as direções da mudança técnica a perseguir (heurísticas positivas) e aquelas a negligenciar (heurísticas negativas). O paradigma defini certos *parâmetros de seleção* que são também dispositivos de direcionamento das atividades de busca das firmas. É neste sentido que os paradigmas tecnológicos possuem um poderoso *efeito de exclusão*: os esforços e a imaginação tecnológica dos engenheiros e das organizações às quais pertencem focalizam-se em direções precisas, embora fiquem “cegos” com respeito a possibilidades tecnológicas alternativas. Brian Arthur, em artigo seminal de 1989, descreveu um fenômeno relacionado a este, que denominou de *lock-intecnológico* (mas, neste caso, mais relacionado aos retornos crescentes relacionados à adoção de novas tecnologias). Este efeito consiste em um aprisionamento dos esforços tecnológicos em certas trajetórias de desenvolvimento, à despeito da existência de outras trajetórias alternativas (dentro do mesmo paradigma tecnológico).

É importante ressaltar que o ambiente exerce poderosa influência sobre o desenvolvimento de um paradigma tecnológico. Mudanças no ambiente econômico frequentemente estimulam o simples progresso técnico ao longo de uma trajetória tecnológica estabelecida – mudanças que podemos designar como atividade tecnológica “normal”. Os esforços tecnológicos “extraordinários”, relacionados à busca de novas direções tecnológicas, surgem quer em relação a novas oportunidades abertas por desenvolvimentos científicos, quer em resposta a crescentes dificuldades de seguir adiante em uma dada direção (por razões tecnológicas ou econômicas, ou ambas) (Dosi, 2006).

Alterações no ambiente macroeconômico interagem com o processo de seleção das novas tecnologias, com seu desenvolvimento e, finalmente, com a obsolescência e substituição das mesmas. Há, portanto, mecanismos de feedback “ascendentes” do ambiente econômico para a tecnologia. Como afirma Dosi:

“As mudanças dos preços relativos e das participações distributivas afetam a demanda das diversas mercadorias e a rentabilidade relativa para fabricá-las. Os produtores certamente reagem a esses sinais do ambiente, inclusive com avanços técnicos. No entanto, isso muitas vezes acontece dentro dos limites de uma dada trajetória tecnológica, que pode ser conducente ou impor crescentes restrições a quaisquer “sinais” liberados pelo ambiente. As dificuldades, assim como os quebra-cabeças e os problemas tecnológicos não solucionados funcionam no sentido ascendente como dispositivos de focalização, ocasionalmente pressionando outros campos tecnológicos para irem além na resolução dos seus problemas e, finalmente, facilitarem ou atrapalharem a mudança para outras trajetórias tecnológicas”(Dosi, 1997, pp. 1537).

Deve-se pontuar, porém, que as dificuldades tecnológicas não-solucionadas não acarretam automaticamente uma mudança para outra trajetória tecnológica. Mudanças nas condições e nas oportunidades de mercado (entre as quais, as mudanças nos padrões de demanda, nos preços relativos, nas participações distributivas e nos custos de produção, dentre outras) são todas muito importantes e continuamente provocam pressões “no sentido ascendente”, em diversos níveis, com relação às trajetórias tecnológicas e aos mesmos critérios de seleção, através dos quais são escolhidas as trajetórias. No entanto, como afirma Dosi, “de modo algum esse fato acarreta qualquer suposição referente a trajetórias tecnológicas maleáveis e alternativas “prontas para uso”, ou, ainda mais, reações tecnológicas instantâneas em relação a mudanças nas condições de mercado” (Dosi, 2006). A mudança de trajetórias, desta maneira, ocorre sempre de maneira gradual, e raramente é livre de custos e esforços relevantes para aqueles que a empreendem.

1.3 Ambiente e mecanismos de seleção

Ao longo do tempo, o mecanismo econômico análogo à seleção natural opera à medida que o mercado determina quais firmas são lucrativas e quais não são, tendendo a separar e excluir as segundas (Nelson & Winter, 1982). É o ambiente competitivo que define os parâmetros de sucesso para as firmas e essa definição está muito próxima à habilidade delas de sobreviver e crescer. Como afirmam Nelson & Winter, 1982, pp. 32):

“O mecanismo de seleção aqui utilizado é claramente análogo à seleção natural de genótipos com taxas de reprodução líquida diferenciais da teoria evolucionária da biologia: firmas lucrativas crescem (via investimento), e firmas não lucrativas minguam. E, tal como na teoria biológica, em nossa teoria evolucionária, a sensibilidade da taxa de crescimento de uma firma à prosperidade ou à adversidade constitui em si mesma um reflexo de seus “genes”.

Como demonstra Dosi, a *seleção* opera não apenas ao nível das tecnologias e das firmas, mas também ao nível do próprio paradigma. O ambiente econômico e social afeta o desenvolvimento tecnológico de duas maneiras: em primeiro lugar, selecionando a “*direção da mutação*” (isto é, selecionando o paradigma tecnológico), e depois *selecionando entre as mutações*, de um modo mais darwiniano (isto é, a seleção *ex-post* entre diferentes apostas tecnológicas situadas dentro de um mesmo paradigma). Às vezes, quando estão surgindo novas tecnologias, podemos com frequência observar novas firmas tentando explorar diversas inovações tecnológicas. O mercado funciona como

um sistema de recompensas e penalidades a estas tentativas, verificando e selecionando aquelas mais bem *adaptadas* ao conjunto de parâmetros que o paradigma define como relevante (Dosi, 2006).

A história de algumas das inovações que alteraram a forma como vivemos possui alguns bons exemplos deste processo que acabo de descrever: o advento da eletricidade, no final do século XIX, representou uma mudança paradigmática nos modos de produção e de vida urbano. A invenção do transistor, nos anos 1940, foi a fagulha de uma tremenda revolução na forma como as pessoas produzem e compartilham informação, sem contar na forma de produzir e de transportar bens e pessoas. Da mesma maneira, na indústria química, o paradigma renovável surge em contraposição ao paradigma fóssil predominante. No entanto, não é possível afirmar de antemão até que ponto irá esta incursão. Tornar-se-á o paradigma renovável o dominante? Ou permanecerá na esfera dos nichos tecnológicos? E, caso a primeira hipótese seja correta, quanto tempo a transição levará? São perguntas sobre as quais podemos fazer ilações, elucubrações, suposições, previsões, mas para as quais não podemos, no presente momento em que esta tese é escrita, dar respostas definitivas.

Neste contexto, cabe a pergunta: como um novo paradigma tecnológico emerge, e como este se torna o “dominante” em relação a outros possíveis? Sobre este aspecto, podemos afirmar que as forças econômicas, em conjunto com os fatores institucionais e sociais, funcionam como dispositivo seletivo. Os critérios econômicos (exequibilidade, negociabilidade e rentabilidade, entre outros), agem como elementos seletores e ajudam a definir as trajetórias reais do progresso técnico (de uma forma mais genérica em estágios incipientes de pesquisa, e de maneira mais determinística em estágios mais avançados do processo de desenvolvimento), dentro de um conjunto muito maior de trajetórias possíveis.

No entanto, não são apenas de natureza econômica os fatores que influenciam a direção do progresso técnico. Frequentemente, entram em cena outras variáveis, tais como os interesses de organizações impactadas pela nova tecnologia e variáveis institucionais *stricto sensu*, como a atuação (via compras e encomendas, por exemplo) de órgãos públicos. É provável que todas estas variáveis atuem na concentração de forças para o progresso em determinada direção em detrimento das demais direções possíveis (Dosi, 2006).

Há na história da ciência e da tecnologia diferentes exemplos da influência exercida pelo poder público sobre a direção do progresso técnico, por intermédio de diferentes mecanismos. Talvez o caso mais célebre seja o da indústria aeronáutica nos Estados Unidos, mas há muitos outros exemplos, como na indústria química e na eletrônica, como demonstraram Mowery & Rosenberg (2005). No entanto, mesmo nas situações em que ocorre uma significativa “focalização institucional”, há provavelmente diversas possibilidades tecnológicas alternativas (todas passíveis de serem apoiadas por políticas públicas), um processo incerto de busca, com diversas organizações, firmas e indivíduos “apostando” em diferentes direções, na construção de diferentes soluções tecnológicas. Deste modo, a

concorrência estabelece-se não apenas entre a “nova” e a “velha” tecnologia – que a primeira tenciona substituir, mas também - e, para os fins deste trabalho, de maneira mais importante - entre as diferentes abordagens tecnológicas alternativas, ou diferentes ‘rotas’ possíveis (Dosi, 2006).

O ponto acima desenvolvido (os efeitos institucionais no direcionamento do progresso técnico) não constitui uma regra geral; todavia, ajuda a enfatizar a fragilidade genérica dos argumentos teóricos a favor da existência de um pretenso determinismo (de atuação antecipada, portanto) da direção do progresso técnico como causa da atuação de mecanismos de mercado, em especial em estágios incipientes de desenvolvimento industrial (Dosi, 2006).

Ainda com relação aos critérios *ex-ante* que atuam na seleção de paradigmas tecnológicos, é provável que padrões de conflitos industriais e sociais atuem tanto como critérios negativos (desenvolvimentos a serem evitados), quanto como critério reforçador (sobre a direção que deve ser perseguida pelos agentes). É neste sentido que características do ambiente moldam a direção da mudança técnica: tanto variáveis de natureza econômica (o processo de crescimento e de mudança econômica, a variação nas participações distributivas e nos preços relativos) como variáveis sociais e institucionais afetam a direção da inovação. Há, assim, uma complexa estrutura de retroalimentação entre o ambiente (e os parâmetros de seleção derivados) e as direções da mudança técnica.

1.4 Competências e aprendizado organizacional

Assim como os indivíduos, as organizações “sabem fazer coisas”. Saber fazer ou ser capaz de algo é ter a competência de gerar um resultado desejável a partir de uma ação deliberada e orientada. As competências são o principal mecanismo das organizações para a transformação de uma *intenção* em um *resultado*, e elas fazem isso de determinada maneira que faz com que o efeito de suas ações tenha ao menos uma forte semelhança com o resultado inicialmente pretendido (Dosi, Nelson & Winter, 2002).

As firmas são entidades comportamentais, no sentido de que elas possuem modos razoavelmente estáveis de agir – o que, como já foi visto, está na base do conceito de *rotina* - bem como a capacidade de alterar seus comportamentos em resposta a estímulos (externos e internos). As firmas podem ser vistas como organizações com capacidade de gerar e de reter conhecimento na forma de *competências* que, quando necessário, podem ser mobilizadas para o desempenho de suas funções, desde as mais triviais, como estabelecer um regime rotineiro de compra de insumos e materiais, até as mais complexas, como desenvolver e introduzir uma nova tecnologia ou expandir suas atividades para um novo mercado geográfico.

Dosi e Malerba (1996) definem as competências das firmas como as “habilidades envolvidas no uso e na aplicação do conhecimento”. Os autores atribuem às competências organizacionais três dimensões fundamentais: a especificidade, a tacitividade e a complexidade. Competências são construídas a partir da geração e absorção de conhecimento, organizado e combinado de forma que permita a sua pronta mobilização frente a “problemas” com os quais a firma se depara no desenvolvimento e execução de suas atividades produtivas. As firmas apresentam diferenças persistentes na forma de organização de suas atividades, em suas estratégias e comportamentos. Diferenças significativas ocorrem mesmo entre firmas muito parecidas, pertencentes a um mesmo segmento produtivo. Neste sentido, o “valor” de uma determinada competência é inerente e específico à firma. Adicionalmente, o conhecimento que é subjacente a cada competência, embora em parte seja formalizado, possui uma grande dimensão tácita, ou seja, envolve uma gama de habilidades relacionadas a procedimentos que não estão muito bem articulados, tampouco formalmente codificados. Além do mais, as competências são estruturadas em forma de sistemas complexos, ou seja, a mobilização de uma competência específica está sempre correlacionada à mobilização de outras competências de apoio.

Estas três dimensões combinadas (a especificidade, a tacitividade e a complexidade) atribuem às competências sua característica mais marcante: a impossibilidade de sua transação em mercados convencionais (Teece & Pisano, 1994; Dosi e Malerba, 1996). Segundo Teece, Pisano & Shuen (2000), a essência das firmas é que elas substituem a organização típica de mercado para atividades para as quais os incentivos de mercado não são eficazes. As competências são mecanismos para a obtenção de resultados que não poderiam ser obtidos pela utilização do sistema “tradicional” de preços.

A base para a obtenção, modificação e para o acúmulo de competências pelas firmas é o *aprendizado*, um processo que ocorre nas organizações e se destina a integrar, armazenar e modificar informações e conhecimentos com origem em diferentes fontes e voltados a diferentes tarefas e objetivos. O aprendizado é um processo dispendioso e multidimensional (Malerba, 1992) relacionado à resolução de problemas (Dosi e Egidi, 1991). Em particular, o aprendizado se refere a atividades voltadas à solução de problemas específicos à firma, baseados em estruturas cognitivas particulares envolvendo inferências que esta faz sobre o ambiente no qual está inserida. O aprendizado é *local*, sendo altamente afetado pelos quadros cognitivos da organização e pelas suas atuais competências, e é *cumulativo* no sentido de que é construído com base naquilo que já foi aprendido (Pisano, 2000).

Para Levitt & March (1988), as organizações aprendem através da codificação das inferências que fazem da história em mecanismos que guiam o seu comportamento. Estes mecanismos são formas, regras, procedimentos, convenções, estratégias e tecnologias ao redor das quais as organizações são construídas e com as quais operam. Também incluem as crenças, quadros, paradigmas, códigos, culturas e conhecimentos que reforçam, elaboram ou contradizem os mecanismos formais de aprendizado.

Em decorrência da de serem formatadas pela história da firma, as competências organizacionais são de certo modo independentes da soma das competências dos seus recursos humanos. As lições obtidas com as experiências da história são capturadas de um modo que faz com que as lições sejam acessíveis à organização e aos seus membros, mas não necessariamente a história subjacente a estas lições. Mudanças nestes mecanismos dependem basicamente de interpretação, particularmente da avaliação dos resultados em termos dos objetivos inicialmente pretendidos: os resultados obtidos, em contraposição aos originalmente esperados, fazem com que as firmas e os indivíduos reforcem comportamentos “vencedores” e abandonem aqueles que não funcionam. Ao mesmo tempo, novos comportamentos podem ser criados pela internalização de novos conhecimentos como resultado de atividades de busca (Levitt & March, 1988).

Projetos de inovação geram potencialmente dois importantes resultados para as firmas que os empreendem: i. o resultado tangível, ou seja, um novo produto processo ou modelo organizacional e a propriedade e os mecanismos de apropriação a eles associados; e ii. o novo conhecimento que é agregado à base da firma. Projetos inovativos são fonte de aprendizado técnico e organizacional e, portanto, do acúmulo de novas competências que, por sua vez, influenciarão a direção e a eficiência da tomada de decisão no futuro (Pisano, 2002). Há uma lição importante a ser retirada desta constatação: a de que mesmo projetos de inovação que fracassem na tentativa de introduzir com sucesso uma nova tecnologia no mercado são importantes por serem fonte de aprendizado e de renovação do conjunto de competências da firma. Deste modo, o fracasso em um projeto pode constituir um degrau ou um passo intermediário para o futuro sucesso, desde que dele seja possível retirar lições e conhecimentos que estimulem a adoção de melhores estratégias e comportamentos pela firma.

Neste trabalho, há especial interesse nas competências organizacionais que são desenvolvidas e mobilizadas quando as firmas precisam adaptar as suas estratégias tecnológicas e seus modelos de negócio a comportamentos não esperados de variáveis relevantes para a tomada de decisão estratégica em atividades inovativas. Ambientes desta

natureza são marcados por forte incerteza – na acepção de Frank Knight¹⁰, como tratarei a seguir – sobre uma ou mais variáveis-chave, como o *design dominante* para as tecnologias centrais ou os preços-relativos dos produtos e dos insumos, dentre outras (Abernathy & Utterback, 1975). Neste tipo de ambiente, frequentemente o conjunto de competências e as estratégias das firmas precisam ser adaptados a “condições mutantes”. O ponto focal aqui é que a firma se torna consciente destas “condições” apenas após a tomada de decisão sobre qual rota tecnológica seguir, sobre como percorre-la e a qual velocidade. Neste contexto, as firmas vencedoras tendem a ser aquelas capazes de adequar suas estratégias às novas condições sem incorrer em custos impeditivos, o que demanda competências dinâmicas de adaptação – ou, como veremos a seguir, competências de Transformação (Teece, 2007).

O estudo sobre como as firmas se comportam em ambientes tecnológicos de alto dinamismo e forte incerteza demanda a adoção de alicerces teóricos que permitam analisar apropriadamente como estas organizações desenvolvem ou internalizam competências de aprendizado e adaptação a condições ambientais não esperadas na partida. Para tanto, este trabalho apoia-se em conceitos e autores da chamada teoria baseada em competências (*competence-based theory*). Nas palavras de Hodgson (1998):

“The competence-based perspective sees the existence, structure and boundaries of the firm as explained in some way by the associated existence of individual or team competences – such as skills and tacit knowledge – which are in some way fostered and maintained by that organization” (pp. 25)

O início do estudo econômico sobre o desenvolvimento de novas competências pelas firmas remete a autores clássicos como Adam Smith e Karl Marx, para os quais a divisão e a gestão do trabalho são atividades cruciais no desenvolvimento de novas e mais sofisticadas habilidades organizacionais (Hodgson, 1998).

No entanto, foi apenas mais recentemente (cerca de um século e meio após a publicação da obra “A Riqueza das Nações”, de Adam Smith) que houve o aprofundamento do estudo sobre como as firmas obtém, retém e modificam competências de modo a

¹⁰ Incerteza forte existe quando se tem conhecimento perspectivo apenas parcial, ou seja, quando não se conhece sequer quais são todas as variáveis relevantes para uma determinada tomada de decisão sobre o futuro.

sobreviverem em ambientes tecnologicamente desafiadores. Ainda mais recente é o estudo da relação entre a gestão do conjunto de competências e o desempenho inovativo das firmas (Hodgson, 1998; Pisano, 2002).

A obra de Frank Knight *Risk, Uncertainty and Profit*, de 1921, foi pioneira em enfatizar o papel do conhecimento e da incerteza no estudo das organizações. Knight ressalta que a capacidade de “adaptação antecipada” é uma das ferramentas mais importantes para a sobrevivência:

The fundamental difference in the case of animal or conscious life is that it can react to a situation before that situation materializes; it can "see things coming." The readjustments by which the organism adapts itself to the environment require time, and the farther ahead the organism can "see," the more adequately it can adapt itself, the more fully and competently it can live.(pp. 198)

Frank Knight enfatiza em sua teoria o importante papel do conhecimento para lidar com a *pervasividade* da incerteza. Aliás, para o autor, é a própria presença de incerteza que explica a existência da firma como organização econômica. Implicitamente, o autor afirma que é devido à impossibilidade de um mercado completo para a transação de todas as habilidades empresariais e administrativas necessárias que a existência de firmas se faz necessária:

The difference between free enterprise and mere production for a market represents the addition of specialization of uncertainty-bearing to the grouping of uncertainties, and takes place under pressure of ... the anticipation of wants and control of production with reference to the future (p.244).

Knight ainda ressalta a imperfeição do conhecimento para lidar com ambientes altamente mutáveis, nos quais há forte incerteza sobre condições futuras, e enfatiza a importância da intuição e do pensamento indutivo na tomada de decisões estratégicas:

It is a world of change in which we live, and a world of uncertainty. We live only by knowing something about the future; while the problems of life, or of conduct at least, arise from the fact that we know so little. This is as true of business as of other spheres of activity. The essence of the situation is action according to opinion, of greater or less foundation and value, neither entire ignorance nor complete and perfect information, but partial knowledge (...) We perceive the world before we react to it, and we react not to what we perceive, but always to what we infer. (pp. 199-201).

A incerteza acerca do futuro no momento da tomada de decisão implica que as firmas podem se ver presas (“*locked in*”) a trajetórias tecnológicas muito específicas, as quais podem não ser as nocionalmente ótimas e que talvez possam se mostrar altamente inflexíveis e potencialmente ineficientes no futuro (Arthur, 1989; Pisano, 2000). Não há meios de se garantir que a aposta feita no presente em determinada trajetória torne-se de fato a rota vencedora, por mais que a escolha seja pautada nos melhores dados e informações disponíveis no momento da tomada de decisão, ou ainda na opinião de experts.

Aqui cabe um parêntese sobre a natureza da incerteza que incide sobre a tomada de decisão envolvendo atividades inovativas. A incerteza é prevalecente tanto com respeito ao futuro da mudança tecnológica como no que se refere às futuras mudanças de mercado, ou seja, as alterações dinâmicas que ocorrem no padrão e no tamanho da demanda, e que não necessariamente estão relacionadas a alterações na tecnologia. Como resultado, a despeito da introdução de numerosas técnicas matemáticas sofisticadas na avaliação de projetos e na tomada de decisões, geralmente não se provou possível às firmas fazerem previsões precisas dos futuros custos do desenvolvimento ou do tempo que esse desenvolvimento irá exigir. Erros também são comuns nas previsões do tamanho do mercado futuro e das taxas de retorno do investimento no desenvolvimento de determinada tecnologia. Frequentemente, as firmas subestimam os custos e superestimam a velocidade do desenvolvimento, algumas vezes por margens altamente significativas. Como mostraram Freeman & Soete (2008), os custos de desenvolvimento do avião Concorde e dos reatores nucleares para geração de energia elétrica foram amplamente subestimados, assim como os mercados futuros para computadores, para o polietileno e para a borracha sintética. No caso dos reatores nucleares, ele foi grosseiramente superestimado. Citando os autores:

“(…) A produção de polietileno quase foi suspensa depois da Segunda Guerra Mundial porque seus mercados do tempo de paz haviam sido considerados muito pequenos. A IG Farben tentou vender suas patentes de borracha sintética ao cartel de borracha natural, porque pensou que o produto sintético não seria capaz de competir em tempos de paz em relação a preços e qualidade. Os primeiros fabricantes de computadores esperavam que o seu mercado fosse limitar-se ao governo e a usuários científicos. Um século depois dos primeiros experimentos, os veículos elétricos voltaram a ser investigados seriamente pelas principais empresas montadoras de automóveis. O caráter aparentemente aleatório, acidental e arbitrário do processo inovativo advém da extrema complexidade das interfaces entre o progresso científico, a tecnologia e as mudanças dos mercados. As firmas que tentam atuar nessas interfaces são tão vítimas do processo quanto seus deliberados manipuladores. **A inovação funciona como um processo social, mas frequentemente às custas dos inovadores.**” (Freeman & Soete, 2008, pp. 351. Destaque em negrito do autor da tese)

O trabalho de Edith Penrose é outro importante alicerce da teoria da firma baseada em competências. Em sua obra *The Theory of the Growth of the Firm*, de 1959, a autora debruçou-se sobre o estudo de como as organizações crescem e expandem suas fronteiras. A autora utiliza o termo crescimento em sua acepção original, ou seja, significando o “acréscimo no tamanho ou uma melhoria na qualidade, resultantes de um processo de desenvolvimento (...) em que uma série interconectada de mudanças internas que conduz a um aumento do tamanho acompanhado por mudanças nas características do objeto crescente” (obra citada, pp.31). Em suma, a autora está preocupada não apenas com acréscimos quantitativos de tamanho, mas também com as mudanças qualitativas que ocorrem no interior das firmas (em seus *recursos*) que possibilitam a diversificação de suas atividades (ou dos seus *serviços produtivos*). Para Penrose, as oportunidades de crescimento e de mudança qualitativa de determinada firma estão condicionadas à dotação daquilo que ela chamou de “recursos internos”, ou seja, seus ativos, sua base de conhecimentos e seu conjunto de competências, fatores que constituem a base para realização de suas atividades produtivas. Embora o ambiente exerça uma forte influência sobre as oportunidades e a direção do crescimento da firma, na visão da autora estas oportunidades estão condicionadas aos recursos e conhecimentos que ela possui. Em suas próprias palavras, “a taxa de crescimento de uma firma é limitada pelo aumento dos conhecimentos existentes nela (obra citada, pp. 21)”.

Penrose nos apresenta ainda uma possível explicação para a determinação da direção de crescimento da firma, que para a autora “pode ser analisada com referência à relação entre seus recursos e a percepção que ela tem de sua posição competitiva” (obra citada, pp. 37). Isto significa que a oportunidade de mudança qualitativa dos recursos internos da firma é em grande parte dependente do conjunto de conhecimentos e de competências já existentes. Assim, aquilo que a firma será no futuro é em grande medida dependente daquilo que ela é hoje. Isso, como pontuaram Freeman & Soete (1998) – neste caso, tendo como base países, mas de modo que podemos estender perfeitamente o raciocínio para as firmas - constitui um dos grandes dilemas do desenvolvimento:

“Nesta perspectiva, a diversidade internacional nos desempenhos de crescimento dos vários países serviu para mostrar a importância do desenvolvimento dependente de trajetórias, com suas muitas bifurcações e possibilidades de desenvolvimento “aprisionadas” (locked-in), por meio das quais algumas localizações industriais foram sendo “selecionadas desde cedo. Essas localizações podem ter exercido, a seguir, alguma “exclusão” competitiva (Arthur, 1988) de outros lugares pela apropriação das economias de aglomeração disponíveis. Com efeito, são os rendimentos crescentes, associados à industrialização e ao desenvolvimento, que tornam tão paradoxais as condições deste último. Um capital prévio é necessário para se produzir um novo capital; conhecimentos prévios são necessários para se absorverem novos conhecimentos; deve-se dispor de habilidades para se adquirirem novas habilidades; e um certo nível de desenvolvimento é requerido para se criarem as economias de aglomeração que tornam possível o processo de desenvolvimento. Em resumo, até certo ponto, faz parte da lógica da dinâmica do sistema que o rico fique mais rico, e que permaneçam e se ampliem as diferenças para os que são deixados para trás.” (Freeman & Soete, 1998, pp. 605).

Alguns autores identificaram este fenômeno como a “dependência da trajetória” no desenvolvimento das firmas (e dos países), que podemos entender como segue: as firmas trilham uma certa trajetória ou caminho de desenvolvimento de sua base de conhecimentos e competências, e há um forte elemento de irreversibilidade nos investimentos realizados nesta empreitada. Assim, as firmas em muitos pontos no tempo fazem compromissos de longo prazo, quase-irreversíveis com certos domínios de competências e conhecimentos, o que

limita as direções nocionais futuras que ela pode seguir em seu processo de desenvolvimento (Teece, Pisano & Shuen, 2000)¹¹.

O que uma firma sabe fazer hoje é função do que ela aprendeu ao longo da sua trajetória de desenvolvimento – ou seja, há cumulatividade na construção de novos conhecimentos. Além do mais, alterações na base de conhecimentos são custosas, porque exigem a dedicação de recursos, via de regra escassos, ao aprendizado. Assim, há uma tendência de que a composição do conjunto de competências da firma apresente uma forte continuidade ao longo do tempo e apresente algum grau de resistência a mudanças de longo alcance. As alterações realizadas na base de conhecimentos que a firma mobiliza para as atividades que realiza tendem a ser na maioria das vezes incrementais, embora evidentemente sujeitas a eventos de descontinuidade. Por isso, o comportamento das firmas ao longo do tempo apresenta um forte elemento de continuidade, se entendemos que seu comportamento é em grande medida determinado pelo seu conjunto de competências e por sua base de conhecimentos. No entanto, o impacto da experiência sobre as oportunidades de aprendizado é sempre não-determinístico, de modo que a dependência da trajetória tem limites claros. Uma firma pode realizar alterações de grande monta em sua base de competências e conhecimentos, mas, quão maior for a dimensão desta alteração, mais custosa, arriscada e demorada ela será (Pisano, 2000).

Uma outra contribuição importante do trabalho de Penrose foi o estabelecimento de relação entre as expectativas das firmas e as oportunidades de crescimento. As competências atuais de uma firma são um fator limitante para as suas oportunidades objetivas de crescimento. No entanto, as oportunidades subjetivas (ou potenciais) estão condicionadas por aquilo que a firma acha que pode realizar. Para Penrose, são as expectativas, e não os fatos objetivos, que constituem os fatores determinantes imediatos do comportamento de uma firma – estabelecendo aqui uma clara vinculação ao trabalho de Frank Knight, no sentido de que a intuição e a inferência têm papel fundamental na determinação do comportamento futuro.

Ao longo da trajetória de uma determinada firma, há interação entre a sua base de conhecimentos, sua capacidade de desenvolvimento de diferentes estratégias e seu desempenho na execução destas estratégias. A base de conhecimentos organizacional – que inclui elementos como princípios científicos, teorias, algoritmos, modelos conceptuais,

¹¹ Levinthal (1996) denominou de “armadilha de competências” o fato de uma empresa não conseguir reagir a alterações competitivas relevantes em seu segmento de atuação resultante de transições tecnológicas que tornam parte do seu conjunto de competências obsoleto.

técnicas de análises específicas ou técnicas experimentais, heurísticas e regularidades empíricas – tem uma influência profunda na escolha e no desempenho de diferentes estratégias de desenvolvimento (Pisano, 2002).

O conhecimento tecnológico consiste em complexos “pacotes” de informação, tanto formalizada quanto tácita. Mesmo quando estes “pacotes” são criados e moldados nas configurações necessárias para serem aplicados por firmas específicas, eles necessitam ser continuamente remodelados devido ao dinamismo do ambiente competitivo. As capacidades tecnológicas devem incluir competências para gerar e gerenciar estas mudanças (Bell & Pavitt, 1995).

Neste sentido, talvez o conceito mais central para balizar a construção de respostas às perguntas de pesquisa adotadas nestase seja o de capacidades dinâmicas (Teece & Pisano, 1994; Teece, Pisano & Shuen, 2002; Teece, 2007; Zollo & Winter, 2002). Teece & Pisano (1994), ao refletirem sobre os mecanismos de ganho e de retenção de vantagens competitivas pelasfirmas, notam que os vencedores no mercado global têm sido aquelas com capacidade de resposta rápida, oportuna e flexível aos desafios (ou, sob outra perspectiva, as oportunidades) que o ambiente impõe (ou oferece). Muitas vezes, estes desafios exigem o emprego de competências para a reconfiguração da base de conhecimentos e das habilidades, ou seja, competências voltadas a alterações no conjunto de competências. São estas justamente as capacidades dinâmicas.

Teece, Pisano & Shuen (2002) definem as capacidades dinâmicas como a habilidade de reconfigurar, redirecionar, transformar e apropriadamente modelar e integrar as competências-chave da organização com recursos externos e ativos complementares para lidar com os desafios de um ambiente tecnológico altamente dinâmico. Para os autores, a construção de capacidades dinâmicas robustas está fortemente relacionada ao estabelecimento de vantagens competitivas, especialmente em indústrias onde a mudança tecnológica é rápida.

O conceito de capacidades dinâmicas é duplamente apropriado aos propósitos deste trabalho por ressaltar dois aspectos fundamentais do problema de pesquisa que estabelecemos: o primeiro, referente ao emprego do termo *dinâmicas*, ressalta a necessidade de ferramentas para lidar com a natureza mutante de ambientes tecnológicos *de fronteira*, ou seja, nos quais não há tecnologias centrais e líderes estabelecidos. Segundo Teece (1988),

“certain strategic responses are required when time-to-market and timing is critical, the pace of innovation accelerating, and the nature of future competition and markets difficult to determine” (pp. 57).

Já o termo “*capacidades*” enfatiza a importância da gestão estratégica para apropriadamente adaptar, integrar e reconfigurar habilidades e recursos organizacionais frente a condições desafiadoras do ambiente.

Zollo & Winter (2002) adotam o conceito de capacidades dinâmicas para descrever um conjunto de mecanismos de aprendizado que incorpora tanto processos cognitivos de ação deliberada, relacionados com a articulação e a codificação do conhecimento coletivo, como processos relativamente mais passivos (“learning-by-doing”, por exemplo). Para os autores, o processo de aprendizado é responsável pela evolução de dois conjuntos de atividades organizacionais fundamentais para a sobrevivência das firmas: uma ligada ao seu funcionamento operacional, concebida como o conjunto de rotinas organizacionais; e outra dedicada à modificação destas rotinas, que identificamos com a noção de capacidades dinâmicas.

As capacidades dinâmicas são um padrão estável adquirido (via aprendizado) de atividade coletiva através do qual a organização sistematicamente gera e modifica as suas rotinas de operação em busca da melhoria do seu desempenho. As capacidades dinâmicas, de acordo com esta definição, atuam sobre as rotinas operacionais da firma – e, nesse sentido, podem ser concebidas como capacidades de “segunda ordem”. Enquanto as primeiras são inerentes à existência das organizações, as segundas são fontes importantes de vantagens competitivas: somente as capacidades dinâmicas são capazes de alicerçar mudanças sistêmicas de resposta a um ambiente em rápida transformação. Mais do que isso: como a transformação não é apenas rápida, mas também imprevisível e variável em sua direção, mesmo as abordagens de aprendizado que a firma desenvolve necessitam por vez ser adaptadas.

Zollo e Winter (2002) descrevem o processo de evolução do conhecimento organizacional da seguinte maneira: o início do processo se dá pela combinação de estímulos externos (como iniciativas de concorrentes, mudanças em normas e regulamentações ou ainda descobertas científicas, por exemplo) com informação gerada internamente derivada das rotinas organizacionais existentes, e pode envolver um elemento de criatividade substantivo.

À esta etapa inicial segue-se um processo de seleção interna de ideias. As hipóteses relacionadas às vantagens competitivas que serão obtidas a partir da aplicação das mudanças propostas são avaliadas através de um investimento coletivo na articulação, análise e debate sobre os méritos e os riscos ligados à iniciativa. A terceira fase é a replicação interna à organização, ou seja, a difusão e geração de novas informações que surgem quando as rotinas são aplicadas a novos contextos.

Teece (2018) ressalta que o núcleo do quadro conceitual das capacidades dinâmicas é a hierarquia de competências, que se divide em dois níveis: competências ordinárias (ou comuns) e capacidades dinâmicas que, por sua vez, dividem-se em competências de baixo nível (*microfoundations*) e competências de alto nível.

Figura 1: elementos-chave do quadro conceitual de capacidades dinâmicas

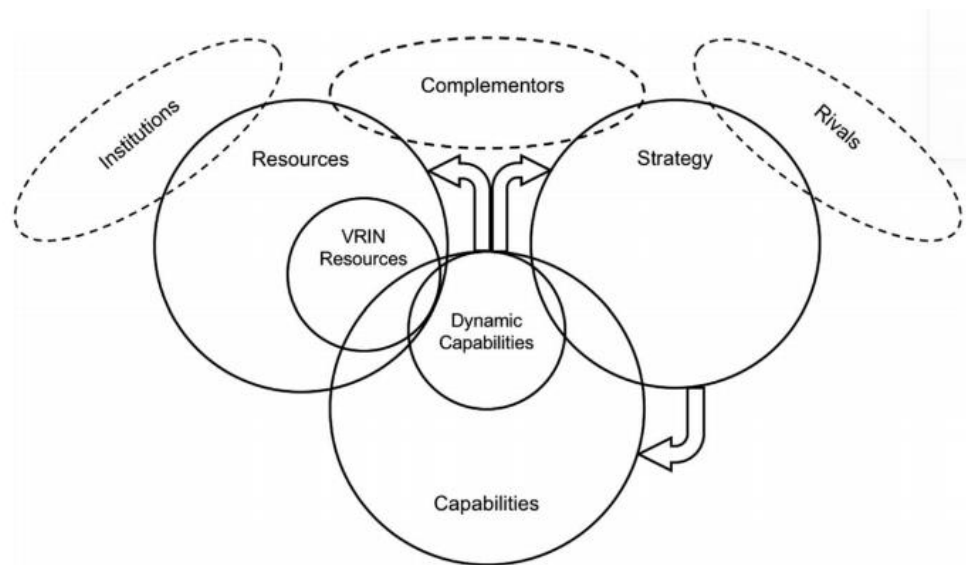


FIGURE 1. THE KEY ELEMENTS OF THE DYNAMIC CAPABILITIES FRAMEWORK
NOTE: A DASHED BORDER INDICATES ELEMENTS THAT ARE EXTERNAL TO THE FIRM. ARROWS REPRESENT MAJOR INFLUENCE.
VRIN = VALUABLE, RARE, IMPERFECTLY IMITABLE, AND NON-SUBSTITUTABLE

Fonte: extraído de Teece (2018).

O primeiro (e mais fundamental) nível é o das competências ordinárias, que compreende os processos que mobilizam pessoas, instalações e equipamentos para realizar as operações rotineiras da firma. Ter boas competências desta natureza permite à organização ser eficiente no presente, independentemente de o desenho organizacional atual, que inclui por

exemplo o plano de produção e o modelo de negócios, ser adequado para os parâmetros futuros de concorrência. Estas são as competências mais facilmente replicáveis, e que podem por vezes serem adquiridas no mercado.

As capacidades dinâmicas, por sua vez, dividem-se em dois níveis: o primeiro, denominado de *microfoundations*, engloba as capacidades dinâmicas *lower-level*, como competências para formar parcerias com entes externos ou para desenvolver novos produtos. Já as capacidades dinâmicas *higher-level* consistem em conjuntos de atividades e de modos de avaliação que canalizam outros recursos e recursos para manter a adequação ao ambiente em que a firma está inserida. Esta última categoria, por sua vez, pode ser dividida em três subconjuntos de competências: Detectar, Aprender e Transformar (Augier & Teece, 2009; Teece, 2012, 2016, 2018).

Figura 2: Competências ordinárias vs capacidades dinâmicas

	Ordinary (necessary) capabilities	Dynamic capabilities
Goals/ Purpose	Operational (Technical efficiency in basic business functions)	Strategic (Achieving congruence with technological opportunities and market needs)
Domain of applicability	Risk	Deep uncertainty
Mode of attainability	Buy or build (operational learning)	Build (dynamic learning and adjustment)
Tripartite schema	Operate, administer and govern	Sense, seize and transform
Key activities	Best practices	Signature (beyond best practice) processes and activities
Managerial emphasis	Static optimization	Entrepreneurial asset orchestration and leadership
Priority	Doing things right	Doing the right things
Imitability	Relatively imitable	Relatively inimitable
Tradability (thick markets)	Yes	No
Result	Efficiency and technical fitness / 'doing things right'	Innovation and evolutionary fitness / 'doing the right things'

Fonte: retirado de Teece (2017b)

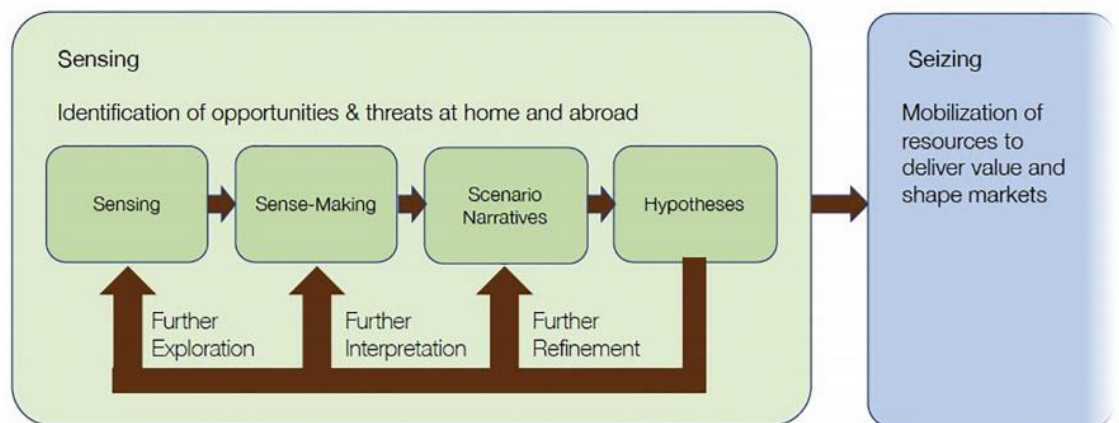
Detectar refere-se ao monitoramento do ambiente, que tem como resultado a coleta de informações não organizadas e dados não estruturados. Uma firma com alta capacidade de

detecção é capaz de adquirir sistematicamente, de forma contínua e confiável, informações estrategicamente relevantes do ambiente, incluindo tendências de mercado, melhores práticas e atividades dos concorrentes, ou seja, informações que estão localizadas externamente à organização. A detecção pode ocorrer por meio de diferentes canais, como o acompanhamento de literatura especializada ou a participação em redes de conhecimento, e pode ocorrer formalmente (por exemplo, em processos dedicados) ou informalmente (por exemplo, conversando com clientes) (Kump et al., 2016).

Competências de Aprendizado, por sua vez, estão relacionadas a quão rapidamente a firma consegue responder a oportunidades e ameaças que ela identifica ao processar os dados e informações que coleta na detecção. Com estas competências, a firma prioriza problemas a resolver e identifica oportunidades. A capacidade de apreender dentro de uma organização é alta se ela for capaz de decidir se determinado conjunto de informações têm valor potencial, de transformar informações valiosas em oportunidades concretas de negócios e de tomar decisões coerentes (Kump et al., 2016).

Estes dois conjuntos de competências constituem um processo que Teece (2016) denomina de *sensemaking*.

Figura 3: Capacidades dinâmicas: *sensemakingprocess*



Fonte: Baden-Fuller & Teece (2016)

Já Transformar compreende o conjunto de competências responsável por manter alinhados os elementos que compõe a organização, tanto entre si mesmos como em relação à estratégia organizacional. Uma organização com alta capacidade de transformação é capaz de

implementar de maneira consistente atividades de renovação de sua base de conhecimentos e competências, atribuindo responsabilidades, alocando recursos e garantindo que a força de trabalho possua o conhecimento necessário para se adaptar em tempo hábil a mudanças que ocorrem no ambiente competitivo no qual a firma está inserida. Segundo Teece (2018, pp. 365):

These capabilities (Transforming) are most critical when a new business model involves a significant change to the organization's design or conflicts with an existing business model. This is often the case, for example, when an established firm adopts a digital business model that risks cannibalizing existing sales. Minor transformations must also be made periodically to keep the organization aligned with its environment. Fostering an organizational culture that favors flexibility and experimentation, while challenging to bring about, can provide a firm foundation for quicker and easier transformations and, therefore, for future advantage.

Quadro-resumo 1: Capacidades dinâmicas de Transformação

Detectar	Identificação, desenvolvimento, co-desenvolvimento e avaliação de oportunidades e ameaças tecnológicas (“detecção de futuros desconhecidos”)
Aprender	Mobilização de recursos para atender às necessidades e oportunidades correntes, e capturar valor ao fazê-lo
Transformar	Renovação de competências e das tecnologias em face a alterações no ambiente competitivo.

Fonte: elaboração própria a partir de Teece, Peteraf & Leih, 2016

Cada um destes conjuntos de competências é essencial para que a firma seja sustentável no longo prazo, à medida que clientes, concorrentes e tecnologias mudam. O

desenvolvimento e a mobilização das competências de cada um dos conjuntos são contínuos ou semi-contínuos, mas não necessariamente sequenciais.

Teece, Peteraf & Leih (2016, pp.17) definem a flexibilidade ou agilidade que uma firma tem como a sua “capacidade de reimplementar / redirecionar de maneira eficiente e eficaz seus recursos para criar valor e proteger (e incorporar) atividades de maior rendimento, conforme as circunstâncias internas e externas o justifiquem”. Os fundamentos da agilidade (ou flexibilidade) organizacional baseiam-se principalmente em dois elementos interdependentes da firma: gestão empresarial capaz de combinar e recombina tecnologias; e estruturas flexíveis que podem ser rapidamente modificadas.

Segundo Teece, Peteraf & Leih (2016), os três conjuntos de capacidades dinâmicas supramencionados têm cada qual um papel muito específico em determinar o potencial de adaptação de uma firma ao ambiente que muda em função de desafios ou oportunidades emergentes:

- Agilidade emulada pela Detecção: Em ambientes caracterizados por profunda incerteza, as empresas devem **detectar** (‘sentir’) e / ou **gerar opções de crescimento antes que a lógica de mercado dessas opções se torne aparente para todos**. Os recursos de detecção generativa envolvem a realização de ações para criar proativamente hipóteses sobre as implicações futuras dos eventos e tendências observados, e testar essas hipóteses para embasar o desenvolvimento de novos produtos, serviços e modelos de negócios. De maneira semelhante, o processo de desenvolvimento de novos produtos requer ouvir atentamente os usuários e acompanhar os problemas dos clientes até suas bases mais profundas, reunindo várias disciplinas e perspectivas no processo. O conjunto de recursos para alcançar esse resultado inclui ferramentas como detecção generativa, criação de sentido, uso do planejamento de cenários e "compra" de opções reais.
- Agilidade emulada pelo Aprendizado: o conjunto de competências contidas em "Aprender" é utilizado na **implementação e realização de tarefas de modo a preservar a agilidade organizacional**, incluindo acordos flexíveis de fornecimento, criação de “ociosidade” na própria organização, reengenharia de hierarquias vinculadas a regras e adoção de processos abertos de inovação.

- Agilidade emulada pela Transformação: Nos últimos anos, novas metodologias promissoras foram desenvolvidas com o intuito de fornecer meios às organizações para **aumentar a agilidade no processo de adaptação (de tecnologias e estratégias, por exemplo) a condições cambiantes do ambiente**. Esta metodologia às vezes é denominada como "construir-avaliar-aprender". A ideia é que, ao estar inserido em um ambiente com alta incerteza, determinada firma pode construir o que se denomina produto mínimo viável (MVP), ou seja, uma versão de determinado produto com características de desempenho sub-ótimas, mas suficientes para que possa ser inserido prontamente no mercado, de modo que a firma possa rapidamente aprender o que funciona e o que não, fazer os ajustes adequados e lançar rapidamente uma nova versão, aprimorada. Esta metodologia, conhecida por vezes como “startup enxuta”, favorece a experimentação e o aprendizado com maior velocidade. Fracassar e rapidamente reagrupar os ativos para uma nova investida é, nesta metodologia, uma ferramenta de grande valor pelo aprendizado que proporciona. Esta metodologia reconhece que os planos de negócios têm utilidade limitada quando há alta incerteza. Ela supostamente elimina o desperdício de tempo e de recursos, desenvolvendo tecnologias de forma iterativa e incremental.

Contudo, a capacidade de adaptação ágil (ou flexível) não é automática, tampouco livre de custos à firma que a constrói e mantém. Segundo Teece, Peteraf & Leih (2016, pp. 13-14):

We suggest that when inflection points emerge, uncertainty is enhanced, and change is necessary for firms to remain competitive. However, because change is costly and achieving agility often involves sacrificing efficiency, one cannot assert that business firms should organize continuously for agility. Knowing when (and how much) agility is needed and being able to deliver it cost effectively is a crucial managerial capability (...) While the efficiency-flexibility tradeoff may never be eliminated, organizations with superior dynamic capabilities will know when to sacrifice efficiency for agility, and they should also be able to obtain more favorable agility/efficiency tradeoffs.

Quão mais dinâmico e incerto for o ambiente tecnológico no qual a firma está inserida, maior será a necessidade de agilidade organizacional, e mais a sobrevivência estará relacionada à adoção de uma estratégia coerente, de uma gestão empreendedora e à incorporação de fortes capacidades dinâmicas. O tipo de competência relacionada à agilidade (ou flexibilidade) que os gerentes (empreendedores) optam por incorporar e manter em suas organizações depende de sua estratégia e posicionamento no mercado. Dito isto, as firmas com fortes capacidades dinâmicas estão, tudo mais constante, em melhores condições para perceber oportunidades tecnológicas emergentes; além disso, elas alcançarão a agilidade necessária à sua sobrevivência com um menor sacrifício de eficiência. Isto ocorre porque elas serão melhores em Detectar, Apreender e Transformar (Teece, Peteraf & Leih, 2016).

Neste ponto, é importante pontuar que as capacidades dinâmicas podem ser analisadas separadamente à estratégia da firma, porém devem ser congruentes a esta. Uma estratégia consistente, coerente e promotora da inovação é tão vital quanto as capacidades dinâmicas para a obtenção de vantagens competitivas. Portanto, embora a estratégia e os recursos possam ser analiticamente separados, na prática, eles precisam ser desenvolvidos e implementados juntos (Teece, Peteraf & Leih, 2016).

Por fim, é preciso ressaltar que as competências organizacionais não são construídas no vácuo, mas sim em um contexto político e institucional específico, que molda e direciona o seu desenvolvimento.

Nos próximos capítulos, tendo como base a o conjunto de atividades contido no conceito de biotecnologia industrial, buscarei contribuir com a identificação das competências relacionadas à adoção de novas estratégias por empresas de base tecnológica quando o ambiente no qual estão inseridas passa a apresentar condições que ameaçam a sua sobrevivência. Mas, antes, é preciso definir e contextualizar o surgimento da revolução tecnológica que estou tratando.

Capítulo 2. A biotecnologia industrial como revolução tecnológica de base renovável

2.1 Introdução

Neste trabalho, seguindo a tradição da economia evolucionária (Nelson & Winter, 1982; Dosi, 1988; Metcalfe, 1995), o desenvolvimento tecnológico é compreendido como sendo motivado por benefícios econômicos (não necessariamente de curto prazo) e caracterizado como um processo não linear, evolucionário, tipicamente dependente da trajetória com muitas bifurcações e possibilidades de *lock-in*, no qual a história pregressa e eventos históricos são elementos explicativos importantes do ‘resultado final’. Além do mais, a direção e a taxa de progresso são endogenamente determinadas, através da estrutura de incentivos econômicos, do conhecimento e da expertise acumulados pelos agentes, bem como pelo ambiente sócio institucional (constituído por regulamentações, normas, valores e estilo de vida, dentre outros fatores) (Nelson & Winter, 1986; Freeman & Soete, 2008).

Como nos ensinaram Kemp & Soete (1992), as trajetórias de desenvolvimento de determinado paradigma se esgotam muitas vezes por limites que lhe são intrínsecos. Uma questão fundamental para a compreensão de como agem estes limites é o conceito de externalidade. Em economia, este conceito remete à ideia de que existem efeitos colaterais resultantes de determinada ação ou atividade econômica, com desdobramentos que atingem a sociedade (em alguns casos, de maneira localizada; em outros, de forma abrangente) (Buchanan & Stubblebine, 1962). Quando nos referimos a uma externalidade negativa, portanto, estamos fazendo alusão a efeitos secundários indesejáveis de determinada ação – como a poluição causada por algumas atividades industriais, por exemplo.

Importantes mudanças paradigmáticas estiveram relacionadas ao crescimento de externalidades negativas resultantes da expansão de paradigmas dominantes, que tornou sua manutenção insustentável. Kemp & Soete (1992) citam o caso do sistema de transporte por cavalos em Londres, cuja expansão fez com que se atingisse um ponto de ruptura – que os autores identificam como a quantidade de estrume nas ruas. Este ponto de ruptura impulsionou e acelerou a adoção na cidade inglesa do transporte por carros.

Neste sentido, pode-se dizer que o aquecimento do planeta para além de limites sustentáveis, como comprovam inúmeras evidências científicas que serão apresentadas de

modo mais detalhado a seguir, é uma externalidade negativa da expansão do uso de insumos e combustíveis fósseis para além de um limite considerado seguro, o que representa o esgotamento do atual paradigma tecnológico prevalente. As preocupações da humanidade com relação ao atual ‘estado da arte’ da indústria petroquímica incluem a sua excessiva dependência de energia e recursos não renováveis; processos produtivos que são danosos ao meio-ambiente por gerar produtos e resíduos tóxicos; produtos que não são prontamente recicláveis ou degradáveis após esgotamento da vida útil; e concentração geográfica excessiva da produção (Gravilescu & Chisti, 2005).

No entanto, ainda que o novo paradigma apresente vantagens consideráveis sobre uma ou mais dimensões do paradigma estabelecido, a transição pode ser atrasada (ou bloqueada) por barreiras técnicas, econômicas e institucionais, uma vez que as novas tecnologias não se beneficiam de efeitos de aprendizado e escala dinâmica dos quais se beneficiam as tecnologias estabelecidas, e por que o “ambiente de seleção” está adaptado ao antigo regime (Kemp & Soete, 1992).

O caso da química baseada em recursos renováveis e, mais especificamente, da biotecnologia industrial, é em muitas medidas disruptivo em relação ao *status quo* do atual sistema de produção de energia e de produtos químicos (embora o grau de ruptura varie de acordo com o tipo de produto e de processo em questão), o que faz com que por vezes exista uma enorme oposição (nem sempre explícita) à sua disseminação – ao nível de custos e preços (como sistemas fiscais e tarifários que beneficiam os produtos de origem fóssil, por exemplo), mas também de padrões de consumo e produção e de infraestrutura¹². As novas firmas que surgem para explorarem as oportunidades tecnológicas emergentes com o novo paradigma frequentemente são muito pequenas, muito fracas ou muito inexperientes para confrontarem o *establishment*. Deste modo, os pioneiros que surfam uma nova revolução tecnológica são de fato desbravadores, e têm que lidar com o ônus da sua empreitada. Eles enfrentam as velhas rotinas e o “estado natural” das coisas em busca da introdução de novos padrões econômicos e sociais.

Se, por uma lado, a descoberta de novas reservas de petróleo e gás natural, somada à viabilização de sua exploração pelo avanço tecnológico, e a inercia comportamental

¹² É importante ressaltar que a oposição que certos grupos sociais têm à utilização de produtos da biotecnologia industrial tende a crescer conforme se desenvolvam produtos alimentícios ou que serão utilizados diretamente no corpo humano, algo que estava arrefecido enquanto o foco eram combustíveis e outras commodities, por motivos evidentes.

relacionada ao atual *status quo* fazem com que o esgotamento das trajetórias tecnológicas da petroquímica esteja sem dúvida situada no longo (ou longuíssimo) prazo, por outro, o aquecimento do planeta Terra coloca pressões significativas sobre os governos para que acelerem a adoção de alternativas tecnológicas ambientalmente mais sustentáveis. A transição para modelos de produção mais limpos está sendo dificultada, no entanto, porque o desenvolvimento de externalidades positivas (condições ambientais mais sustentáveis) a ela relacionadas tem sido obliterado pela reação de atores beneficiados com a manutenção da hegemonia do regime dominante. Assim, por exemplo, a ausência de penalizações significativas em todos os países importantes do mundo sobre a emissão de CO₂ (com o estabelecimento de uma taxa sobre a pegada de carbono de produtos industriais, por exemplo) é uma forma de atrasar a introdução de tecnologias que emitam pouco CO₂, mas que estejam em fases incipientes da sua curva de aprendizado – apresentando, portanto, parâmetros de eficiência pouco competitivos em condições ‘normais’ de concorrência¹³.

Estas dificuldades, e as respostas das firmas a elas, têm exercido um impacto fundamental no direcionamento das trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial, como veremos em detalhes no decorrer deste capítulo.

2.2 Dinâmica tecnológica da indústria química em perspectiva histórica

A indústria química é um interessante objeto de pesquisa na área da economia da ciência, da tecnologia e da inovação por quatro motivos principais: i) foi a primeira indústria baseada em ciência e intensiva em tecnologia a surgir e a se consolidar, ainda no século XIX ; ii) possui muitos exemplos do estabelecimento de vínculos entre a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico; iii) sua história ilustra o fato de que nem sempre o pioneiro no desenvolvimento de um novo produto ou processo é aquele que vai se aproveitar dos benefícios econômicos da sua difusão; e por que iv) muitos de seus produtos são insumos

¹³ O Brasil deu recentemente um passo importante nesta direção com a aprovação do Renovabio na Câmara dos Deputados. Esta política consistirá em um mecanismo que gera um ativo financeiro para os produtores de biocombustíveis, como etanol, biodiesel, biogás ou bioquerosene, proporcional ao volume produzido e que se baseia em critérios de eficiência. Quem fabrica biocombustíveis terá direito a Créditos de Descarbonização (CBIOS), títulos negociados em bolsas que constituirão uma nova fonte de renda para o setor. Já as distribuidoras serão obrigadas a comprar esses papéis em quantidade correspondente a sua participação no mercado de combustíveis fósseis. O MME projeta um crescimento do interesse privado na indústria de biocombustíveis e prevê investimentos de R\$ 90 bilhões até 2030 apenas na produção de bioetanol como resultado da política (Marques, 2018 a)

intermediários em outras cadeias produtivas, o que significa que inovações geradas nos departamentos de P&D das suas firmas têm o potencial de transbordar para outros setores, com implicações importantes para a economia como um todo (Arora, Landau & Rosenberg, 1998).

Especificamente, para os propósitos deste trabalho, entender a dinâmica da evolução tecnológica da indústria química em perspectiva histórica, em especial dos seus determinantes, é importante para daí depreender possíveis elementos de continuidade e de ruptura que podem ser úteis na análise das oportunidades e dos desafios relacionados à emergência da química de base renovável, na qual a biotecnologia pode ter um papel de destaque.

A origem da indústria química remonta ao século XIX – mais especificamente, à década de 1850s, quando a Grã-Bretanha passou a fabricar corantes sintéticos em escala industrial. Hoje, a indústria química possui mais de 70.000 produtos em estágio comercial, o que demonstra a pujança da sua capacidade de desenvolvimento. É uma das principais indústrias de muitos países desenvolvidos e de alguns em desenvolvimento, como na China e mesmo no Brasil. Atualmente, o Brasil possui a sexta maior indústria química do mundo (atrás de China, EUA, Japão, Alemanha e Coreia do Sul, respectivamente), com vendas totais de US\$4.250,4 bilhões (exclusive farmacêutica) (Fonte: Abiquim).

Durante os séculos XIX e XX, a indústria química foi marcada por avanços consistentes de produtividade, pautados na geração e na incorporação de novos conhecimentos e tecnologias aos seus processos produtivos. Uma mudança que ilustra esse fato foi a passagem da produção por lotes para a produção em fluxo contínuo, o que permitiu a obtenção de economias de escala na construção das instalações e no custo de mão de obra no manejo de materiais. Esta mudança só foi possível pela utilização de conhecimentos científicos oriundos da físico-química em complemento ou em substituição aos conhecimentos puramente empíricos e de engenharia mecânica até então predominantes (Freeman & Soete, 2008).

Por outro lado, a evolução da indústria química também está intimamente relacionada a inovações de caráter organizacional. A incorporação sistêmica de novos conhecimentos de ciência e de tecnologia aos processos industriais só se tornou possível pela organização de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento internos às firmas do setor, algumas das quais pioneiras neste tipo de organização, em um movimento que se iniciou na Alemanha e que se

disseminou posteriormente para outros países. Outra contribuição importante dos alemães ao desenvolvimento da indústria química foi a integração da produção de componentes químicos intermediários a produtos finais e a ênfase na criação de capacitação para construção e reparo de instalações e equipamentos. Estas características, quando somadas, fizeram com que a indústria química se tornasse uma das mais intensivas no uso e geração de conhecimento em seus processos produtivos (Freeman & Soete, 2008).

Um movimento importante que marcou o desenvolvimento da indústria química, especialmente nos séculos XIX e XX, foi a alteração da liderança tecnológica e comercial entre atores e países. O segmento de corantes é um bom exemplo desta dinâmica. Embora tenha sido um país pioneiro na produção de corantes sintéticos em escala industrial, com forte vinculação às necessidades da sua pujante indústria têxtil, a Grã-Bretanha não foi capaz de assegurar a liderança comercial neste segmento por muito tempo. Em 1880, a Alemanha já dominava a produção de corantes, inclusive tecnologicamente, respondendo por 1/3 da produção mundial. Na década de 1900, a participação deste país chegou a 4/5 (Freeman & Soete, 2008; Rosenberg, 1998).

No entanto, foi nos Estados Unidos que a indústria química assumiu seus atuais contornos. A alteração do centro de gravidade da fabricação de produtos químicos orgânicos da Alemanha para os EUA esteve relacionada às diferentes trajetórias de aprendizado subjacentes a cada país, e às dependências tecnológicas que elas engendram. Os Estados Unidos, até a primeira guerra mundial, fabricavam praticamente apenas produtos químicos inorgânicos, e dependiam da importação de produtos de maior complexidade da Alemanha. O advento da I Guerra Mundial alterou radicalmente este quadro, com o surgimento de fortes restrições ao comércio internacional entre estes dois países. Os EUA, então, se viram obrigados a desenvolver a fabricação de químicos orgânicos para atender a sua demanda interna (Landau, 1998).

O desenvolvimento da indústria química estadunidense desde então esteve fortemente ligado ao da indústria da exploração e refino do petróleo e do gás natural, matérias-primas abundantes naquele país. Isto deu origem ao desenvolvimento de processos petroquímicos altamente integrados, de operação em larga escala e de fluxo contínuo, com a obtenção de significativas economias de custo. Para isto, os Estados Unidos se valeram de uma importante inovação: a exploração e a disseminação de novo conhecimento, oriundo de uma disciplina na qual o país foi pioneiro: a Engenharia Química (Rosenberg, 1998; Mowery & Rosenberg, 1998).

A liderança que este país estabeleceu no refino do petróleo no período entre guerras forneceu os conhecimentos necessários e as habilidades em engenharia que proporcionaram as bases para a construção de uma nova indústria que prescindia do uso do carvão como principal matéria-prima. A indústria petrolífera foi importante não só por fornecer insumos, mas, principalmente, por influenciar a direção da pesquisa, do desenvolvimento e da comercialização de novos produtos na indústria química, estadunidense, num primeiro momento, e depois mundial. Evidentemente, o advento da indústria automobilística e a consequente explosão da demanda por gasolina tiveram um papel fundamental no desenvolvimento da indústria petroquímica (Mowery & Rosenberg, 1998).

Já a Alemanha, país rico em carvão mineral - mas relativamente pobre em petróleo - e com preocupações relacionadas à dependência de recursos externos, especialmente em face de sua entrada na Primeira Guerra Mundial (1914-19), desenvolveu uma indústria química “voltada para dentro”, que utilizava basicamente recursos internamente disponíveis, com produção em pequena escala e operação por lotes, o que resultava em custos relativamente maiores. Como o problema da operação em larga escala não estava no horizonte das suas firmas, a divisão do trabalho entre químicos e engenheiros mecânicos era muito bem demarcada, com o segundo grupo sendo invariavelmente o único responsável pelo desenvolvimento de novas tecnologias de processo. Essa fratura se refletiu na baixa integração entre o desenvolvimento de tecnologias de processo e de produto naquele país, ao contrário do que aconteceu na indústria química estadunidense (Mowery & Rosenberg, 1998).

Ainda com relação à dinâmica tecnológica da indústria química, é importante ressaltar que os seus produtos são utilizados como insumos em muitas outras cadeias produtivas, como na agricultura, na automobilística, na indústria de cosméticos, na de embalagens e na construção civil, para citar apenas algumas. Isto significa que esta indústria possui alta capacidade de geração de transbordamentos inovativos, especialmente por sua alta intensidade tecnológica. De fato, avanços em muitas indústrias, como a têxtil, estiveram fortemente relacionados às inovações que se originaram na indústria química, frequentemente nos laboratórios de pesquisa das grandes firmas. No entanto, embora este imbricamento seja um fator de impulso dinâmico importante, isto significa que esta indústria é altamente sensível às condições gerais da economia, como às expectativas, às preocupações ambientais e ao perfil de consumo da sociedade (Antunes, Galera & Rubinstein, 2011).

2.3 A indústria química e a questão ambiental

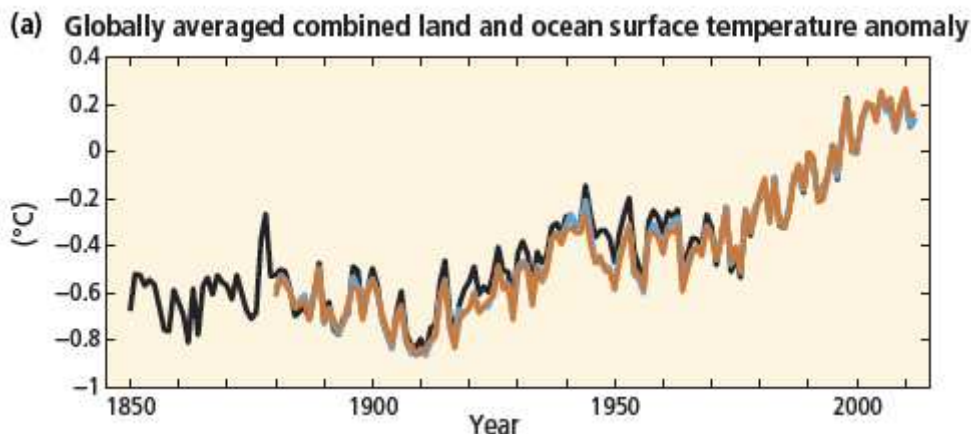
O uso de termos como ‘bioeconomia’, ‘economia verde’ e ‘*biobased-society*’ está se disseminando em diversos países e em diversos fóruns ao redor do mundo. Vinculado ao ganho de importância destes conceitos, há um crescente interesse da sociedade pelo desenvolvimento de uma economia mais limpa, que esteja baseada em atividades consonantes com princípios do desenvolvimento sustentável e da justiça social e ambiental.

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), um corpo internacional de cientistas voltado à avaliação e divulgação de conhecimento sobre o aquecimento global, há fortes evidências do impacto crescente das ações humanas sobre o clima no Terra, com efeitos observáveis sobre todos os continentes e oceanos. Segundo o órgão, estabilizar o aumento de temperatura para menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais – o limite considerado seguro - requer uma mudança fundamental e urgente na maneira de se produzir e consumir. Quanto mais nós esperarmos para agir, maiores serão os desafios tecnológicos, econômicos e institucionais que deverão ser enfrentados, e maiores serão os custos de fazê-lo (IPCC, 2014). Nas palavras do IPCC:

“(...) nearly all systems on this planet would be affected by the impacts of a changing climate, and that it is not possible to draw boundaries around climate change, its associated risks and impacts on the one hand and on the other, development which meets the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet their own needs” (IPCC, 2014, pp. vii)

Há diversas evidências científicas de que o aquecimento global é um fenômeno real, em pleno avanço. Segundo o IPCC, cada uma das últimas três décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer década anterior (desde 1850). O período de 30 anos de 1983 a 2012 foi provavelmente o mais quente nos últimos 1400 anos no Hemisfério Norte, onde tal avaliação é possível devido aos dados disponíveis. Os dados combinados globais de temperatura da superfície terrestre e oceânica calculados por uma tendência linear mostram um aquecimento de 0,85 [0,65 a 1,06] ° C no período de 1880 a 2012 (IPCC, 2014).

Figura 4: Temperatura de superfície (terra e oceanos) média, 1850-2012



Fonte: extraído de IPCC (2014)

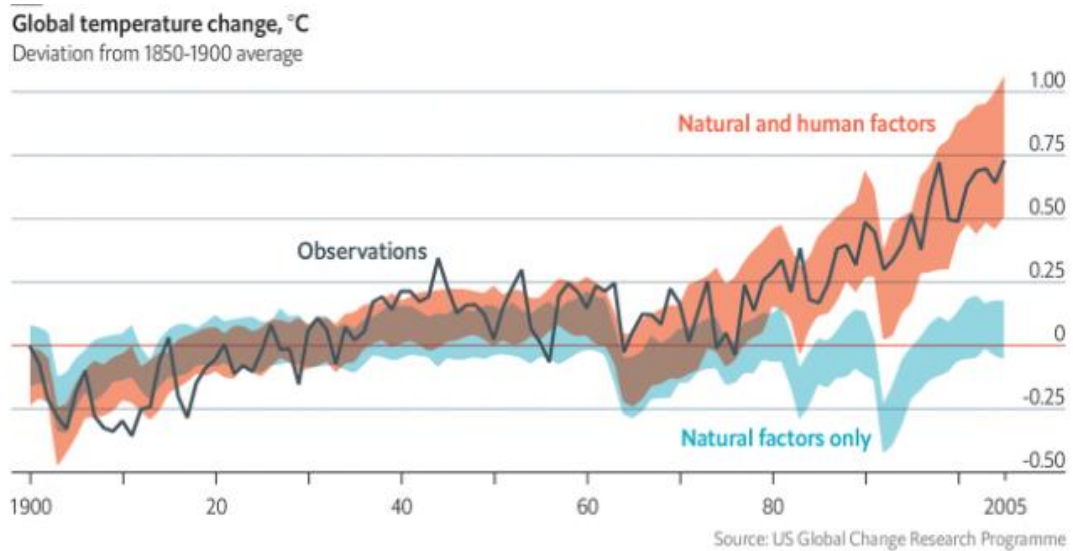
Mais do que isso, há evidências científicas consistentes de que o aumento da temperatura global e outros efeitos observáveis como o aumento do nível e a acidificação dos oceanos são resultado direto das ações humanas, como a produção industrial de bens de consumo, a expansão do sistema de transporte baseado no uso de combustíveis fósseis, a produção de alimentos e o desmatamento. Como atesta o IPCC:

Anthropogenic greenhouse gas emissions have increased since the pre-industrial era, driven largely by economic and population growth, and are now higher than ever. This has led to atmospheric concentrations of carbon dioxide, methane and nitrous oxide that are unprecedented in at least the last 800,000 years. Their effects, together with those of other anthropogenic drivers, have been detected throughout the climate system and are extremely likely to have been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century.

Uma matéria publicamente recentemente na revista *The Economist* corrobora o argumento de que o aquecimento global é consequência direta da ação humana. Segundo a revista, em 1900, a queima deliberada de combustíveis fósseis - quase inteiramente, na época, carvão - produziu cerca de 2 bilhões de toneladas de dióxido de carbono. Em 1950, as emissões industriais eram três vezes maiores. Hoje eles são quase 20 vezes maiores (*The Economist*, 2019). Os gráficos abaixo, retirados desta mesma reportagem, mostram,

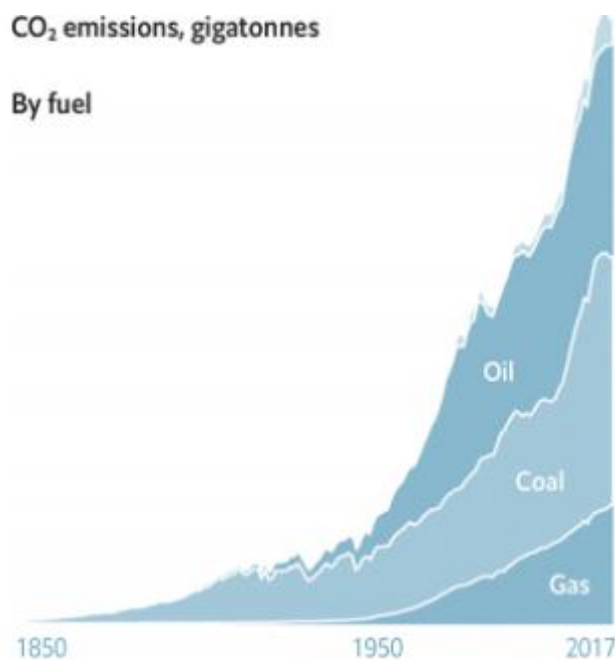
respectivamente, o resultado de um modelo sobre o aquecimento do planeta que reflete o impacto direto da ação humana; e a evolução da emissão de CO₂ atribuída insumos e combustíveis fósseis:

Figura5 – Aumento da temperatura global e impacto da ação humana



Fonte: extraído de The Economist (2019) The past, present and future of climate change.

Figura6 – Emissão de Co₂, por combustível, 1850-2017



Fonte: extraído de The Economist (2019) The past, present and future of climate change.

Enfrentar os desafios de manter condições adequadas de vida no planeta Terra, para esta e para as próximas gerações, envolve a criação de novas maneiras de produzirmos e consumirmos bens materiais, alimentos e energia. Como forma de enfrentar o aquecimento global antropogênico, diversos países assinaram na 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) um acordo conjunto de enfrentamento ao aquecimento global que ficou conhecido como o “Acordo de Paris”. O Acordo tem como objetivo central fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países signatários em lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. O compromisso firmado entre os membros estabelece metas individuais para que o aumento da temperatura média global se mantenha abaixo de 2°C em comparação aos níveis pré-industriais, e envida esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Como parte do Acordo, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma

participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (Ministério do Meio Ambiente)¹⁴. Uma outra iniciativa interessante recente, ocorrida nos EUA, ficou conhecida como *Green New Deal*, um conjunto de medidas que, inspirado no *New Deal* dos anos 1930, objetiva abordar, simultaneamente, mudanças climáticas e a desigualdade econômica naquele país¹⁵.

O aquecimento global e os eventos climáticos extremos a ele relacionados batem à porta e nos lembram dia a dia que novas maneiras de transportarmos e produzirmos se fazem necessárias. O desenvolvimento de novas tecnologias, que sejam ambientalmente adequadas, é a principal força motriz por detrás da criação de uma economia mais limpa e sustentável. Uma das principais vertentes de desenvolvimento destas tecnologias é a substituição de insumos produtivos poluentes e finitos, como o petróleo e seus derivados, por matérias-primas renováveis, capazes de diminuir os impactos da atividade industrial sobre as condições de vida no planeta no médio e longo prazo¹⁶.

O desenvolvimento e a adoção de tecnologias renováveis em complemento ou substituição às petroquímicas deveria ser um objetivo primordial de qualquer país seriamente comprometido com um futuro mais alvissareiro para as novas gerações no que concerne à preservação do meio-ambiente e das condições de vida.

¹⁴ Em outubro de 2019, o Observatório do Clima, rede que reúne entidades da sociedade civil para discutir a questão das mudanças climáticas no contexto brasileiro, divulgou estudo segundo o qual o Brasil não deverá cumprir nem mesmo a meta mais generosa que se impôs para 2020 na Política Nacional sobre Mudança do Clima, criada para lidar com os compromissos assumidos pelo país no Acordo de Paris. Segundo o cálculo apresentado, na melhor das hipóteses o Brasil terminaria 2020 com emissões de carbono 2,3% maiores do que o compromisso menos ambicioso da política nacional, e 7% superiores ao compromisso mais ambicioso (Fonte: http://www.observatoriodoclima.eco.br/brasil-nao-deve-cumprir-nem-meta-menos-ambiciosa-no-clima/?fbclid=IwAR2pxMyuOrXrXf-MiuJoeZ0MLuOWAzK8Ot8pvxk_WI8RthpakJcp4Q5yiEg). Acesso em 07/10/2019.

¹⁵ Mais informações sobre quais diretrizes poderiam pautar um conjunto de políticas desta natureza mas, neste caso, de alcance global, podem ser encontradas no artigo “Wanted: A Global Green New Deal”, do economista Joseph E. Stiglitz, disponível em: <https://www.project-syndicate.org/onpoint/no-alternative-to-carbon-neutrality-green-new-deal-by-joseph-e-stiglitz-2019-10>.

¹⁶ Em 2011, aproximadamente 6,1 bilhões de toneladas de carvão sólido foram usadas em todo o mundo e 1 bilhão de toneladas de carvão marrom. Desde 2000, o consumo global de carvão cresceu mais rapidamente do que qualquer outro combustível. Hoje, os cinco maiores usuários de carvão - China, EUA, Índia, Rússia e Japão - respondem por 77% do uso global total de carvão. O carvão tem sido a principal fonte de energia nos EUA, mas nos últimos anos tem enfrentado forte concorrência de alternativas mais baratas e limpas. Há uma década, as usinas a carvão forneciam metade da eletricidade do país. Hoje, o carvão é responsável por menos de um terço e - após um enorme boom na extração de gás de xisto - ficou para trás do gás natural como o principal combustível da geração de eletricidade. Fonte: The Wall Street Journal 2018. EPA Head Signs Proposal to Undo Restrictions on Coal Plants. Disponível em <https://www.wsj.com/articles/epa-head-signs-proposal-to-undo-restrictions-on-coal-plants-1534803381?mod=e2fb>. Acesso em 21/08/2018

Aqui é importante ressaltar que a importância das contribuições da indústria química à melhora das condições de vida da humanidade ao longo dos últimos séculos é algo inegável. A indústria química está presente no dia a dia de praticamente todas as pessoas do mundo, fornecendo produtos que tornam a vida mais fácil, segura e confortável, como materiais com propriedades até então inexistentes, produtos que possibilitam a produção mais eficiente e mais barata de alimentos e combustíveis de baixo custo, para citar apenas alguns poucos exemplos.

No entanto, a indústria química e petroquímica está sob forte pressão da sociedade para que adote métodos produtivos mais sustentáveis devido à sua excessiva dependência de recursos fósseis, à emissão de gases de efeito estufa (GEE) e a preocupações relacionadas à poluição ambiental causada direta ou indiretamente por suas operações. A indústria química é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de GEE e grande quantidade de resíduos perniciosos, incluindo plásticos não degradáveis que frequentemente são retratados como grandes poluidores dos oceanos (Yu, Wu & Chen, 2019). Estes fatores corroboram a busca da indústria química e petroquímica por processos ‘verdes’, que sejam capazes de preservar os ganhos de eficiência obtidos e transferidos à sociedade há muitos anos, mas que também possam dar uma resposta adequada à demanda social por uma indústria mais coerentes com a manutenção da qualidade de vida no planeta.

Por possibilitar o desenvolvimento e utilização de produtos e processos mais sustentáveis, a consolidação de tecnologias renováveis para produção de materiais e insumos químicos pode ser uma parte importante da resposta aos desafios ambientais e de segurança da indústria de maneira geral, e da indústria química de maneira particular (Gavrilescu & Chisti, 2005).

Assim como no passado o advento da fabricação de produtos químicos a partir do petróleo e do gás natural, em substituição ao carvão, esteve no centro de um movimento que alterou a hierarquia produtiva e inovativa na indústria química, o surgimento e ganho de importância da química de base renovável e, em especial, da biotecnologia, pode representar um impulso dinâmico de remodelação do setor.

A química de base biotecnológica¹⁷ temo potencial para reduzir o consumo de insumos petroquímicos e, teoricamente, substituí-los totalmente. Especificamente, a biotecnologia

¹⁷ Aqui é preciso fazer uma ponderação conceitual. O termo “química verde” é utilizado para descrever tecnologias e práticas destinadas à redução da pegada ambiental da indústria química. Isto inclui esforços

industrial está focada no uso de processos fermentativos alimentados por matérias-primas renováveis.

O mercado para produtos de base biológica (derivados de energias renováveis, não necessariamente à base de fermentação, excluindo biocombustíveis) é estimado globalmente em 50 bilhões de quilos por ano e prevê-se que esse volume cresça significativamente nos próximos anos. O crescimento de produtos de base biológica está ocorrendo a uma taxa de 3% a 4% ao ano em todo o mundo. Em 2013, somente os Estados Unidos geraram US \$ 126 bilhões em vendas diretas de produtos de base biológica (Sanford et al., 2016). Há uma estimativa de que, em 2090, 90% dos combustíveis utilizados no país seja de base biológica (Olguín et al., 2017).

O mercado global de bioprodutos (excluindo biofármacos) expandiu-se de US\$ 224 bilhões em 2013 para US\$ 282 bilhões em 2016 e deve atingir US\$ 477 bilhões em 2021, o que corresponde a uma taxa de crescimento anual composta de 11,1%. O valor do mercado global de bioquímicos (novamente, excluindo fármacos) era de US\$ 8,8 bilhões em 2018 e está previsto atingir US \$ 24,0 bilhões em 2025 (Gao, Song & Guo, 2020).

Para dar exemplos mais concretos de desenvolvimento do mercado de bioprodutos, em 1929, a Pfizer começou a produzir ácido cítrico através de um processo fermentativo utilizando o microrganismo *Aspergillus niger*. Hoje, o ácido cítrico é um produto químico produzido exclusivamente usando micróbios. Estima-se que 1,5 milhão de toneladas sejam produzidas usando aproximadamente o mesmo processo desenvolvido em 1929, e o produto químico é vendido por menos de US \$ 0,80 / kg. Nos setenta anos seguintes, outros produtos químicos produzidos biologicamente seguiriam o processo de sucesso do ácido cítrico. Ácido glucônico, ácido itacônico, ácido láctico e 1,3-propanodiol são todos produtos químicos comercializados globalmente produzidos primordialmente através de biotecnologias. Atualmente, continua sendo mais caro produzir cada um desses compostos por rota petroquímica do que biologicamente (Dietrich, 2014).

inovativos voltados à criação de tecnologias revolucionárias (que podem, por sua vez, envolver biotecnologias), mas não se limita a estes. Melhorias incrementais aplicadas à petroquímica que reduzam ou eliminem a geração de poluentes e de substâncias perigosas, por exemplo, ou ainda que aumentem a eficiência energética, também compõe o conceito. Neste sentido, pode-se entender que a química verde, de certo modo, denota um conjunto de esforços da indústria petroquímica e química de base fóssil para se adaptar às demandas sociais por sustentabilidade produtiva, sem contudo ter que incorrer em mudanças radicais em suas tecnologias e em suas competências.

A indústria química tem caminhado rumo a um modelo mais sustentável (o que inclui a biotecnologia industrial, mas vai além dela) motivada por diferentes *drivers*. Um importante impulso ao campo se deu com o advento de regulações voltadas à diminuição do efeito deletério da produção e utilização de substâncias químicas. Nos EUA, por exemplo, diversos problemas ambientais e de saúde causados pelo lançamento descontrolado de produtos químicos no ambiente fizeram com que fossem criados paulatinamente, a partir da década de 1970, instrumentos legislativos para ameniza-los, como o Clean Air Act (1970), o Safe Drinking Water Act (1974) e o Emergency Planning and Community Right-to-Know Act (1986).

Tomando como medida o potencial de impulsão do desenvolvimento de produtos e processos verdes na química e na petroquímica (por intermédio ou não da biotecnologia), talvez a legislação mais importante nos EUA tenha sido o Pollution Prevention Act (1990), que estabeleceu uma política ambiental nacional na qual o princípio norteador foia prevenção da formação de resíduos na fonte, ou seja, nos locais onde os bens são produzidos (Anastas & Warner, 1998). Na Europa, a legislação em vigor mais importante para impulso à química renovável provavelmente seja a REACH (EC 1907/2006), cujo foco está na responsabilização da indústria pelo risco inerente à produção, transporte e utilização de substâncias químicas, através da obrigatoriedade do seu registro, avaliação, autorização e do estabelecimento de restrições (de transporte e consumo, por exemplo) para os produtos considerados perigosos (European Commission).

Estas regulamentações tiveram um importante papel no direcionamento dos esforços de pesquisa e desenvolvimento da indústria química, uma vez que diminuíram (ou mesmo inviabilizaram) a competitividade de processos produtivos e produtos de alta periculosidade ou altamente poluentes. Aos esforços industriais que tomaram corpo na década de 1990, em especial nos Estados Unidos, na Inglaterra e na Itália, somaram-se esforços de instituições como a International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) para estabelecimento de diretrizes para o desenvolvimento da química renovável em nível mundial (CGEE, 2010).

Como desdobramento das preocupações com o meio-ambiente e com a saúde humana decorrentes da produção de químicos de base fóssil, observamos atualmente uma proliferação de iniciativas mundiais voltadas ao desenvolvimento de produtos e processos renováveis na indústria química – o que, novamente, pode ou não incluíra biotecnologia. A humanidade tem usado processos biotecnológicos para produzir alimentos e outros bens desde o Neolítico. No

entanto, nossa habilidade de manipular o genoma microbiano revolucionou a aplicação da biotecnologia aos processos industriais, estimulando a inovação. Na maioria dos casos, as ferramentas da biotecnologia têm permitido à indústria desenvolver novos processos que são mais limpos e melhores para o meio-ambiente a um menor custo econômico (Erickson,B; Nelson, J. E. & Winters, P., 2012).

Esta seção apresentou princípios norteadores do surgimento de tecnologias renováveis na indústria química. A próxima seção trata propriamente das trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial, que é uma das principais vertentes de ganho de sustentabilidade da indústria química.

2.4Trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial

A produção de biocombustíveis e químicos renováveis por via biotecnológica é pauta de esforços de pesquisa ao menos desde o início do século XX, quando o químico britânico Chaim Weizemann (1874–1952) desenvolveu um processo fermentativo para a produção de químicos orgânicos, como a acetona (Wei, 2012). No entanto, as origens da biotecnologia industrial moderna, em termos do início da formação da base de conhecimentos de suporte a empreendimentos inovativos, são muito mais recentes: seu início pode ser datado na década de 1970, com o desenvolvimento de um conjunto de técnicas denominado DNA recombinante¹⁸.

O surgimento deste arcabouço de novas ferramentas, cujo principal marco é o depósito de uma patente nos EUA em 1974 (concedida em 1980) por dois pesquisadores da Universidade de Stanford - Stanley Cohen e Herbert Boyer¹⁹, deu origem a muitas oportunidades para desenvolvimento de novas tecnologias em diferentes setores, a partir da manipulação do genoma de microrganismos de interesse industrial (Nascimento et. al, 2003).

¹⁸ A tecnologia do DNA recombinante, criada na década de 1970, é na verdade um conjunto de técnicas derivadas de disciplinas como microbiologia, bioquímica, imunologia e genética microbiana. Estas ferramentas permitem a construção de mecanismos de replicação e expressão gênica baseados na determinação da sequência de um gene e consequentemente da proteína que ele codifica, ou no desenvolvimento de culturas microbianas capazes de produzir substâncias úteis tais como a insulina humana, hormônio de crescimento, vacinas e enzimas industriais em grandes quantidades. Fonte: Nascimento et al. (2003).

¹⁹Herbert Boyer foi posteriormente um dos fundadores da Genentech, *startup* que se tornou um dos principais expoentes do desenvolvimento de fármacos com base na aplicação de biotecnologias.

No que tange aos projetos mais recentes da biotecnologia industrial, embora seja amplo o espectro de possíveis produtos a serem gerados a partir de tecnologias desenvolvidas com base nas técnicas de DNA recombinante, as trajetórias tecnológicas do setor inicialmente convergiram principalmente para o desenvolvimento da produção em larga escala de biocombustíveis, em razão dos esforços de alguns governos, como do Brasil e dos EUA, de diminuir a dependência de fontes fósseis—imperativo que foi refletido no design das políticas implementadas para fomento ao desenvolvimento da produção de renováveis, como o *Renewable Fuels Standard* (RFS)²⁰.

A indústria química consiste basicamente de quatro subsectores: químicos básicos; especialidades químicas; produtos de cuidado pessoal e produtos das “ciências da vida”. As duas últimas categorias frequentemente são classificadas como indústrias à parte (indústria de produtos de higiene e cuidados pessoais e indústria farmacêutica). A biotecnologia impacta todos estes setores, mas a níveis diferentes²¹. Os químicos básicos (ou commodities) representam um mercado maduro, uma vez que os produtos mais vendidos desta categoria atualmente são praticamente os mesmos da década de 1970 (Gorayeb et al., 2013). A produção destes produtos, assim como de combustíveis, é realizada em grandes plantas, de largos volumes, que operam utilizando processos contínuos, de alta intensidade energética, e com baixas margens de lucro. A produção de commodities químicas é altamente cíclica, o que significa que seus resultados são impactados diretamente pelo comportamento geral da economia, o que gera flutuações na utilização da sua capacidade produtiva. Como os produtos deste setor são geralmente utilizados em aplicações em outros setores industriais (como na indústria de papel e celulose, no refinamento de petróleo ou na recuperação de metais, por exemplo) e como matérias-primas para produção de outros químicos e produtos de consumo (como têxteis ou automóveis), flutuações na demanda destes setores ‘clientes’ impactam diretamente o desempenho do setor de commodities químicas.

Já as especialidades químicas são tecnologicamente mais avançadas e utilizadas em volumes muito menores do que as commodities. Exemplos de especialidades incluem adesivos e selantes, catalisadores, tinturas e aditivos plásticos. São segmentos de altas

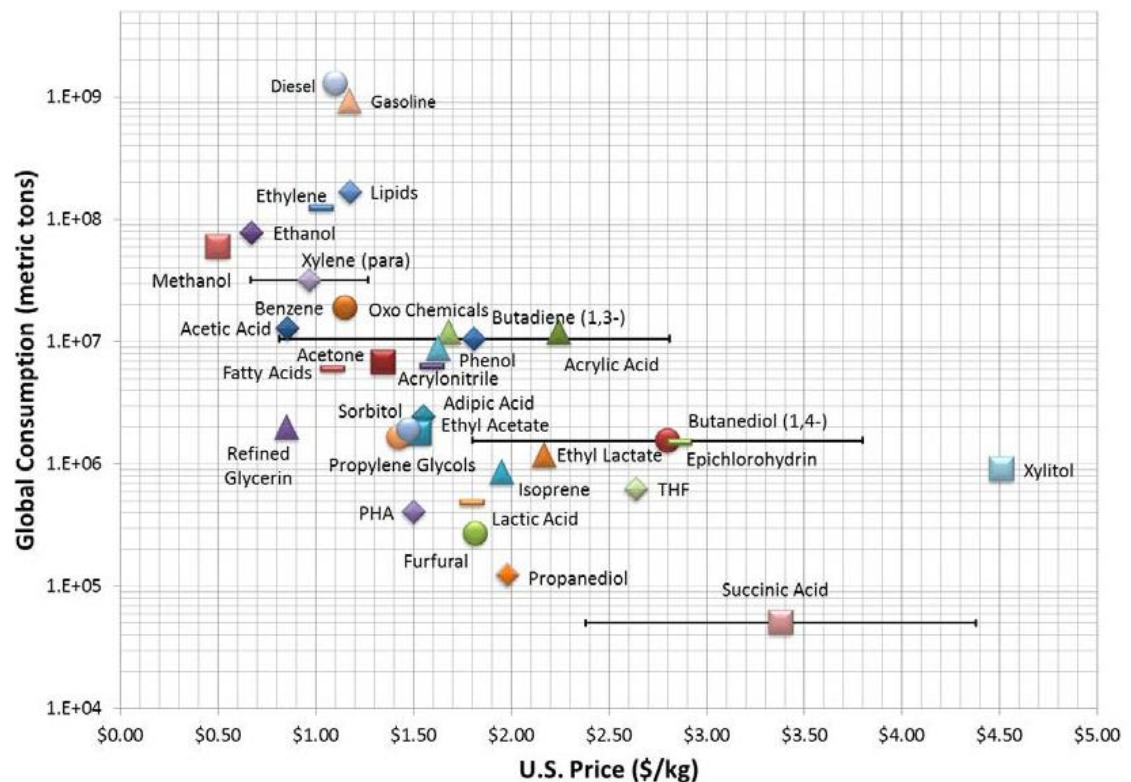
²⁰ O Renewable Fuels Standard é a principal política estadunidense (e talvez mundial) de fomento ao desenvolvimento da produção de biocombustíveis. Constitui em um mandato para que refinarias e importadores de combustíveis adicionem determinada quantidade de combustíveis renováveis aos combustíveis fósseis em quantidades que crescem a cada ano compreendido no mandato, resultando em 36 bilhões de galões até 2022. (US Environmental Protection Agency).

²¹ A biotecnologia aplicada à indústria farmacêutica (chamada por alguns autores de “biotecnologia vermelha”), não está presente nesta tese, por ser um subsector à parte da produção de químicos e combustíveis (referida, em contrapartida, como “biotecnologia branca”).

margens de lucro e que possuem um comportamento relativamente menos cíclico. O desenvolvimento destes produtos demanda uma relação próxima com os usuários (os desenvolvedores de aplicações), já que sua utilidade possui uma alta especificidade relativa. Estes produtos possuem alto valor agregado por que não são facilmente replicados ou são protegidos por patentes (Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2015).

A figura abaixo, retirada de um trabalho do National Renewable Energy Laboratory (NREL), vinculado ao Departamento de Energia estadunidense (US DOE), consubstancia as diferenças entre o modelo de produção de combustíveis e de especialidades químicas no que se refere à relação Consumo/Preço:

Figura 7: Preço de mercado vs volume anual produzido globalmente para produtos químicos selecionados



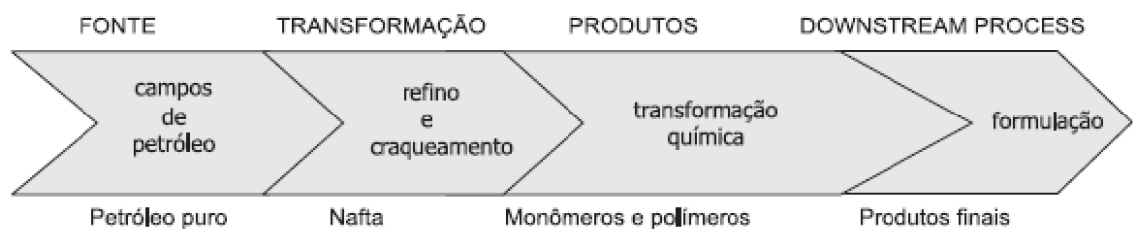
Fonte: extraído de Bidy, Scarlata & Kinchin (2016)

O conceito de *biorrefinaria* nasceu tendo como inspiração o modelo produtivo das refinarias petroquímicas. Segundo este conceito, a partir da biomassa – a contraparte dos

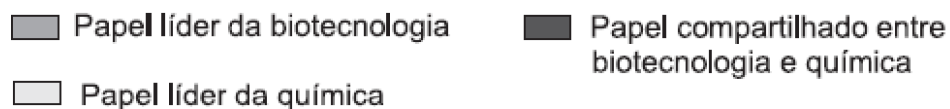
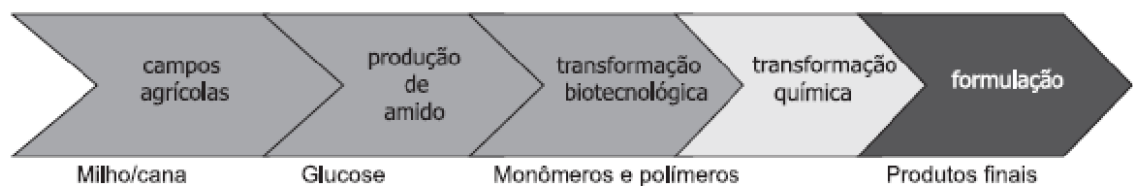
insumos petroquímicos, como o petróleo ou o gás natural, seria possível derivar grandes “correntes” de alguns produtos intermediários que, por fim, seriam convertidos em produtos finais. A figura 5 abaixo apresentada representa este conceito.

Figura 8: o modelo de produção das refinarias petroquímicas como inspiração para as biorrefinarias

REFINARIA DE PETRÓLEO



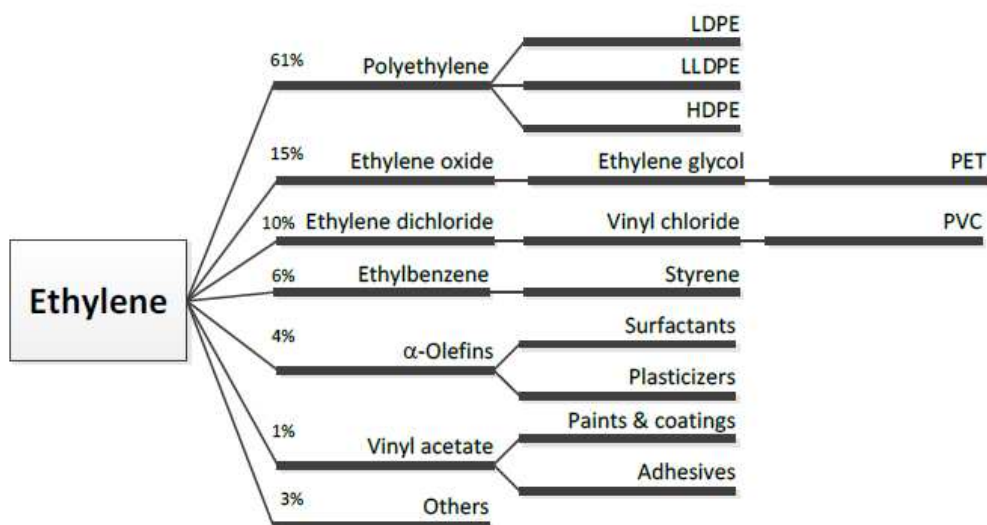
BIORREFINARIA



Fonte: Bastos (2007)

Um conceito derivado do modelo de refinarias é o de ‘árvore de produtos’. Na indústria química, alguns poucos produtos (ou, de modo mais assertivo, *plataformas*) dão origem a uma infinidade de produtos intermediários derivados. É o caso, por exemplo, do etileno, como podemos ver na figura abaixo:

Figura 9: Árvore de produtos do etileno



Fonte: extraído de Biddy, Scarlata & Kinchin (2016).

Abreviações: LDPE é *low-density polyethylene*; LLDPE é *linear low-density polyethylene*, HDPE corresponde a *high-density polyethylene*, PET a *polyethylene terephthalate*, e PVC a *polyvinyl chloride*.

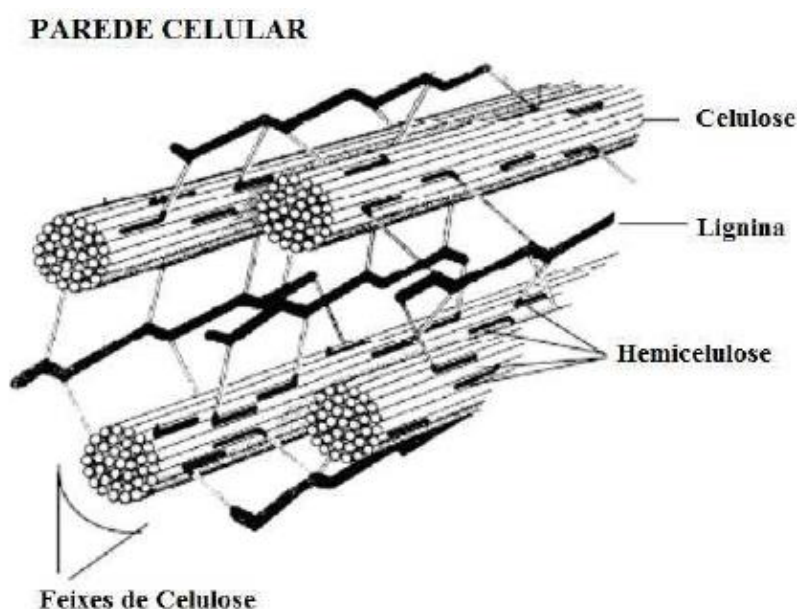
Uma cadeia de valor análoga para a biomassa deveria ser iniciada por categorias de produtos de baixas margens e altos volumes de produção, como insumos celulósicos, açúcares ou gás de síntese, e estender-se daí para produtos de altas margens e baixos volumes relativos de produção, como solventes ou polímeros.

O principal alicerce deste novo modelo produtivo é a biomassa. Segundo o Departamento de Energia dos EUA, biomassa é “qualquer material biológico renovável que possa ser utilizado diretamente como combustível ou convertido a outro produto com valor industrial” (US DOE, Biomass Feedstocks). A biomassa pode ser classificada como residual, quando composta, evidentemente, por resíduos (florestais, agrícolas, municipais ou industriais) ou dedicada, quando produzida em culturas aquáticas ou terrestres cultivadas com a finalidade específica de uso como insumo industrial (Elabora Consultoria, 2014). Embora ainda subsistam gargalos relevantes no desenvolvimento da produção e distribuição de matérias-primas renováveis, como a obtenção de produtos ou subprodutos agrícolas ricos em carboidratos e/ou lignocelulose que sejam mais produtivos e competitivos, ou a construção de cadeias mais eficientes de produção e distribuição destes produtos, espera-se que o uso desta

natureza insumos obtenha uma taxa de crescimento superior às observadas para os produtos de origem petroquímica no período 2013 - 2023 (Morschbacker, 2012).

No caso brasileiro, a fonte de biomassa com maior potencial industrial de curto prazo é aquela derivada do processamento de cana-de-açúcar, como o bagaço e a palha (Rossel, 2007). Segundo Rossel (2007), este tipo de biomassa é basicamente composto por celulose (polímero de seis carbonos), hemicelulose (polímero de cinco carbonos) e lignina, o material estrutural da planta que a protege contra choques físicos e químicos.

Figura 10: Composição da biomassa de cana-de-açúcar



Fonte: extraído de Rossel, C. (2007)

Há desafios inerentes que as firmas que utilizam insumos lignocelulósicos enfrentam devido, em parte, a impurezas que são introduzidas no processo e aos impactos que estas impurezas causam ao longo de todo processo de conversão, em especial nas etapas de separação e de purificação do produto final (Bidby, Scarlata & Kinchin, 2016).

A história do conceito de biorrefinaria não é nova, nem são recentes as tentativas de viabilizá-lo em termos práticos. Um dos passos pioneiros foi dado em 1925 com a fundação da Chemurgy pelo químico W. J. Hale, juntamente com H. Dow, fundador da Dow Chemical, e C. H. Herty, presidente da Sociedade Química Americana, os quais receberam o apoio de

outros importantes líderes industriais como Henry Ford e Thomas Edison. Seu objetivo era promover a utilização de produtos agrícolas, abundantes e competitivos nos EUA, pela indústria. Um dos seus projetos mais importantes foi o desenvolvimento de um carro, introduzido em 1941 por Henry Ford, cujo estofado interior e corpo eram construídos principalmente com base em material biosintético. Mais especificamente, estas partes eram compostas por celulose, soja e resina de formaldeído nas proporções de 70%, 20% e 10% (Kamm, Gruber and Kamm, 2006).

No entanto, o surgimento de esforços estruturados para o desenvolvimento de biorrefinarias para enfrentamento de problemas como o aquecimento global é um fenômeno muito mais recente. Foi apenas em 2004 que o Departamento de Energia dos EUA (US DOE) lançou seu primeiro *roadmap* sobre o desenvolvimento de tecnologias químicas a partir da biomassa, um documento que se tornou uma referência no setor – um segundo volume foi lançado em 2007 (NREL & PNLL, 2004; 2007). Este relatório, denominado “*Top Value Added Chemicals from Biomass*”, apresenta doze moléculas com rotas derivadas da biomassa que, segundo o Laboratório, possuíam à época o maior potencial de desenvolvimento da produção industrial em termos economicamente viáveis.

Há atualmente ao menos três grandes grupos de tecnologias em desenvolvimento dedicadas à produção de renováveis avançados: as bioquímicas, as termoquímicas e os modelos híbridos (que possuem etapas termoquímicas e etapas bioquímicas) (Elabora Consultoria, 2014). Cada uma delas é apresentada nos parágrafos que seguem:

- *Bioquímicas*: São aqueles processos que utilizam microrganismos ou suas partes constituintes, baseados na utilização de enzimas e de tecnologias de fermentação ou de digestão anaeróbica. Enquanto a fermentação gera principalmente produtos líquidos diluídos, a digestão anaeróbica produz gás, composto principalmente por metano. Tecnologias baseadas em algas também fazem parte deste grupo. Algumas espécies de algas naturalmente armazenam grandes quantidades de óleos, que podem ser transformados em plataformas intermediárias. Outras tentativas voltam-se a cultivar algas para uso como biomassa, na ‘alimentação’ de processos de fermentação, por exemplo
- *Termoquímicas*: aqui inserem-se, principalmente, tecnologias baseadas em gaseificação ou em pirólise. Estas tecnologias são utilizadas em outros setores

há muito tempo. O seu uso com base na biomassa, no entanto, representa mudanças relevantes nas condições de processo.

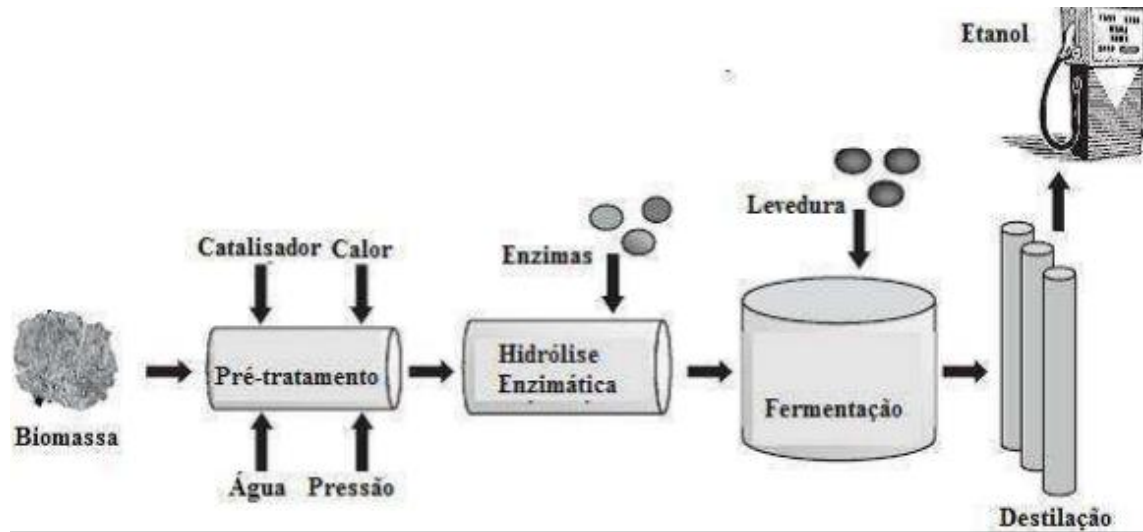
- *Processos Híbridos*: aqui estão inseridos processos tecnológicos que contém tanto etapas bioquímicas como termoquímicas. Estes processos tencionam mitigar os ‘defeitos’ de cada uma das abordagens separadamente, e possivelmente aumentar a produtividade do processo como um todo.

Apesar da grande diversidade de configurações existentes, os processos industriais de produção de renováveis avançados baseados em biotecnologia possuem, no geral, quatro principais etapas, a saber:

- a. *Pré-tratamento*: esta etapa visa alterar as interações nativas entre os componentes da biomassa, ou seja, a celulose, a hemicelulose e a lignina e, em muitos casos, modificar quimicamente estes componentes de forma a tornar a celulose mais acessível à etapa de hidrólise.
- b. *Hidrólise*: A hidrólise consiste em uma reação química com uso de enzimas (enzimática) ou de ácidos (ácida) para quebrar uma molécula em duas outras moléculas. No caso da enzimática, as enzimas digerem a parede celular vegetal, liberando os açúcares de seis (C6) e de cinco carbonos (C5) que serão convertidos posteriormente em etanol pelas leveduras durante a fermentação.
- c. *Fermentação*: nesta etapa os açúcares são convertidos no produto final desejado e em subprodutos por leveduras geneticamente modificadas ou não.
- d. *Destilação e separação*: por fim, o produto final é separado de rejeitos e de subprodutos do processo.

Estas etapas são representadas na figura a seguir, que representa um processo de produção de etanol celulósico através de hidrólise enzimática:

Figura 11: etapas de uma das configurações possíveis do processo de hidrólise enzimática



Fonte: extraído de Silva (2017)

Embora nos últimos anos tenha avançado muito nosso conhecimento sobre o genoma e sobre formas de manipulá-lo em prol de atividades industriais, a biotecnologia ainda é um campo que carrega grande incerteza. Como afirmou Rob Carlson, o responsável pela startup Biodesic²² de Seattle em artigo na revista Nature em 2010:

“There are very few molecular operations that you understand in the way that you understand a wrench or a screwdriver or a transistor (...) And the difficulties multiply as the networks get larger, limiting the ability to design more complex systems” (Kwok, 2010).

Alguns avanços recentes no conhecimento científico e tecnológico, no entanto, prometem revolucionar este cenário. O relatório *Analysis of new developments in white (industrial) biotechnology*, de 2016, preparado pelo National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) da Holanda, identificou cinco principais técnicas que devem impulsionar enormemente o campo nos próximos anos. São elas:

²² “Biodesic is a strategy and engineering consulting firm. The Principals have a combined five decades of experience in biotechnology, software, analog and digital chip design, strategy, product development, project management, corporate communications, market analytics, and security.” Fonte: Biodesic website (biodesic.com). Acesso em 15/12/2019.

- a. Edição de genoma (CRISPR/Cas9): técnica que envolve uma nucleasse (uma enzima capaz de ‘cortar’ o DNA) e uma molécula-guia de RNA com o objetivo de fazer mudanças em uma sequência genômica existente com grande assertividade. Esta técnica tem o potencial de realizar diferentes alterações no DNA concomitantemente.
- b. Técnicas de sequenciamento de próxima geração: o sequenciamento de DNA é o processo de determinar a ordem precisa de nucleotídeos em uma molécula de DNA. As técnicas de sequenciamento são importantes no desenvolvimento de novas cepas devido ao seu potencial para encontrar novos genes, para planejar o melhoramento de uma cepa específica, e para validar a cepa após o seu desenvolvimento.
- c. DNA *building blocks*: ‘blocos de construção’ de DNA são desenhados com o objetivo de construir ‘partes padronizadas’ que são então combinadas para formar sistemas biológicos. Um bloco de construção padronizado consiste em um gene que, juntamente com elementos reguladores, determinam como o gene será expresso na célula. O ajuste fino de redes reguladoras em uma célula é um dos problemas principais da operação eficiente de genes dentro de uma via metabólica. A utilidade das construções de DNA depende das possibilidades de prever quais (variantes de) genes devem ser colocados juntos para introduzir um processo desejado em uma linhagem de produção. Uma barreira para a aplicação das técnicas é a exigência de conhecimento profundo do funcionamento das partes biológicas.
- d. Técnicas para ‘montagem’ de DNA: A montagem do DNA é necessária para fundir pequenos blocos de DNA em matrizes maiores, e em cromossomos inteiros e até genomas. As possibilidades da montagem de elementos de DNA em matrizes são limitadas por nossa limitada compreensão da influência da arquitetura do DNA em seu funcionamento. Algumas técnicas, portanto, visam a montagem de DNA em várias combinações para descobrir o que funciona melhor. A montagem do DNA não irá induzir a construção de organismos com genomas completamente sintéticos. No entanto, espera-se que esses desenvolvimentos se tornem a base para que isso ocorra em um prazo de 10 anos ou mais.
- e. Evolução adaptativa de laboratório e evolução dirigida: Técnicas que fazem uso da variabilidade genética que já está presente em cepas de microrganismos já são usadas há muito tempo. Estas técnicas são, em princípio, difusas: todo o genoma

de um organismo é ‘mutagenizado’ e variações com o fenótipo desejado são obtidas através de seleção. Como esse processo pode exigir centenas ou milhares de ciclos de replicação e crescimento, os microrganismos precisam ser subcultivados ou cultivados em cultura contínua por um longo período. Estão surgindo novas técnicas para tornar o processo mais focado e assertivo, de modo a selecionar apenas os genes de interesse. Isso pode ser feito *in vivo*, em evolução laboratorial adaptativa, ou *in vitro*.

Uma das vertentes mais promissoras para a biotecnologia industrial é a exploração das oportunidades emergentes com a biologia sintética. A biologia sintética consiste no desenvolvimento de conhecimento que viabilize a padronização e a abstração de componentes biológicos. Este campo do conhecimento está baseado na compreensão da biologia como um sistema de informações no qual a instrução sobre como se comportará cada componente biológico está inserida de maneira codificada no DNA, que por sua vez alimenta a maquinaria molecular da célula. Como consequência deste modo de compreender a biologia, este sistema, então, poderia em tese ser (re)programado a partir do uso de conceitos da computação digital de modo a viabilizar o design, a simulação e a realização de fenótipos celulares complexos de interesse industrial. Este campo do conhecimento surgiu do esforço para superar gargalos relacionados aos métodos “tradicionais” de design racional de sistemas biológicos, que consiste basicamente no uso de abordagens onerosas de tentativa e erro, ou mutação e seleção. Além de caras, estas abordagens são limitadas em termos dos problemas que podem resolver (Gardner & Hawkins, 2013).

Avanços na biologia sintética têm provocado uma queda vertiginosa dos custos associados ao sequenciamento de DNA e à síntese de DNA²³. O desenvolvimento de disciplinas como a proteômica e a metabolômica tem permitido uma compreensão cada vez mais acurada sobre a bioquímica das células. Técnicas de alto rendimento têm acelerado o avanço da engenharia metabólica e reduzido o tempo e custo associado com a construção de novas rotas metabólicas em organismos hospedeiros, permitindo a produção de novas moléculas (National Institute for Public Health and the Environment, 2016).

²³ Segundo o National Research Council dos EUA, o primeiro genoma humano (3,2 bi pares de base – bp) foi sequenciado em 2001 a um custo de \$2.7 bilhões. Nove anos depois, 1.000 genomas humanos (ou 3.2 trilões de bp) foram sequenciados, e em 2014 a empresa Illumina lançou a tecnologia HiSeq X, prometendo um genoma humano a \$1. Bancos de dados de sequências genômicas têm crescido rapidamente; em 2013, havia 160 milhões de sequências de 300.000 organismos. Este crescimento representa um enorme catálogo potencial de ‘partes’ naturais – unidades funcionais de DNA – a partir das quais muitas rotas de conversão para produtos químicos podem ser descobertas ou criadas (NRC, 2015; Kahl and Endy 2013).

As ferramentas da bioinformática aplicáveis à análise de perfis de células permitem uma compreensão cada vez mais detalhada da expressão gênica e do metabolismo celular, incluindo a capacidade de recolher, manipular, questionar e compartilhar grandes conjuntos de dados associados à biologia sintética. Esforços têm sido empreendidos para aumentar o número e a gama de partes de DNA que estão disponíveis para *engenheirar* novas funções nas células. Isto inclui extensas listas de enzimas que são recolhidas a partir de bases de dados de sequências, e então sintetizadas e caracterizadas para exercer funções específicas. Esforços também têm sido realizados visando a caracterização de partes regulatórias para controlar a expressão com maior precisão. Avanços na modelagem e na concepção de ferramentas de visualização são críticas para a engenharia de proteínas. A modelagem preditiva é importante ao nível das proteínas, das rotas metabólicas e do metabolismo da célula por inteiro. A modelagem é igualmente importante ao nível macro, para auxiliar a previsão sobre como as células funcionarão ao nível de uma população e em interação com o meio ambiente (National Institute for Public Health and the Environment, 2016).

Estes desenvolvimentos estão diretamente relacionados à habilidade de se produzir e testar protótipos de sistemas biológicos a taxas e com grau de complexidade até então inimagináveis, ou economicamente inviáveis. Como exemplo, há cerca de 40 anos, o homem conseguia manipular apenas pequenos genes, como da insulina humana. Hoje, é possível manipular rotas de atuação, cromossomos e até genomas (Singh, 2011).

Como foi anteriormente mencionado, os projetos pioneiros da biotecnologia industrial focaram seus primeiros esforços tecnológicos no desenvolvimento da produção industrial de biocombustíveis e commodities químicas. A convergência dos esforços tecnológicos e de desenvolvimento industrial para a criação de uma indústria de biocombustíveis baseada em biotecnologias avançadas trouxe consigo condicionantes importantes para o direcionamento das trajetórias tecnológicas do setor, bem como para as estratégias e modelos de negócio. Segundo Dietrich:

One of the most significant problems in the field is that startups began by chasing after the lowest-value, highest-volume fuels and commodity chemicals. These were pursued, in part, because there was no market risk. If you could make it (cost competitively), it would be bought. Most, however, ran into the problem that all mass is not created equal (Dietrich, 2014).

Dietrich vai além. Para ele, do ponto de vista molecular, o uso de açúcares lignocelulósicos para produção de biocombustíveis não é dos mais apropriados:

Sugar, which remains the feedstock of choice for most fermentation processes, is 53% oxygen and 40% carbon. Nearly all of this oxygen must be stripped from sugar to produce a molecule suitable for use as a fuel. Thus, for biofuels the cost of usable mass is not the cost of sugar (ca. \$0.30 - 0.35/kg), but something 2- to 5-fold higher. It is already difficult to produce a \$1/kg fuel given this feedstock constraint, and there is virtually no room for unexpected process inefficiencies (Dietrich, 2014).

Os biocombustíveis e as commodities de base renovável são produtos que concorrem diretamente com aqueles de origem fóssil, por terem o mesmo uso final associado. Acontece que os produtos fósseis são gerados a partir do emprego de tecnologias que foram pauta de uma intensa busca ao longo de muitas décadas pela obtenção de escalas de produção cada vez maiores. Com a obtenção de economias de custo significativas, devido à ampla disponibilidade de petróleo e gás natural no início do século XX, ao menos nos EUA, este movimento esteve amparado no grande tamanho do mercado interno deste país (Mowery & Rosenberg, 1988). A produção de petroquímicos, portanto, está apoiada em tecnologias maduras e estáveis, que incorporam décadas de melhorias incrementais. Acumuladas, estas melhorias possibilitam a produção eficiente a custos muito baixos, e em escalas muito dilatadas, em plantas que exigem um enorme investimento de capital.

Em decorrência, por serem substitutos diretos de produtos petroquímicos de produção em larga escala, os bioprodutos típicos dos projetos pioneiros da biotecnologia industrial concorrem (ou concorriam) diretamente com estes através do preço. Daí a sua viabilidade econômica pressupor a operação em plantas que operam em escalas muito dilatadas, que compensem as baixas margens de lucro atreladas à necessária obtenção de custos de produção muito pequenos. Quão menores forem os preços dos insumos fósseis e dos produtos petroquímicos, mais desafiadoras serão as condições ‘ambientais’ para a introdução comercial dos biocombustíveis renováveis.

Neste ponto, é preciso compreender que a conexão estabelecida entre a indústria do petróleo e a de produtos químicos não é “natural”, mas sim uma criação humana complexa. Por volta de 1920, o petróleo era utilizado diretamente como combustível e lubrificante. Foi somente de modo gradual, a partir do avanço do conhecimento empírico e científico, que as

companhias de petróleo começaram a produzir compostos de maior complexidade, como produtos orgânicos intermediários. A transformação da indústria química dos EUA, de 1920 a 1946, estabelecendo as bases da indústria petroquímica que amadureceu após a II Guerra Mundial, foi em grande parte fruto da aplicação de conhecimentos científicos e empíricos ao desenvolvimento de tecnologias de processo voltadas à produção em larga escala (Mowery & Rosenberg, 1988; Spitz, 1988)²⁴.

Além das condições ambientais mais severas do que o planejado, resultante do comportamento recente do mercado de insumos fósseis, as firmas da primeira “onda” de projetos em renováveis avançados têm enfrentado dificuldades técnicas que não estavam previstas na transição de tecnologias do estágio de laboratório ou piloto para o estágio comercial.

A dificuldade na superação destes desafios tem feito com que os projetos não tenham se materializado nos ganhos de eficiência que seriam necessários para dar suporte ao seu rápido crescimento devido à imaturidade das tecnologias (traduzidas em operações não confiáveis ou altos custos) e a pobres taxas de retorno em relação ao perfil de risco associado (Lane, 2016)²⁵.

Aqui é preciso ressaltar uma característica inerente a este tipo de projeto que revela muito das vicissitudes enfrentadas em seu desenvolvimento: o conhecimento necessário para operar plantas de produção de biocombustíveis avançados em larga escala é em grande medida diferente daquele referente à pesquisa “básica”. O processo de escalonamento destas tecnologias requer o emprego de competências e conhecimentos que não são facilmente obtíveis a partir de pesquisas de laboratório. Rosenberg, em passagem de obra seminal de 1994, já atentava para este fato:

²⁴ Mowery & Rosenberg (1988) chamam atenção especialmente para o surgimento da disciplina Engenharia Química, uma criação estadunidense direcionada ao desenvolvimento da indústria petroquímica no país.

²⁵ Como pontuou uma reportagem da Revista Pesquisa Fapesp de 2018, sobre a empresa brasileira GranBio: ‘A GranBio comprou licenças de várias tecnologias para estabelecer sua usina em Alagoas, a Bioflex. A DSM, da Holanda, forneceu a primeira levedura testada, a Novozymes, da Dinamarca, enzimas para hidrólise, enquanto a italiana Mossi Ghisolfi (MG) foi a responsável pelos sistemas de pré-tratamento e hidrólise. A tecnologia não funcionou como o prometido, em especial o pacote adquirido do grupo da Itália. “O que se viu no primeiro momento foi um autêntico colapso do sistema”, reconhece Bernardo Gradin, presidente da GranBio. Para complicar a situação, a GranBio perdeu seu principal interlocutor junto à MG com a morte trágica de um dos donos do grupo, Guido Ghisolfi, um aparente suicídio, em março de 2015, apenas quatro meses após a Bioflex iniciar seus testes. “Passamos quase um ano sem poder tocar na planta, que estava passando por perícias. O pioneirismo exigiu muito mais paciência do que imaginávamos.” (Marques, 2018).

*“Moreover, efficient manufacturing is, inherently, something very different from a simple, multiple enlargement of small-scale experimental equipment. This is what accounts for the unique importance of the pilot plant, which may be thought of as a device for translating the findings of laboratory research into a technically feasible and economically efficient production process. The translation, however, requires a kind of expertise that need not exist at the experimental research level: a knowledge of mechanical engineering and a careful attention to the underlying economics of the engineering alternatives.”*²⁶

Esta questão pode ser analisada sob o ponto de vista do equilíbrio entre a possibilidade de inferir, através do processo de aprendizado subjacente, qual será o comportamento futuro de determinada tecnologia (*learning-before-doing*) – e, portanto, *antes* do comprometimento de vultuosos recursos com seu desenvolvimento - e o aprendizado que só pode ser obtido no *decorrer* do desenvolvimento tecnológico (*learning-by-doing*) (Pisano, 2002). Para que o aprendizado típico de pesquisas de laboratório seja efetivo em termos da geração de conhecimento que possa alicerçar a tomada de decisão, é necessário que o *staff* científico tenha à sua disposição um corpo de conhecimento teórico e de heurísticas robusto, que permita conhecer de antemão (quase) todas as variáveis relevantes e o seu comportamento esperado. Sem isso, fica difícil desenhar um experimento ou simulação com resultados confiáveis, que permita antever como funcionará a tecnologia em escalas maiores de operação. Nestes casos, é necessário se engajar em *learning-by-doing*. Quão menor for a possibilidade de se utilizar com eficácia *learning-before-doing*, maior será a incerteza relacionada ao projeto em questão - e, como Pisano nota, a experiência tem mostrado que na biotecnologia estratégias baseadas em *learning-before-doing* não têm sido muito efetivas:

“(...) This has to do with characteristics of biotechnology process technology compared to chemical synthesis technology: (i) differences in theoretical understanding of the basic processes (ii) ability to precisely fully characterize intermediates and final products, and (iii) knowledge of the second-order effects of scale. Given the difficulty of designing experiments that could faithfully simulate operating conditions at full scale, biotechnology process development relies much more extensively on trial-and-error and iteration of the

²⁶ Rosenberg (1994) Exploring the Black Box: Technology, economics and history. Cambridge University Press; pp. 145.

process design after the process is transferred out of the laboratory. (Pisano, 2002, pp. 135)."

Os projetos da primeira “onda” têm enfrentado severas dificuldades na progressão das pesquisas em escala de laboratório e de plantas piloto para a implantação de plantas comerciais. Há *gaps* no conhecimento tecnológico no desenvolvimento de microrganismos mais eficientes e em etapas como o pré-tratamento da biomassa ou a separação do produto final, que têm impactado negativamente a eficiência dos processos desenvolvidos (Salehi & Taherzadeh, 2015). O ‘vale da morte’ existente entre uma grande ideia, demonstrada em escala laboratorial e validada em plantas-piloto, e a sua exploração industrial, ainda subsiste como um enorme obstáculo que muitas firmas não conseguem transpor. Outras dificuldades que a literatura identifica no desenvolvimento da produção de biocombustíveis avançados: a impossibilidade de investimento sequencial (escassez de pontos *to-go-or-not-to-go*) e o alto montante de capital exigido para o processo de escalonamento das tecnologias (alto CAPEX); custos de operação (OPEX) superiores aos esperados, o que foi agravado pelo comportamento do preço do petróleo; questões relativas à infraestrutura de distribuição dos produtos; a baixa atratividade para capital de risco que estas condições geram; dificuldades com o suprimento de grandes quantidades de biomassa, em termos de custo, de disponibilidade e de homogeneidade; e incertezas referentes à adoção e a continuidade de políticas públicas de fomento (Knockaert et al, 2015; Festel, 2015; Hamsen & Coenen 2015; Marques, 2015)²⁷.

Como resultado, as promessas de desenvolvimento de biocombustíveis avançados que substituíssem uma fatia importante da utilização de combustíveis fósseis não têm se concretizado, ao menos não na velocidade que era esperada. É emblemático o fato de o volume produzido de etanol celulósico ser muito inferior ao que foi projetado pelas principais políticas públicas de fomento ao setor, como é o caso do mandato estadunidense *Renewable Fuels Standard* (RFS). Como afirmou Pavel Molchanov, um analista de destaque da indústria,

²⁷ Segundo dados da consultoria Bloomberg New Energy Finance, os investimentos globais em biocombustíveis de nova geração, que chegaram perto de US\$ 3 bilhões em 2011, caíram para menos de US\$ 1 bilhão em 2013 e pouco mais de meio bilhão em 2016.

“even under the best-case scenario of every project coming to fruition on time, second generation biofuels volumes will not reach the (in retrospect, far too aggressive) RFS targets at any point this decade” (Molchanov, 2014).

Este mandato, administrado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA), foi estabelecido em 2005 e ampliado em 2007. Ele prevê o aumento gradativo da utilização de combustíveis renováveis no país, culminando em um uso de 16 bilhões de galões em 2022. A cada ano, a US EPA revê o mandato para o período seguinte com base na previsão de produção, tendo como base plantas já existentes e as em construção. Para 2016, era prevista a utilização de cerca de 886 milhões de litros (ou 234 milhões de galões de biocombustíveis avançados (US EPA, 2016).

Há de fato uma enorme disparidade entre o volume planejado de uso de biocombustíveis avançados e o volume produzido. Por exemplo, em sua implementação, o mandato previa o consumo de 100 milhões de galões de combustíveis celulósicos em 2010; 250 milhões de galões em 2011; e 500 milhões de galões em 2012. No entanto, devido à baixa oferta de produtos desta natureza, a US EPA foi obrigada a rever a quantidade mandatária de consumo para 5 milhões de galões em 2010 (5 % do mandato inicial); 6,6 milhões em 2011 (2,64 % do mandato inicial) e 8,65 milhões em 2012 (1,73 % do mandato inicial) (Bracmort, 2012).

Tabela 1: Volume esperado vs produzido de combustíveis renováveis pelo *Renewable Fuels Standard*

	Esperado	Obtido	%
2010	100.000.000	5.000.000	5
2011	250.000.000	6.600.000	2,64
2012	500.000.000	8.650.000	1,73

Fonte: elaboração própria a partir de Bracmort, 2012.

Adicionalmente, muitos projetos comerciais anunciados para produção de biocombustíveis nos últimos anos estão sendo suspensos ou mesmo abandonados. Em alguns

casos mais graves, firmas sucumbiram e foram à falência, mesmo após terem recebidos vultosos investimentos públicos e privados²⁸. O grupo espanhol Abengoa fechou em 2015 sua usina em Hugoton, Kansas, Estados Unidos. Em novembro passado, a multinacional DowDuPont colocou à venda, por US\$ 225 milhões, sua planta de etanol celulósico na cidade de Nevada, em Iowa, Estados Unidos. A gigante da química anunciou que continuará no mercado de biocombustíveis oferecendo insumos especializados, como leveduras geneticamente modificadas capazes de melhorar o rendimento dos produtores. A unidade tem capacidade para produzir 110 milhões de litros de etanol por ano, mas nunca operou comercialmente (Marques, 2018).

No Brasil, a situação não tem sido muito diferente. As firmas GranBio e Raízen são exemplos de investimentos expressivos no país no campo do etanol celulósico. A Bioflex 1, usina industrial da GranBio localizada em São Miguel dos Campos (AL), foi a primeira fábrica de etanol celulósico no país, com capacidade de produção de 82 milhões de litros do biocombustível por ano. Já a Raízen investiu cerca de R\$ 240 milhões em uma usina localizada em Piracicaba (SP), objetivando produzir quarenta milhões de litros de etanol por ano (Silva, Pereira & Martins, 2018). No entanto, o volume de etanol de segunda geração produzido hoje no país é muito inferior ao esperado devido a uma série de dificuldades técnicas que culminam em paradas excessivas em algumas etapas do processo de produção. Estas dificuldades têm se mostrado de difícil resolução²⁹.

Estes desafios têm afetado fortemente as firmas pioneiras da biotecnologia industrial. Embora muitas tenham sucumbido às vicissitudes do ambiente, outras têm adaptado suas estratégias, seu modelo de negócios, suas competências e sua base de conhecimentos, de modo a se adaptar às novas condições competitivas. Segundo a tese adotada neste trabalho, a sobrevivência destas firmas está relacionada à construção e incorporação de novas capacidades dinâmicas, que permitem que as firmas modifiquem suas rotinas, estratégias e competências frente às novas exigências.

²⁸ A importância da criação de políticas públicas indutoras da demanda por biocombustíveis e bioprodutos avançados não deve ser subestimada. Políticas como a introdução de mandatos de consumo atuam na criação de demanda para estes produtos em fases nas quais estes não conseguiriam sobreviver em ambiente de mercado. A ausência de demanda (seja de firmas privadas, do governo ou de consumidores domésticos) implica que, por maior que seja o fluxo de invenções, elas não poderão ser convertidas em inovações.

²⁹ A capacidade de produção das duas usinas voltadas à produção de etanol de segunda geração existentes hoje no país é de pouco mais de 100 milhões de litros por ano. Entretanto, as duas usinas produziram no último ano menos da metade deste volume (Alisson, 2017)

O conceito de competências organizacionais é importante para os propósitos deste trabalho por capturar a ideia de que, assim como os indivíduos, as organizações “sabem fazer coisas” – e, dentre o conjunto de coisas que as firmas sabem fazer, adaptar-se a novas condições ambientais trazidas à tona por mudanças tecnológicas é das mais fundamentais para a sobrevivência. As organizações, algumas com mais sucesso do que outras, são capazes de mudar aquilo que sabem fazer a partir de esforços deliberados (e custosos) de aprendizado voltados à modificação do seu conjunto de capacidades e conhecimentos (Dosi, Nelson & Winter, 2002).

Segundo Levinthal (1996), as firmas, quando aprendem, desenvolvem competências crescentes nas suas atividades atuais, mas ao mesmo tempo se tornam crescentemente alijadas de outras bases de experiência e aprendizado. O aprendizado é cumulativo, no sentido de que a capacidade das firmas de adquirir novo conhecimento é maior em domínios nos quais ela já possui competências (Levitt & March, 1988). Reforça esta tendência o fato de os retornos dos esforços de aprendizado serem maiores em áreas nas quais a firma possui maiores competências, o que alguns autores identificam como retornos crescentes dos esforços de aprendizado (Levitt & March, 1988). Como resultado destes mecanismos de alto-reforço, o aprendizado tende a resultar em especialização em determinados domínios do conhecimento, e a base de conhecimento tende a ser parcialmente específica à firma. Cohen & Levinthal (1990) reforçam esta ideia, ao afirmarem que a habilidade das firmas de avaliar e utilizar conhecimento “de fora” é função do nível de conhecimento prévio relacionado. Este conhecimento prévio confere a habilidade de reconhecer o valor da nova informação, assimila-la e aplica-la a fins comerciais, o que os autores relacionam às “capacidades de absorção” das firmas.

Arthur (1989) identificou um fenômeno correlato: o *lock-in* em uma determinada trajetória tecnológica (em prejuízo das demais alternativas concorrentes), que não necessariamente é a que possui o conjunto mais eficiente de características de desempenho e qualidade, após eventos aleatórios que beneficiam determinada alternativa em prejuízo das demais. Segundo o autor:

“Modern, complex technologies often display increasing returns to adoption in that the more they are adopted, the more experience is gained with them, and the more they are improved. When two or more increasing-return technologies ‘compete’ them, for a ‘market’

of potential adopters, insignificant events may by chance give one of them an initial advantage in adoptions. This technology may then improve more than the others, so it may appeal to a wider proportion of potential adopters. It may therefore become further adopted and further improved. Thus, a technology that by chance gains an early lead in adoption may eventually ‘corner the market’ of potential adopters, with the others technologies becoming locked out.” (Arthur, 1989, pp. 116)

Diferentes trajetórias de aprendizado levam as firmas a percorrerem trajetórias tecnológicas distintas, ainda que o ponto de partida destas seja muito parecido. Assim, por exemplo, os desafios encontrados na implantação de uma planta de etanol celulósico de segunda geração baseada no uso de palha e bagaço de cana de açúcar provavelmente serão substancialmente diferentes, no decorrer do processo de implementação, daqueles encontrados em uma planta baseada no uso de palha de arroz, ainda que ambas utilizem a mesma tecnologia de hidrólise enzimática desenvolvida por um mesmo fornecedor. Isto por que a palha de cana é rica em fuligem - que por sua vez é rica em sílica, o que tem causado sérios transtornos como a corrosão de canos. Isto não ocorre em plantas que utilizam a palha de arroz, que é mais ‘limpa’ (Ahorsu, Medina & Constantí, 2018).

Especializar-se em determinada trajetória tecnológica, alijando-se de outras, é, de certa forma uma trajetória natural do desenvolvimento das firmas, pois a especialização está vinculada a mecanismos de auto reforço de capacidades que levam a ganhos de eficiência que, por sua vez, são fontes importantes de vantagens competitivas (Levinthal, 1996). Ocorre que a especialização de baixa flexibilidade em determinada trajetória tecnológica, em ambientes de rápida mudança, pode ser um fator de inércia e de atraso de adaptação a novas condições competitivas, o que pode ser fatal em determinadas situações.

Em transições tecnológicas, como a que constitui a biotecnologia industrial, frequentemente há diversas rotas tecnológicas que concorrem entre si por uma mesma função, ou seja, pela geração economicamente e tecnicamente viável de um ou mais produtos. No caso da produção industrial de etanol celulósico, por exemplo, há ao menos três grupos de rotas concorrentes: a enzimática, a termoquímica e as soluções híbridas (que possuem etapas termoquímicas e bioquímicas, por exemplo) (Elabora Consultoria, 2014). Não se sabe, até o presente momento, qual será a solução vencedora, tampouco se haverá uma solução vencedora. Esta incerteza é decorrente do desconhecimento sobre como variáveis relevantes

para a tomada de decisão vão se comportar no médio e longo prazo (o preço desempenho das enzimas ou das leveduras, por exemplo); sob algumas perspectivas, pode-se afirmar que não se conhece sequer quais são todas as variáveis relevantes para a tomada de decisão.

A dinâmica acima descrita coloca sérios desafios à tomada de decisão sobre investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias. A “aposta” que se faz hoje, mesmo que amparada na opinião de *experts* ou no movimento de gigantes, como a DuPont, em experiências e em dados e observações contundentes do ambiente por executivos ‘experimentados’, pode se mostrar equivocada no futuro próximo.

O custo de oportunidade de exploração de uma opção tecnológica alternativa é maior quanto mais favoráveis e mais precisas são as expectativas sobre os retornos de persistir com a opção “atual”. O risco associado a este cálculo “racional” é a possibilidade de incorrer em *armadilhas de aprendizado*, ou seja, no comprometimento de recursos (via de regra escassos) com uma alternativa tecnológica que depois venha a se mostrar menos eficiente do que as alternativas concorrentes (Levinthal, 1996). A noção de *armadilha de competências* (Levinthal, 1997, 1996), por sua vez, sugere que uma organização pode reduzir as suas atividades de busca prematuramente ou, em caso de ambientes altamente mutantes, não renovar as suas atividades de busca apesar do fato de potencialmente existirem outras oportunidades, demandantes de outros conhecimentos.

Da discussão acima depreende-se que, em ambientes tecnológicos de grande incerteza, há valor em se manter flexibilidade nas etapas iniciais do desenvolvimento da tecnologia, para manter a possibilidade de adapta-la a mudanças nos parâmetros competitivos que podem ser provocadas por alterações no ambiente – mesmo que isso signifique o progresso mais lento nas fases iniciais da curva de aprendizado e, portanto, em um maior lapso temporal entre o início do investimento inovativo e a geração de receitas decorrentes da introdução comercial da tecnologia. Se o processo de aprendizado leva à dependência da exploração de certa base de conhecimentos e à especialização em uma determinada “configuração” tecnológica, uma determinada firma tem menor probabilidade de sobreviver a mudanças significativas no seu ambiente, pois terá uma menor capacidade de adaptação a novas condições competitivas (Levinthal, 1996).

Uma das formas das firmas superarem a inércia causada pela especialização excessiva, segundo Levinthal, é a manutenção de múltiplas bases de aprendizado, ou seja, de diferentes

fontes de aquisição de novos conhecimentos, que permitam à firma rapidamente adaptar a sua estratégia a mudanças em variáveis-chave para a manutenção da sua competitividade.

A noção de que ter múltiplas bases de aprendizado é uma vantagem competitiva relevante está relacionada, na literatura, à importância que alguns autores identificaram da construção de capacidades dinâmicas. Teece, Pisano & Shuen (2002) definem estas capacidades como a habilidade de reconfigurar, redirecionar, transformar e apropriadamente modelar e integrar as competências-chave da organização com recursos externos e ativos complementares para lidar com os desafios de um ambiente tecnológico altamente dinâmico. Para os autores, a construção de capacidades dinâmicas robustas está fortemente relacionada ao estabelecimento de vantagens competitivas, especialmente em indústrias onde a mudança tecnológica é rápida (Winter, 2003; Kathleen M. Eisenhardt & Martin, 2000).

Mesmo entre organizações muito parecidas, a competência de aprender e de se adaptar a situações adversas pode ser muito diferente. No desenvolvimento de biocombustíveis e bioprodutos avançados, a capacidade das firmas em lidar com gargalos na base de conhecimentos e com condições adversas do ambiente também tem se mostrado muito heterogênea. Enquanto algumas firmas sucumbiram e foram eliminadas, outras têm adaptado suas estratégias, suas bases de conhecimento e seus modelos de negócio de modo a lidar com um ambiente competitivo mais desafiador. A próxima seção volta-se a examinar os desafios que tem impactado o desenvolvimento da biotecnologia industrial.

2.5 Desafios colocados à consolidação da biotecnologia industrial

O desenvolvimento da produção de produtos químicos e combustíveis alternativos, que possam substituir ao menos em parte os de origem petroquímica, pode ajudar a humanidade a lidar com desafios de difícil superação, como o aquecimento global e a dependência de insumos fósseis.

Devido ao crescente potencial desta indústria, nos últimos anos muitos governos e firmas têm mobilizado recursos e desenvolvido estratégias e programas para promover: i. o desenvolvimento da produção de energia e produtos renováveis; e ii. sua difusão por muitas indústrias já consolidadas.

No entanto, o desenvolvimento da produção de combustíveis e produtos químicos renováveis de geração avançada tem enfrentado uma série de obstáculos. O estabelecimento de uma nova indústria, que esteja baseada no desenvolvimento e na difusão de tecnologias radicalmente novas, é um processo lento, árduo e altamente incerto. As novas tecnologias por detrás deste surgimento requerem grandes investimentos em melhorias, maturação e demonstração de sua viabilidade antes de atingirem uma relação entre o nível de custos e de desempenho capaz de sustentar a sua introdução comercial. O desenvolvimento de tecnologias auxiliares frequentemente se faz necessário (Teece, 1986). Fatores do ‘ambiente’ no qual as firmas operam condicionam este processo de diferentes maneiras, seja encorajando ou desestimulando investimentos, seja influenciando a sua velocidade e direção (Nelson & Winter, 1982; Dosi, 1988). Este é um processo permeado por idas e vindas, por tentativas, erros e acertos, e que dificilmente progride de modo unilateral (Kline & Rosenberg, 1986).

Esta seção apresenta a seguir os principais desafios colocados à consolidação da biotecnologia industrial, separados por sua natureza: tecnológica ou de “mercado”.

2.5.1 Desafios de âmbito tecnológico

Os desafios para empreendimento de atividades inovativas em química renovável são significativamente diferentes daqueles da química “tradicional”, por exigirem dos atores a incorporação e o uso de conhecimentos que antes não estavam no escopo do setor. Embora promissoras, são muitos os passos ainda necessários para superar os enormes desafios que por hora impedem a ampla difusão comercial de tecnologias renováveis avançadas. Os gargalos científicos e tecnológicos ainda são relativamente altos, e sua superação usualmente está associada a grandes riscos e incertezas.

A natureza sistêmica e complexa da inovação é um dos fatores que faz com que introdução comercial de novas tecnologias seja frequentemente um processo moroso. Mowey e Rosenberg, em seu livro seminal de 1998, analisam este processo no estudo da mudança tecnológica em muitas indústrias no século XX, com foco nos Estados Unidos. Segundo estes autores, a inovação, compreendida como a introdução comercial bem-sucedida de um novo produto ou processo, é frequentemente um processo dependente de avanços sinérgicos em um conjunto variado de componentes e materiais, que sofrem modificações e melhorias contínuas

no design e na fabricação mesmo depois da sua introdução comercial. A inovação é, portanto, resultado da soma de características interdependentes e mutuamente reforçadoras, na qual “o desempenho de cada componente depende fortemente do dos demais, e a natureza exata desta relação não pôde ser trilhada historicamente através do recurso a teorias científicas” (Mowery e Rosenberg, 1998, pp. 77).

A concretização gradativa dos impactos econômicos de inovações reflete a necessidade da ocorrência de diversas inovações complementares em tecnologia, organização e administração para tornar possível adifusão de uma inovação ‘principal’ (Teece, 1986). Além disso, a primeira versão de uma nova tecnologia precisa inevitavelmente ser substancialmente melhorada através de longas séries de inovações e modificações incrementais antes de atingir parâmetros de desempenho e custo que viabilizem a sua introdução comercial. Essas modificações afetam tanto a própria tecnologia quanto o entendimento, por parte dos usuários, de seu potencial e de seus requerimentos de operação. Além do mais, há custos organizacionais e econômicos inerentes à adoção de uma nova tecnologia que contribuem para o atraso em sua ampla difusão, já que muitas vezes décadas de experimentação e aprendizado se fazem necessárias (Mowery e Rosenberg, 1998).

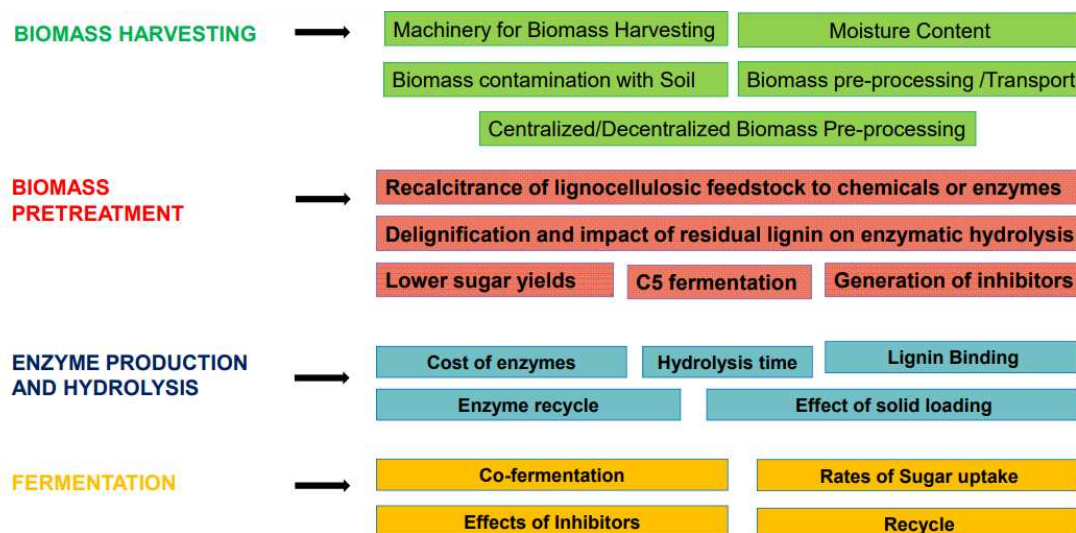
Deste modo, no caso específico da biotecnologia industrial, a construção de plantas de demonstração, como passo intermediário de desenvolvimento tecnológico, é absolutamente essencial para o design de plantas industriais, visto que o conhecimento científico e tecnológico disponível ainda é insuficiente para que isto seja realizado de forma não-empírica – não é possível, por exemplo, construir modelos matemáticos com abrangência e acurácia suficientes para prever como tecnologias “de bancada” se comportarão em escala industrial. Isto é perfeitamente possível em campos tecnológicos estabelecidos, como o desenvolvimento de novos catalisadores para a indústria do petróleo. Plantas de demonstração são ativos caros e que consomem grande tempo e esforço para encontrar dados confiáveis para a geração de um design de pacotes tecnológicos robustos, mas ainda são a melhor alternativa em um cenário no qual o corpo de conhecimentos disponível não é suficiente para responder às questões que impedem o ganho de escala e de eficiência. É nas plantas piloto e de demonstração que se pode dedicar esforços para desenvolvimento e aprimoramento da operação individual de cada um dos componentes tecnológicos, antes de integra-los em uma unidade operacional de escala industrial.

Os principais desafios de âmbito científico e tecnológico relacionados ao desenvolvimento de uma indústria de renováveis avançados referem-se a quatro dimensões principais:

- Pré-tratamento da biomassa: desenvolvimento de um processo menos severo, realizado em uma única etapa, aplicável a uma grande diversidade de matérias-primas
- Tecnologias de hidrólise: maximizar o rendimento da hidrólise minimizando o uso de enzimas
- Tecnologias de fermentação: desenvolvimento de novas biocatálise para produção endógena de multiprodutos; melhorar o uso de açúcares de cinco carbonos (C5) para fermentação ou desenvolvimento de processos para transforma-los em produtos de maior valor agregado.
- Produção de enzimas: endogenizar a produção de enzimas, eliminando a necessidade de adição de produtos exógenos ao processo., a partir da construção de microrganismos adaptados a este fim.

A figura abaixo consubstancia alguns destes desafios:

Figura12:Desafios tecnológicos para consolidação da biotecnologia industrial



Fonte: extraído de Gandham, S. (2018) A technical perspective on 2G biofuels and the way forward.

A superação destes desafios passa, ao menos em parte, pelo desenvolvimento e aplicação de novos conhecimentos científicos que embasem a geração de tecnologias mais eficientes e confiáveis, capazes de viabilizar a produção de produtos com atributos únicos de qualidade e desempenho e/ou com vantagens de custo em relação às tecnologias “tradicionais”. No entanto, tão ou mais importantes serão os conhecimentos sobre o que funciona e o que não funciona, o que auxiliará a prever como tecnologias que ainda habitem o mundo das ideias irão funcionar quando levadas à escala comercial.

Embora tenham sido obtidos avanços importantes na criação de tecnologias industriais de base biológica para produção de combustíveis e produtos químicos ao longo das últimas décadas, a competição com as tecnologias “tradicionais” ainda não é viável para muitos produtos. Isto em alguma medida está relacionado à existência de lacunas no conhecimento. A habilidade para construir uma sequência de DNA, por exemplo, tem sido muito inferior à habilidade que temos para lê-lo e transcrevê-lo. Isto constitui uma barreira para a construção de tecnologias mais robustas, já que as funções mais valiosas que podem ser desempenhadas por um microrganismo requererem a utilização de muitos genes e o complexo controle regulatório sobre quanto, quando, e onde eles são “ligados” (National Research Council, 2015).

2.5.2 Desafios referentes aos mercados de insumos fósseis e seus derivados

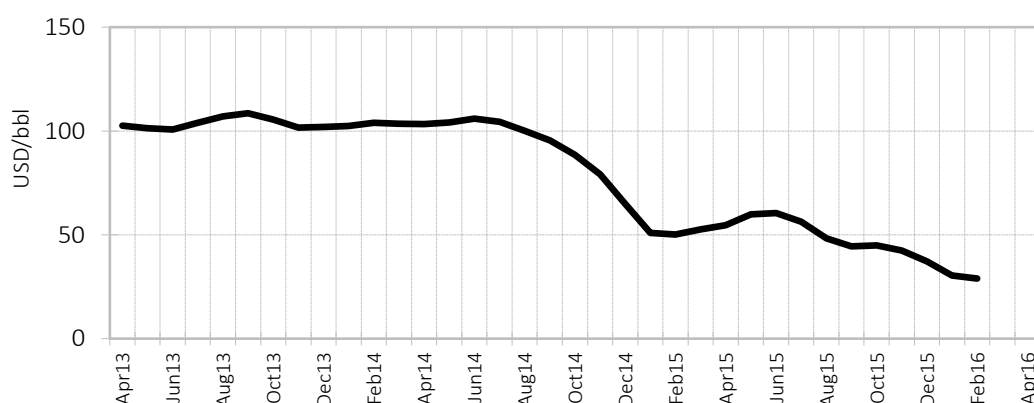
O preço do petróleo e de outros insumos fósseis é um parâmetro de grande relevância para definição da viabilidade ou da inviabilidade de produtos da biotecnologia industrial, justamente porque estes frequentemente concorrem com aqueles por uma mesma função – frequentemente, os produtos finais das duas rotas (petroquímica e renovável) são idênticos. Assim, a manutenção do preço de petróleo acima de certo limiar (cerca de US\$ 70 segundo as pessoas que entrevistamos) é essencial para viabilizar a biotecnologia industrial.

Segundo a revista *The Economist*, de julho de 2014 a janeiro de 2016, o preço do petróleo caiu 75%, de US\$110 por barril para menos de US\$27, atingindo o menor nível de preços para estes produtos desde 2003 (*The Economist*, 2016b). A revista destacou o papel da Arábia Saudita e de demais países da OPEP em um esforço para retirar do mercado concorrentes que operam com custos de produção menos vantajosos:

The world is drowning in oil. Saudi Arabia is pumping at almost full tilt. It is widely thought that the Saudis want to drive out highercost producers from the industry, including some of the fracking firms that have boosted oil output in the United States from 5m barrels a day (b/d) in 2008 to over 9m b/d now. Saudi Arabia will also be prepared to suffer a lot of pain to thwart Iran, its bitter rival, which this week was poised to rejoin oil markets as nuclear sanctions were lifted, with potential output of 3m4m b/d (The Economist, 2016b).

No mesmo sentido, a International Energy Agency (IEA) apontou uma queda de mais de 70% no custo de importação do petróleo cru de 2013 a 2016, conforme demonstrado no gráfico a seguir:

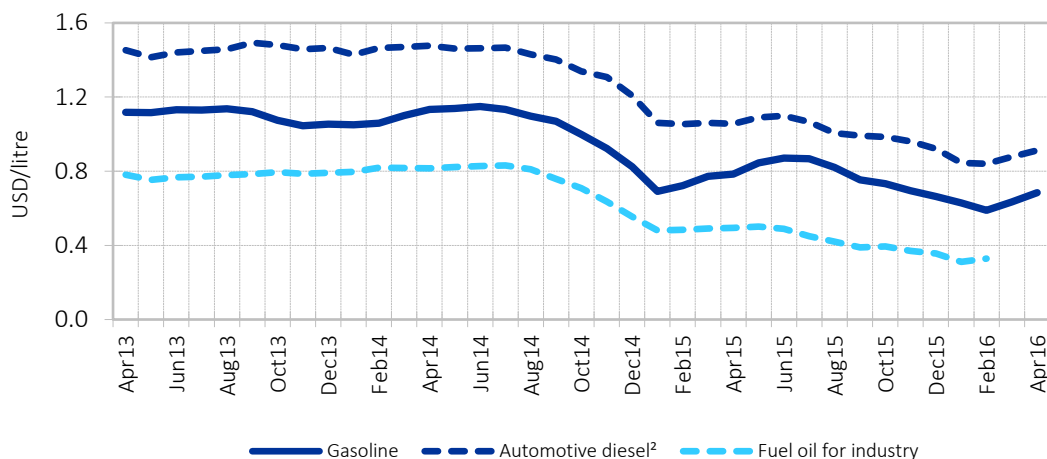
Figura 13: Custos de importação do petróleo cru



Fonte: International Energy Agency (IEA)

Ao mesmo tempo, a Agência revela uma queda da mesma magnitude no preço ao usuário final para combustíveis de transporte de base fóssil, conforme podemos ver no gráfico abaixo:

Figura 14: Preço ao usuário final de derivados do petróleo



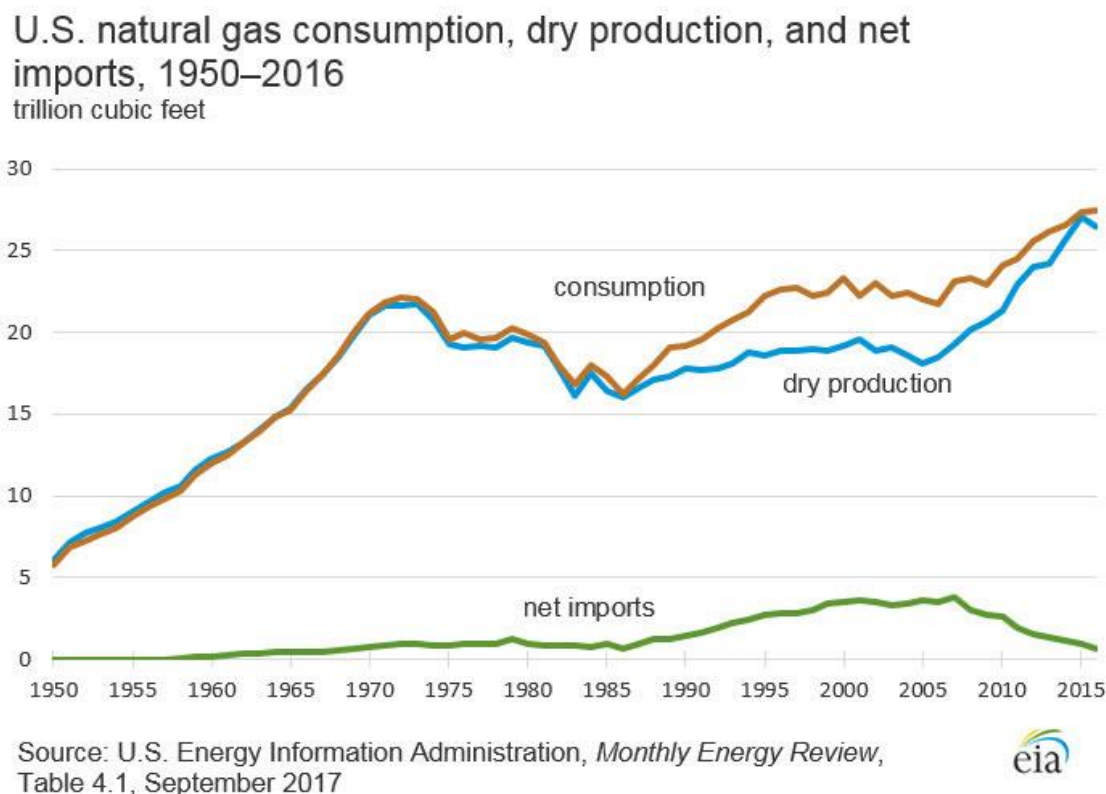
Fonte: International Energy Agency (IEA)

Para entender a queda brusca do preço do petróleo e dos seus derivados na metade da década de 2010, é necessário atentar também para o comportamento da produção de petróleo não convencional, em especial petróleo e gás de xisto nos Estados Unidos. Petróleo de xisto é um petróleo não convencional produzido a partir de fragmentos de xisto betuminoso e através de pirólise, hidrogenação ou dissolução térmica. Estes processos convertem a matéria orgânica no interior da rocha (querogênio) em petróleo e gás sintéticos. O petróleo que resulta deste processo pode ser imediatamente utilizado como combustível ou então pré-refinado de modo a poder ser usado como matéria-prima em refinarias.

Os EUA hoje são praticamente autossuficientes na produção de gás natural devido ao aumento da produção oriunda de fontes não convencionais nos últimos anos, em especial após 2005. A produção de gás natural dos EUA em 2016 foi o a segunda maior da história, ficando pouco abaixo da registrada em 2015. Os aumentos de produção verificados desde 2005 são resultado do avanço em técnicas de perfuração horizontal e técnicas de fraturamento hidráulico, principalmente em xisto, arenito, carbonato e outras formações geológicas. Em 2016, a produção de gás natural seco dos EUA foi igual a cerca de 97% do consumo de gás natural dos EUA (US Energy Information Administration, 2017)³⁰.

³⁰ É interessante notar como os preços relativos de insumos substitutos (à biomassa) exercem um papel importante no direcionamento de esforços de pesquisa e desenvolvimento na biotecnologia industrial. Com a projeção de custos relativamente baixos para o gás natural (ao menos no médio prazo), os bioprodutos estarão em desvantagem econômica em relação aos produtos químicos produzidos a partir de gás natural,

Figura 15: Consumo, produção e importação líquida de gás natural pelos EUA, 1950-2016



Fonte: extraído de US Energy Information Administration, 2017

É interessante notar como o preço relativo de insumos substitutos à biomassa podem exercer um papel importante no direcionamento de esforços de pesquisa e desenvolvimento na biotecnologia industrial. Com a projeção de custos relativamente baixos para o gás natural (ao menos no médio prazo), os bioprodutos estarão em desvantagem econômica em relação aos produtos químicos produzidos a partir deste insumo, uma decorrência direta das diferenças nos custos da matéria-prima). Um exemplo é o metanol e seus derivados. Com gás natural de baixo custo, as projeções sugerem que os Estados Unidos poderão obter 33 milhões de toneladas adicionais de capacidade de metanol na próxima década, o que é mais de oito vezes a produção doméstica atual. Portanto, a concorrência no mercado de metanol e outros derivados, como o ácido acético, será muito dura para produtos derivados da biomassa. No entanto, o advento do gás natural barato também traz oportunidades à biotecnologia industrial,

simplesmente por causa das diferenças nos custos da matéria-prima). Um exemplo é o metanol e seus derivados. Com gás natural de baixo custo, as projeções sugerem que os Estados Unidos poderão obter 33 milhões de toneladas adicionais de capacidade de metanol na próxima década, o que é mais de oito vezes a produção doméstica atual. Portanto, a concorrência no mercado de metanol e outros derivados de biomassa, como o ácido acético, será muito dura.

especialmente para produtos químicos de quatro (C4) e cinco carbonos (C5), como isopreno e butadieno. Esses produtos químicos são tradicionalmente subprodutos da produção de etileno e são produzidos com rendimentos mais altos quando as matérias-primas mais pesadas, como a nafta, são convertidas. Atualmente, o etileno está sendo produzido pela fissuração desses gases de xisto mais leves, o que resulta em altos rendimentos de etileno, mas baixos rendimentos desses subprodutos comercialmente importantes. Consequentemente, houve um suprimento limitado de alguns produtos químicos, incluindo butadieno e isopreno, nos últimos anos, o que levou a grandes flutuações de preços e aumento do potencial de mercado de produtos de origem biológica (Biddy, Scarlata & Kinchin2016).

O comportamento do preço do petróleo e de outros insumos fósseis nos últimos anos foi extremamente deletério para os projetos pioneiros da biotecnologia industrial, pois grande parte destes estava centrada no desenvolvimento de produção em ‘escala petroquímica’ de biocombustíveis e outras commodities, que são produtos com margens de lucro relativamente pequenas. A queda vertiginosa (e não antecipada) dos preços dos insumos fósseis e dos seus derivados fez com que muitos projetos de biocombustíveis e biocommodities avançados se tornassem economicamente inviáveis. Enquanto muitos destes projetos faliram, outros assumiram novos contornos, transformando as trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial. Este é um assunto que será explorado em detalhes no próximo capítulo, que apresenta os resultados empíricos da tese.

2.6 Capacidades dinâmicas como instrumento de *pivotação* na biotecnologia industrial

O desenvolvimento de práticas produtivas mais sustentáveis na indústria química tem sido incentivado pela combinação de fatores científicos, regulatórios, econômicos e de preferência dos consumidores. Em decorrência, há, no mundo, diversos esforços dedicados ao desenvolvimento de uma indústria mais limpa, baseada em recursos renováveis, na qual a biotecnologia tem potencial para ser o carro-chefe. A humanidade tem usado processos biotecnológicos para produzir alimentos e outros bens desde a Antiguidade. No entanto, foi o desenvolvimento relativamente recente da habilidade humana de manipular o genoma microbiano que ampliou em grande magnitude o potencial de aplicação da biotecnologia a processos industriais. Em diferentes casos, as ferramentas da biotecnologia têm permitido à

indústria química desenvolver novos processos que são mais limpos ou mais eficientes em relação às demais alternativas existentes.

No entanto, são muitos os desafios a serem superados pelas firmas que ‘surfam’ as oportunidades que surgem com o avançada biotecnologia industrial. Há dois principais fatores que têm impedido o desenvolvimento consistente do modelo de biorrefinarias. O primeiro são os riscos extremados da execução dos projetos de desenvolvimento de novas tecnologias. Por exemplo, tecnologias bioquímicas para produção de combustíveis celulósicos frequentemente requerem enzimas que hoje são produzidas de forma exógena ao processo (ou seja, frequentemente são adquiridas) para “quebrar” a parede celular que envolve os preciosos açúcares presentes na biomassa. A aplicação destas enzimas a uma planta de escala comercial não é trivial: embora estas tecnologias possam funcionar muito bem em escalas laboratoriais, escala-las ao nível industrial traz à tona desafios que não podem ser totalmente previstos ou mesmo equacionados com o conhecimento científico disponível, o que traz incerteza ao processo de desenvolvimento tecnológico. As tecnologias de algas, por outro lado, possuem seus próprios desafios, como a otimização de soluções de nutrientes. Grandes atrasos no escalonamento de projetos de firmas que lançaram ações em bolsas, como Amyris (2012) e KiOR (2013) certamente não contribuíram para a confiabilidade dos planos de desenvolvimento da indústria, especialmente se considerarmos que os mercados financeiros tradicionais tendem a exacerbar problemas que ocorrem em projetos inovativos de ruptura.

Em segundo lugar, a capacidade de expansão do modelo de biorrefinarias é altamente intensiva em capital. Como regra básica, as plantas com menores custos de produção (aptas a utilizarem matérias-primas baratas, por exemplo) tendem a requerer um maior custo de capital. O exemplo da estadunidense KiOR, embora não faça uso da biotecnologia, é ilustrativo da alta intensidade de capital da construção de biorrefinarias avançadas. Esta firmaestadunidensetentava desenvolver uma tecnologia termo-catalítica até falir em 2014. Para tanto, construiu sua primeira planta comercial, produzindo gasolina e diesel, por US\$213 milhões. Com a produção esperada de 13 milhões de galões por ano, o custo de capital era de US\$16 por galão. Já a planta de etanol celulósico da Beta Renewables em Crescentino, na Itália, foi construída por US\$105 milhões, o que representa um custo de \$5,20 por galão. Apenas contextualizando, plantas modernas de etanol de primeira geração têm sido construídas para produção de combustível a \$2 por galão (Molchanov, 2014).

Estes obstáculos têm impulsionado a transição das trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial do desenvolvimento da produção comercial de biocombustíveis

avancados e commodities químicas para um outro modelo, cujo cerne é a produção de especialidades químicas e produtos especiais, como melhoradores de solo ou ingredientes nutracêuticos. A principal tese deste trabalho é que esta *pivotagem* está assente na incorporação de novas capacidades dinâmicas. O próximo capítulo é destinado a demonstrá-la. Ele está dividido em duas seções principais, que decorrem diretamente da estrutura metodológica adotada. O primeiro conjunto de resultados refere-se aos estudos de caso de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial. Este primeiro conjunto, por sua vez, subdivide-se em firmas manufatureiras e firmas prestadoras de serviços tecnológicos avançados. O segundo conjunto contém os resultados de entrevistas realizadas com atores relevantes para a biotecnologia industrial no Brasil. As análises de cada um destes dois blocos, neste capítulo, são apresentadas de modo individualizado em uma terceira seção, e são processadas conjuntamente no capítulo de fechamento da tese.

Capítulo 3. Resultados empíricos de pesquisa: estudos de caso e entrevistas

Este capítulo apresenta os resultados empíricos de pesquisa da tese. Em um primeiro momento, são apresentados estudos de caso de sete firmas da biotecnologia industrial. Em um segundo momento, o capítulo traz a sistematização de oito entrevistas realizadas com atores relevantes do setor no Brasil.

Seu objetivo principal é de identificar e descrever as competências organizacionais que estão na base de uma bem-sucedida adaptação a condições cambiantes do ambiente competitivo no qual as firmas da biotecnologia industrial estão inseridas.

Antes de propriamente apresentar os resultados de pesquisa da tese, é apropriado retomar resumidamente a metodologia adotada: primeiramente, foi realizada a construção de um banco de dados com projetos em biotecnologia industrial, constantemente atualizado. O banco conta atualmente com mais de 100 projetos da biotecnologia industrial anunciados entre 2000 e 2017. O desenvolvimento de cada um destes projetos foi constantemente monitorado ao longo da construção da tese³¹. A partir deste banco, foram identificadas empresas de base tecnológica que *pivotaram* do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities para especialidades químicas e produtos especiais, e prestadores de serviços tecnológicos avançados para estas firmas. Sete destas firmas foram então selecionadas para a realização de estudos de caso realizados a partir de pesquisa em fontes secundárias, como artigos, notícias, relatórios e apresentações publicamente disponíveis. Em um segundo momento, o banco apoiou a escolha de atores-chave da biotecnologia industrial no Brasil para a realização de entrevistas semiestruturadas.

³¹ Trata-se de um banco de dados de projetos em biotecnologia industrial cujo objeto é, obrigatoriamente, uma planta industrial. Deste modo, projetos meramente de pesquisa estão excluídos. Para cada projeto, há informações como status, marcos de desenvolvimento, descrição detalhada, levantamento de pessoal técnico-científico, fontes de financiamento, patentes e tecnologia utilizada, dentre outras.

3.1 Estudo de caso de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial

O estudo de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial é adotado como parte integrante da metodologia desta tese como forma de exemplificar com casos concretos a referida transição do “modelo biocombustíveis e commodities químicas” para o “modelo especialidades químicas e produtos especiais”, e por ajudar a identificar capacidades dinâmicas associadas a esta transição.

As firmas selecionadas para o estudo proposto ilustram a notável variedade de estratégias de inovação, de iniciativas empreendedoras e de modelos de negócios que marca a construção da indústria de bioprodutos avançados, bem como convergências e divergências em trajetórias de desenvolvimento entre diferentes firmas.

As firmas selecionadas compõem dois grupos distintos: firmas que manufaturam produtos da biotecnologia industrial e firmas prestadoras de serviços tecnologicamente avançados. Enquanto as primeiras realizaram com sucesso a pivotagem identificada, as segundas agregaram competências que têm se mostrado essenciais à esta transição.

Quadro resumo 2 – Firmas que compõe os estudos de caso

Firmas manufatureiras	Amyris, CoolPlanete Terravia
Prestadoras de serviços biotecnológicos avançados	Genomatica, Ginkgo Bioworks, Arzeda e Zymergen

3.1.1 Empresas manufatureiras

Amyris

A Amyris é uma firma fundada em 2003, com sede Emeryville, California, e uma filial no Brasil. É uma empresa de base tecnológica pioneira na biotecnologia industrial.

Sua principal plataforma tecnológica consisteem uma levedura geneticamente modificada que atua como um hospedeiro para um conjunto de ‘instruções’ de DNA - os cientistas chamam o organismo de *chassi*, como se fosse uma plataforma à qual são acopladas

determinadas funcionalidades desejadas, não presentes no organismo em seu estado ‘natural’. Em face aos objetivos estabelecidos, os engenheiros da Amyris podem ‘equipar’ a levedura com uma variedade de material genético que ‘diz’ ao microrganismo como digerir os açúcares que lhe são oferecidos. O resultado é uma célula que pode (pelo menos em teoria) ingerir açúcares simples e produzir praticamente qualquer coisa, de biocombustíveis a medicamentos, com grande flexibilidade – embora o grau dos desafios a serem superados em cada uma das modificações da levedura varie em relação ao produto final pretendido – e, por consequência, em relação a diferentes ‘configurações’ genéticas do microrganismo.

A história da Amyris tem início no laboratório de engenharia química da Universidade da Califórnia em Berkeley, mais precisamente com Jay Keasling (chefe do laboratório e pesquisador-chefe), Jack Newman, Kinhead Reiling e Neil Renninger (pesquisadores).

Figura 16: os fundadores da Amyris



Fonte: extraído de Relatório Anual da Amyris de 2010

Keasling, conhecido como pai da biologia sintética, tinha o sonho de transformar a biologia em um campo com dinâmica de produção do conhecimento semelhante à da engenharia ou da computação, um mundo no qual células funcionassem como pequenas fábricas (*assembly lines*). Neste mundo, um biólogo seria capaz de combinar genes, testar o conjunto resultante e, caso este fosse eficiente, utilizá-lo como insumo para ‘imprimir’ um microrganismo para utilização industrial, uma abordagem muito mais assertiva do que os métodos até então utilizados para a ‘construção’ de organismos geneticamente modificados,

que consistem basicamente na adição ou subtração de elementos genéticos a microrganismos ‘naturais’, a partir de abordagens do tipo ‘tentativa e erro’, de baixa assertividade – e, consequentemente, de grande custo. A Amyris nasceu com o objetivo de desenvolver comercialmente esta ideia (Grushkin, 2012).

A primeira importante realização da firma foi o recebimento, em 2005, do apoio financeiro da Bill & Melinda Gates Foundation no valor de US\$ 42,6 milhões para o desenvolvimento de tecnologia capaz de criar cepas microbianas para produzir ácido artemisínico - um precursor da artemisinina, um medicamento antimalárico eficaz. A partir deste apoio fundador, a Amyris desenvolveu uma plataforma tecnológica assente na biologia sintética, baseada inicialmente na atuação de uma bactéria (*Escherichia coli*) geneticamente modificada capaz de converter açúcares derivados de plantas no princípio ativo-alvo (Amyris, 2010).

A partir do segundo semestre de 2006, a Amyris esteve em franca expansão, impulsionada pelos investimentos que recebeu de um conjunto de apoiadores de firmas nascentes de diversos setores, que contava com Khosla Ventures, Kleiner Perkins Caufields & Byers (KPCB) e Texas Pacif Group Ventures (TPGV). Em 2008, houve um novo aporte de *venture capital*, desta vez proveniente da Votorantim Novos Negócios (VNN), braço de *venture capital* e *private equity* do Grupo Votorantim, destinado ao desenvolvimento da produção de diesel de cana-de-açúcar (Amyris, 2010).

Os investimentos trouxeram uma nova visão para firma e ampliaram o seu leque de atuação, direcionando as pesquisas e projetos para a área de biocombustíveis, especialmente diesel e combustível de aviação renováveis que, segundo a percepção da firma e do seu grupo de investidores à época, eram os bioprodutos com maior potencial comercial de curto prazo.

A Amyris passou então a focar seus esforços para o desenvolvimento da produção industrial de farneseno, um hidrocarboneto que pode servir como *building-block* para a produção de biocombustíveis – diesel, em especial. É ilustrativo deste foco inicial da firma esta passagem retirada do seu relatório anual de 2010, o primeiro disponível no seu site (este foi o ano em que a firma fez sua primeira oferta pública de ações):

*“Why farnesene? Because it’s a hydrocarbon molecule that, with minor modifications, **can be flexibly adapted to serve as an alternative to fossil fuel-derived products**”* (Amyris, 2010).

Destaque em negrito do autor da tese).

Para atender às suas novas necessidades produtivas, em parte imposta pela entrada dos novos investidores e pelas expectativas destes em relação ao retorno do seu investimento, a Amyris precisou direcionar suas pesquisas para a manipulação genética de um micro-organismo que fosse mais robusto e eficiente na produção de biocombustíveis do que a bactéria *Escherichia coli* usada inicialmente para produção do medicamento para malária. Uma cepa da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi a escolhida para sofrer as modificações genéticas necessárias para a produção da nova molécula de interesse. As alterações direcionaram o metabolismo da bactéria para produção de hidrocarbonetos, através da ativação da rota dos isoprenóides, sendo a via de síntese de etanol inibida (Bomtempo & Chaves, 2012).

Os investimentos recebidos no período de 2006 a 2008 propiciaram, no ano de 2008, a criação de uma subsidiária no Brasil, a Amyris Brasil S.A. Com grande parte dos acionistas brasileiros, a companhia se estabeleceu na cidade de Campinas, interior do estado de São Paulo. Sua subsidiária Amyris do Brasil Pesquisa e Desenvolvimento de Biocombustíveis Ltda iniciou suas atividades mediante a formação de uma joint venture com a Crystalsev, em 2008 (Guazzelli e Perez, 2010).

Em 2011, a Total entrou para o capital da Amyris com uma participação de 22% que correspondeu ao aporte de US\$135 milhões. A companhia também recebeu um aporte de aproximadamente R\$10 milhões do grupo Stratus, através do seu fundo Clean Tech. O grupo fomentou a arrecadação de recursos adicionais para a subsidiária brasileira, a qual arrematou, no total, R\$ 140 milhões (Amyris, 2012).

Em 2010, a Amyris Inc. recebeu pela primeira vez subsídios do governo americano, oriundos do Departamento de Energia (US DOE). Foram concedidos no total US\$24,3 milhões para que a firma pudesse alavancar e expandir as pesquisas de laboratório situados na Califórnia. O incentivo financeiro também visou desenvolver a capacidade de produção de combustíveis renováveis e produtos químicos derivados de sorgo sacarino (Amyris, 2011).

Em 2008, a Amyris Brasil obteve o Certificado de Qualidade de Biossegurança (CQB), emitido pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), e em 2010 a

autorização para utilizar organismos geneticamente modificados (OGM) no Brasil, os quais seriam importados dos Estados Unidos. A linhagem geneticamente modificada, que foi a autorizada a ser importada e utilizada aqui no país pela companhia, foi a -Y1979- originária da levedura *Saccharomyces cerevisiae* (Amyris, 2010).

Já se sabia, evidentemente, que o farneseno era uma molécula do tipo *building-block*, ou seja, que podia ser aplicável na geração de uma ampla variedade de produtos. No entanto, a estratégia da firma era a produção em grande escala de biocombustíveis, em especial de diesel, motivada pela obtenção de rápidos retornos financeiros que justificassem o grande montante de recursos financeiros recebidos de diferentes investidores, e viabilizassem a obtenção de novos aportes

Para acelerar a obtenção da produção de níveis comerciais de combustíveis avançados, a Amyris firmou uma série de parcerias com usinas de açúcar e álcool no Brasil, para obter acesso a fontes baratas e seguras de açúcar, sua principal matéria-prima.

A ideia da Amyris era construir plantas anexas às usinas para utilizar o açúcar de cana como matéria-prima para a produção de biodiesel e, em um segundo momento, combustível de aviação. A Amyris assinou acordos de fornecimento com quatro produtores de açúcar e etanol no Brasil: São Martinho, Cosan, Bunge e Guarani. Além disso, firmou quatro contratos de suprimento de biodiesel derivado do farneseno com a Shell Western Supply and Trading Limited, para distribuição nos EUA. Em 2011, entrou em operação a sua primeira planta comercial da , em Brotas (SP), adjacente à Usina Paraíso, com fermentadores de 100.000 e 200.000 litros (Elabora Consultoria, 2014; Grando, 2013).

Aqui é importante pontuar uma diferença fundamental entre a produção de biocombustíveis e de especialidades químicas. A produção de biocombustíveis tem margens de lucro pequenas, o que significa que o preço da matéria-prima utilizada tem grande impacto no resultado final. Estar próximo a fontes baratas de açúcar (como às usinas brasileiras), então, é importante para a competitividade. No caso das especialidades, como as margens de lucro são relativamente maiores, estar próximo à fonte de matéria-prima não é tão importante (como nos combustíveis e commodities). Outros fatores passam a ser mais decisivos na decisão de localização de uma instalação industrial, como a presença de mão-de-obra qualificada e de serviços avançados.

Antes da construção de sua planta industrial no Brasil, a Amyris operou fermentadores em escala de laboratório e plantas piloto em instalações próprias em Emeryville, Califórnia, e

em Campinas, no Brasil, bem como dois fermentadores de 5.000 litros na unidade de demonstração, também no Brasil (Elabora, 2014).

Havia ainda o projeto de inauguração de outras duas plantas comerciais: uma em Sertãozinho (SP), para produção de diesel, e outra em Pradópolis (SP), uma joint venture com o grupo São Martinho denominada SMA Indústria Química S.A. A expectativa da firma, ainda segundo seu relatório anual de 2010, era de produzir 600 milhões de litros de farneseno por ano (Amyris, 2010; Elabora, 2014).

No entanto, no decorrer do desenvolvimento de sua tecnologia, a Amyris enfrentou sérias dificuldades na passagem da produção de biocombustíveis em escala de laboratório e piloto para a escala industrial. O periódico *Biofuels Digest* descreveu a agrura da firma da seguinte maneira:

“In this case, as the yeast were multiplied up to fill the big fermenters, they evolved slightly in each duplication step, 60 in all. Now, keep in mind that these organisms really weren’t designed by Nature to make this much farnesene. So, the mutations generally were in the direction of reducing farnesene production, and translating that carbon back into organism growth. The low-growth mutations would rapidly take over the fermenter. Amyris got day 1, day 2, day 3 normal, day 4 master alarms going off everywhere as the production dropped off. So, Design-Build-Test-Learn until they found a way to suppress the growth of the mutations, by denying an amino acid (associated with the farnesene pathway) vital to organism growth. (...) Design the code, load the DNA, execute it into yeast, 120,000 permutations a month, of which 118,000 are random evolutions based around the 2000 designed projects. The focus? The search for farnesene yield (...) To the extent today that the production organism has 80,000 new DNA base pairs, and 40,000 of the old ones knocked out — out of 12,000,000 base pairs in the original DNA. That’s around a 1% variation in around 10 years. And keep in mind, this is not the rate of mutation — this is the rate at which changes have become a fixed part of the production organisms. Successful evolutions, if you will. (Biofuels Digest, 2015 a).”

A passagem acima revela a incerteza que atinge firmas no escalonamento de (bio)tecnologias revolucionárias. Muitos dos problemas encontrados na produção industrial

não podem ser antecipados em fases anteriores de desenvolvimento, mesmo com grandes investimentos em plantas piloto e demonstração. Há um aprendizado sobre o funcionamento da tecnologia que só pode ser obtido “by doing”³².

A firma ainda tentou um segundo modelo de operação, que também parece não ter funcionado a contento, denominado modelo “plug-and-play”. Com o intuito de aumentar a escala produtiva, a companhia passou a realizar acordos visando a produção contratada para os produtos que desenvolvia, especialmente na América do Norte, Europa e Brasil. A ideia de se produzir de forma contratada visou evitar os custos iniciais de planejamento e construção de novas plantas, bem como acelerar o início do processo produtivo – e da obtenção de receitas – uma vez que não é necessário construir planta alguma para iniciar a operação. As três unidades contratadas foram: Biomin Brasil Nutrição Animal Ltda, no Brasil; Antibióticos SA, na Espanha e Tate & Lyle, nos Estados Unidos (Amyris, 2012).

No entanto, os planos da firma foram severamente impactados pelo rápido aumento do preço do petróleo verificado a partir de 2012. Em 2011, a firma produziu 1 milhão de litros de farneseno, frente a 6 milhões prometidos. Em 2012, seu plano de expansão foi paralisado, com desistência de construção da segunda planta (São Martinho), que deveria ser duas vezes maior do que a primeira (Paraíso). O atraso na construção da fábrica também resultou em uma queda abrupta do valor de mercado da empresa. Em 2011, o preço das ações da Amyris atingiu US\$33 por ação. Em 2012, a firma reportou perdas de US\$95 milhões no último quadrimestre, e preço das ações caiu para \$1,52. Em 31 de dezembro de 2012 a cotação representava menos de um décimo do maior valor registrado, que ocorreu em 3 de fevereiro de 2012 (Grando, 2013).

A Amyris, então, mergulhou em uma profunda crise, em parte pela sua dificuldade em desenvolver sua tecnologia e escalonar os processos produtivos no *timing* inicialmente esperado.

Foi então que a firma tomou a decisão de alterar sua estratégia tecnológica e seu modelo de negócios. Ao invés de biocombustíveis, passou a atuar no desenvolvimento de soluções para três nichos: *Health & Wellness*, *Clean Skin Care*, e *Flavor & Fragrance Pure Ingredients*. A seguinte passagem, retirada do relatório anual de 2017 da firma, revela esta transição estratégica:

³² O conceito de learning by doing remete ao conhecimento empírico ou tácito que é obtido em atividades práticas (ou rotineiras) de aprendizado.

“We are delivering industry-leading growth and profitability in markets where we have an advantaged position. We’ve had 100% commercial success with each product we’ve developed, scaled and commercialized over the last four years. This is unprecedented in our industry and continues to reflect the advantaged business model we’ve developed in collaboration with our partners.

The following three characteristics are driving our collaboration selection criteria and underpinning our product revenue growth momentum:

- *Products where the chemistry is complicated and can be better done through biology and fermentation — we deliver natural, better performing products through a sustainable process.*
- *Products where we can deliver a 30% or better cost advantage than the average current sources.*
- *Markets that are experiencing growth at 2X gross domestic product (GDP) or better.*

*In the first half of 2017, we made the decision to monetize one of our lower margin molecules, farnesene, in certain fields of use while retaining any associated royalties. This led to discussions with our partners and ultimately, we made the decision to license farnesene to Royal DSM for use in two of these fields. During the discussions with DSM, we also made the decision to sell to DSM our Brotas manufacturing facility, **which was purpose built for farnesene production for fuels — a business we’re no longer active in.** Prior to that, we had been making a variety of products at this plant for which it was not designed to handle. This was not cost effective and had a negative impact on our operating margins. **We have now exited bulk commodity manufacturing and plan to continue to review our business to remove products with less attractive margins.** (Amyris 2017, Relatório Annual, pp. 2. Grifo em negrito do autor da tese)”*

E ainda:

“We delivered (in 2017) our best revenue year to date since exiting the fuels business with Performance Health and Wellness representing about \$77 million of our revenue. This core market alone has delivered a cumulative aggregate growth rate of 716% from 2015 – 2017 and we expect continued strong growth through 2022 (Amyris 2017, Relatório Annual, pp. 3).”

A mudança de foco exigiu da Amyris a incorporação de novas competências de marketing e distribuição, o que motivou o estabelecimento de relações próximas com os usuários dos seus produtos ou com desenvolvedores de novas aplicações para suas moléculas. Assim:

For marketing and distribution, we’ve entered into alliances with Soliance, a leading provider of renewable ingredients to the cosmetics industry, and Cosan Indústria e Comércio S.A., a leading producer of lubricants in Brazil. We’ve forged a development and commercialization agreement with an affiliate of Total S.A. that we expect will initially focus on renewable lubricants and jet fuel, and we are also engaged with Firmenich and Givaudan— global flavors and fragrances companies—to develop and commercialize key ingredients for that target market (...) Several of these agreements involve key collaboration partnerships on vitamins and nutrition products for animal and human health. This will continue to be one of the strongest growth areas of our business following our entry into the vitamin E market. (Amyris 2017, Relatório Annual, pp. 10)

A firma realizou então uma alteração estratégico seu modelo de atuação e de realização de negócios, com migração da área de combustíveis para o desenvolvimento de especialidades químicas e produtos especiais de base renovável. Isto se traduziu na busca por trajetórias tecnológicas relacionadas a moléculas de maiores margens, com aplicações de nicho, diferentemente dos combustíveis derivados do farneseno (cujo negócio e estrutura de operação associadas acabaram sendo vendidos à DSM) . Um passo importante nesta direção veio em 2015, quando a Amyris recebeu aporte para pesquisa de longo prazo (Multi-Year

Technology Investment Agreement) da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Defesa dos EUA (US DARPA), no valor de US\$ 35 milhões, para a criação de novas ferramentas de pesquisa e desenvolvimento e novas tecnologias para reduzir significativamente o custo e o tempo de introdução de novas moléculas no mercado como parte do programa Living Foundries da Agência³³. Em 2017, com o resultado deste projeto, a Amyris anunciou ter expandido com sucesso suas competências em engenharia e otimização de cepas para 26 precursores metabólicos-chave, utilizando múltiplos microrganismos. Segundo anúncio da firma aos investidores:

*“The development and optimization of metabolic networks to these 26 metabolic intermediates and many different pathways beyond terpenoids allows Amyris to develop an **industrial-scale fermentation process for virtually any biological molecule**. In addition to the expansion of the range of metabolic precursors, Amyris has also successfully expanded its industry-leading high-throughput *S. cerevisiae* strain construction and testing pipeline to several other industrially-relevant organisms.*

These advancements have the cumulative effect of drastically reducing the R&D costs and timelines for developing a commercial process for any biological target, irrespective of the final application of the molecule. This is empowering Amyris with additional resources to develop next-generation capabilities to further advance its competitive position and accelerate its capabilities to produce go-to-market sustainable supply solutions at industrial scale for its partners.” (Amyris, 2017)

³³ O Programa Living Foundries da DARPA é destinado a “enable adaptable, scalable, and on-demand production of high-value molecules that are often prohibitively expensive, unable to be domestically sourced, and/or impossible to manufacture using traditional synthetic approaches by programming the fundamental metabolic processes of biological systems to generate a vast number of complex molecules that are not otherwise accessible. Through Living Foundries, DARPA is transforming synthetic biomanufacturing into a predictable engineering practice supportive of a broad range of national security objectives.” Fonte: US DARPA website. Disponível em: <https://www.darpa.mil/program/living-foundries>. Acesso em 19/09/2018.

Cool Planet (ex-CoolPlanetBiofuels)

A Cool Planet é uma firma fundada em 2009, em Camarillo, California, Estados Unidos. Seu objetivo original era o de desenvolver uma nova tecnologia capaz de converter material lignocelulósico, como gramíneas ou madeira, em combustíveis hidrocarbonetos, como gasolina.

A tecnologia de processo em questão consiste em um processador de pirólise térmica-mecânica móvel, baseado em um trailer, no qual a biomassa bruta, como aparas de madeira, resíduos de colheitas e colheitas de combustível não alimentício, é convertida em gás de síntese para produção de um combustível hidrocarboneto convencional e biocarvão que, no modelo de negócios original, era apenas um subproduto - como veremos a seguir, as mudanças nas condições competitivas fizeram com que o biocarvão se tornasse o principal produto da firma. Seu plano estratégico previa a construção de pequenas biorrefinarias que seriam instaladas próximas a fontes de biomassa.

A firma também desenvolveu tecnologias *downstream*, processos simples de conversão catalítica de uma etapa que combinam os fluxos de gás de saída do processador para produzir eBTX (gasolina), diesel sintético e super-combustíveis de altíssimo rendimento.

Em 2010, a firma recebeu um aporte de US\$8 milhões de um fundo que contava com a GE Energy Financial Services. Em 2011, anunciou que a Google Ventures se uniu a uma rodada de financiamento Série B no valor de US\$20 milhões – o investimento do Google foi de cerca de 12 milhões (Biofuels Digest, 2012). Este investimento de Venture Capital foi liderado pela Bridge Venture Partners. Os principais investidores da CoolPlanet são BP, Google Ventures, Energy Technology Ventures (GE, ConocoPhillips and NRG Energy), North Bridge Venture Partners, Shea Ventures e a divisão Constellation da Exelon.

O plano de negócios da firma inicialmente previa a instalação de 400 micro-refinarias nos EUA para produzir combustíveis de uso local até 2020. Segundo pontuou o periódico Biofuels Digest:

“Cool Planet’s production plants will be 100 times smaller than a typical oil refinery, but the company’s largely prefabricated systems can be moved near concentrated biomass sources, reducing transportation costs and increasing efficiency. Those savings will enable the

company to produce gasoline that's competitive with oil refineries at prices as low as \$50 per barrel while eliminating the need for government fuel credits or subsidies. (Biofuels Digest, 2013. Destaque em negrito do autor da tese)."

Em 2013, a firma, já sob o nome Cool Planet Energy Systems, anunciou investimento de US\$168 milhões para a construção de três biorrefinarias na Louisiana, Estados Unidos. O projeto consistia em pequenas plantas modulares *biomass-to-gasoline*. Cada biorrefinaria teria a capacidade para produzir 10 milhões de galões de gasolina por ano (Biofuels Digest, 2013). O periódico Biofuels Digest publicou a seguinte passagem sobre a tecnologia da firma em 2013:

*"Its not hard to see why everyone has been excited — sometimes laced with skepticism — about Cool Planet. With claimed operating costs of \$1.00 to \$1.15 per gallon, and adding another 13 cents or so for the capital costs (amortized over 15 years) – well, you get the picture. **It's drop-in, renewable gasoline, in prospect, for about half the price of the incumbent fossil fuels.** (...) The Cool Planet idea is essentially one of sequestration. Instead of running the biomass over one magic catalyst in a fluidized bed reactor, and then trying to do something with the resulting pyro oil, Cool Planet's systems is based on a series of reactions.*

*Heat biomass into a gas, pass over a catalyst, cool into a soup of liquid molecules, pull off the ones you need (e.g. the gasoline-range molecules); then repeat the process numerous times, with different temperatures and pressures at each reactor "station" and unique catalysts, **until you have converted all the volatile gases into gasoline-range molecules. You are left with a residual bio-char, which can be used as a soil enhancement material to boost biomass yields.***

"The biomass fractioner is fundamentally different than flash pyrolysis, Cool Planet CEO Mike Cheiky told the Digest, "because we fundamentally deconstruct biomass in an orderly fashion, to preserve as much bond energy as possible. By decomposing in orderly process, we dig deeper into the fragments, and this gives us the freedom to prices the carbon in any way we want (Biofuels Digest, 2013. Destaque em negrito do autor da tese)."

Wes Bolsen, responsável por parcerias estratégicas da Cool Planet, declarou em 2014 em entrevista à Biofuels Digest:

*“Cool Planet produces **high-octane, aromatic fuel blendstocks for gasoline, jet, and diesel** (...). The technology has the capability of producing **carbon negative fuel** from the company’s distributed plant model that places the facilities near the biomass feedstock.”*(Biofuels Digest, 2014. Destaque em negrito do autor da tese.)

Como demonstram as passagens acima, ainda em 2014, o foco principal da firma continuava sendo o mercado de biocombustíveis, em especial de biogasolina, ao menos do que se pode depreender dos seus anúncios públicos.

Ainda em 2014, a firma conseguiu uma garantia de empréstimo condicional no valor de US\$ 91 milhões do Departamento de Agricultura Estadunidense (USDA) para apoiar a construção de uma planta comercial em Port of Alexandria, Louisiana.

No entanto, surpreendentemente, ainda em 2014, a firma desistiu de seus planos na Louisiana e anunciou uma outra planta para a produção de aditivos para o solo em Camarillo, California. A CoolPlanet estava enfrentando dificuldades técnicas no desenvolvimento de sua tecnologia de produção de biocombustíveis. A alta temperatura e baixa pressão, a biomassa é convertida em gases voláteis que, quando resfriados, podem conter milhares de moléculas que, ao serem liquefeitas, continuam a reagir umas com as outras – é por isso que muitos sistemas baseados em pirólise sofrem com a falta de estabilidade. Quão maior for a câmara de pirólise (*pyrolysis chamber*), mais imprevisíveis serão as reações derivadas - por isso, os sistemas de pirólise frequentemente enfrentam grandes problemas com o dimensionamento dos resultados de escala comercial com base naqueles obtidos em testes de bancada ou piloto.

Em 2014, o CEO da firma relatou para a Biofuels Digest os problemas que estavam sendo enfrentados no desenvolvimento da sua plataforma tecnológica voltada a biocombustíveis:

” I was active on the NREL advisory board, and there had been work on pyrolysis, and I thought pyrolysis had a legitimate chance, but one of the biggest challenges was the second

*carbon stream. In fast pyrolysis, there generally are three streams — a gas stream that can be burned for power, a liquid bio-oil, and a residual black carbon-rich product generally known as bio-char. Elsewhere we look at the challenges and opportunities with bio-oil — **but one of the applications that has been tried for years with biochar is as a soil amendment, given that it is somewhat related to ‘terra preta’, a charcoal-like product used by natives for years to add carbon to the poor soils of the Amazon region*** (Biofuels Digest, 2014. Destaque em negrito do autor da tese).

Devido às dificuldades enfrentadas com o modelo de negócios original, a Cool Plante migrou do desenvolvimento da produção de combustíveis para se dedicar à produção de aditivos para solo (vendidos com a marca CoolTerra) e suplementos para a dieta animal (CoolFauna).

A conversão da tecnologia da produção de biocombustíveis para a produção de aditivos para solos não foi trivial. Ainda segundo o CEO:

“There have been lots of failed attempts,” said Wilson. “In many of them, biochar actually did a good job of killing everything in a given radius, instead of making plants stronger (...). So I thought there really could be some impact — we really could address this carbon opportunity. So, we went about the job of improving biochar (...). Products that can have impacts at this level are going to have big margins because of the value for growers. So, even if it has set backs in performance with a given application at commercial-scale, there are going to remain big opportunities from a market development point of view.” (Biofuels Digest, 2014a)

Em 2017, a firma realizou uma rodada Serie A de financiamento na qual captou \$19.3 milhões, que contou com a liderança dos fundos Agustín Coppel e North Bridge Venture Partners. Entre 2016 e 2017, a Cool Planet captou perto de US\$30 milhões (Biofuels Digest, 2017b).

A proporção entre os produtos gerados pela pirólise depende das configurações do sistema – este pode ser adaptado para otimizar a produção de gasolina ou de biocarvão, a depender da estratégia de cada firma. A Cool Planet, nos primeiros anos após sua fundação,

tinha foco exclusivo em combustíveis. No entanto, com as dificuldades técnicas que enfrentou no desenvolvimento do seu processo de pirólise, a firma alterou seu fluxo de produtos, em prejuízo da produção de gasolina. Para atuar no mercado de aditivo de solos, a firma teve que acessar competências organizacionais para distribuição do seu produto.

A análise de uma patente recentemente concedida à Cool Planet pelo escritório estadunidense de propriedade intelectual (USPTO) revela quais as competências que a firma necessitou desenvolver para criar uma aplicação para o *biochar* que seu processo de pirólise gerava:

“The present invention relates to a method for producing biochar aggregate particles, including, but not limited to agglomerates, extrudates, pellets, or granules, from biochar using starch or other binding material and/or additives to ease application, enhance soil health, and increase water retention in the soil.

The method includes producing a biochar aggregate particle that may contain biochar, or a mixture of biochar, binders, fillers, and other additives such as microbial products, bacteria, plant nutrients, minerals, agricultural chemicals, fertilizers or animal vitamins, medications, or supplements.

In one example, the method includes, collecting treated and/or untreated biochar particles, mixing said biochar particles with water and one or more binders, such as a starch, polymer, clay, or lignin, to create a slurry, filter pressing or de-watering the slurry to create a paste and extruding the paste through an extruder and creating biochar aggregate particles. Optionally, additives can be mixed with the slurry or paste. If collecting treated biochar particles, the particles may be treated in advance, for example pH adjusted or treated to remove deleterious substances. (Fonte US20170197192A1 Biochar aggregate particles. Disponível em <https://patents.google.com/patent/US20170197192A1/en>. Acesso em 26/06/2019)”

Além de competências técnicas, a Cool Planet também necessitou acessar novas competências em marketing e distribuição, já que o mercado de biocombustíveis, que era o foco inicial da firma, não é propriamente o mesmo do de fertilizantes: a infraestrutura de distribuição não é a mesma, os clientes não são os mesmos e, portanto, as competências de acesso ao mercado também não são as mesmas. Para superar estas dificuldades, a Cool Planet estabeleceu parcerias com Helena Chemical, J.R. Simplot, Triangle Chemical Company e AG RX, firmas com experiência no mercado de produtos para a agricultura.

Terravia (ex-Solazyme)

A Solazyme, que anos depois se transformaria em Terravia, foi fundada em 2003 por Jonathan Wolfson e Harrison Dillon, com o objetivo de produzir óleos de alto valor industrial a partir de algas. Está sediada em South San Francisco, Califórnia, Estados Unidos, e possui uma filial no Brasil, com escritório em São Paulo.

A Solazyme, no seu relatório anual de 2012, se descrevia como uma firma “pioneira no desenvolvimento de uma plataforma tecnológica da biotecnologia industrial baseada na habilidade de microalgas em produzir óleos”. A firma pretendia utilizar equipamentos de fermentação que são comuns na indústria para escalonar e acelerar a produção natural de óleo destes microrganismos. A plataforma pretendia ser flexível com relação ao uso de diferentes matérias-primas, como sucrose derivada da cana-de-açúcar, dextrose derivada do milho e açúcares lignocelulósicos.

A Solazyme adotou uma abordagem tecnológica que se diferenciava bastante das demais firmas focadas no desenvolvimento de biocombustíveis avançados a partir de algas: enquanto a maioria destas estava focada no desenvolvimento de tanques abertos de produção, a Solazyme apostou em algas heterotróficas relativamente exóticas, cultivadas em tanques fechados. Em vez de tirar energia da luz solar através da fotossíntese, essas algas obtêm energia consumindo açúcares e podem crescer no escuro em fermentadores fechados de escala industrial. A Solazyme aplicou genética avançada para otimizar as algas para acumular o que se chamava de “óleos adaptados” - óleos triglicérides altamente customizados com grande potencial para uso como plataforma para produção de uma grande diversidade de moléculas, precursoras de combustíveis e produtos químicos. As taxas de crescimento inicialmente obtidas pela firma para as algas foram descritas como excelentes (Biofuels Digest, 2015). A

tecnologia desenvolvida pela firma permitia importantes ganhos com a vinculação das cadeias de valor da produção de açúcar, de óleos vegetais (alimentos) e de combustíveis (energia), o que cria sinergias e gera oportunidades de redução de custos (logísticos, por exemplo).

Em 2009, a firma obteve um contrato com a marinha estadunidense (US Navy) para o fornecimento de 20.000 galões de combustível de algas, tanto combustível para navios (US\$8,5 milhões) como para aviões (US\$200 mil). Segundo afirmou o CEO da firma à época:

“This is a step on the road to broad scale adoption” (Reuters, 2009).

Em 2010, a firma recebeu um aporte (*grant*) de US\$ 22 milhões do Departamento de Energia dos EUA (US DOE), no escopo do American Recovery and Reinvestment Act, para a construção de uma planta produtora de diesel a partir de algas nos EUA (US DOE, 2010).

A firma também operava no Brasil. Em 2012, a Solazyme e a Bunge Global Innovation LLC, uma subsidiária integral da Bunge Limited, uma multinacional de alimentos e agronegócio, anunciaram a formação de uma joint venture para construção e operação de uma fábrica de óleos renováveis, em uma área adjacente à usina Moema, da Bunge Brasil. A JV, que operou sob o nome Solazyme Bunge Produtos Renováveis Ltda., previa uma capacidade anual projetada de produção de 100.000 toneladas de óleos triglicérides customizados com aplicações industriais não alimentícias para o mercado doméstico brasileiro (Elabora Consultoria, 2014).

A formação desta joint venture foi o resultado de uma parceria longa, que se iniciou com um investimento por parte da Bunge na Solazyme ainda em 2010, seguido por um Acordo de Desenvolvimento Conjunto financiado pela Bunge, em maio de 2011, dedicado ao desenvolvimento de óleos industriais. Também em maio de 2011, a Solazyme concedeu à Bunge o direito de compra de suas ações, condicionado a uma série de objetivos e prazos vinculados à implementação da JV e à construção da fábrica. Em agosto de 2011, a Solazyme e a Bunge anunciaram um Acordo Provisório estabelecendo os detalhes da constituição e do funcionamento da JV e iniciando a engenharia de construção da planta.

Em 2013, a Solazyme Bunge recebeu financiamento de R\$ 246 milhões do BNDES para implementação da primeira unidade de produção de óleos renováveis a partir de

açúcaresem grande escala no Brasil, utilizando microalgas geneticamente modificadas(BNDES, 2016).

Em 2010, a Solazyme anunciou uma joint venture com a Roquette, uma firma de origem francesa, com atuação multinacional, com larga experiência em tecnologias de fermentação no setor de alimentos. Isto propiciou à Solazyme acesso a amplas fontes de açúcar, e a competências em produção industrial e a capital. A joint venture foi anunciada como:

“(...) an entirely new category of natural, healthy and multifunctional ingredients based on microalgae that help consumers live healthier lives. These ingredients offer superior nutritional properties along with outstanding taste and texture. Founded in 2010 and headquartered in South San Francisco, Solazyme Roquette Nutritionals’ portfolio includes a variety of oil, protein and fiber based products aimed at delivering better tasting foods with a vastly superior health profile compared to ingredients in the market today (Solazyme, 2010)”

Como foi pontuado pelo periódico Biofuels Digest:

“How do you get a good flavor, but with healthy fats (instead of trans fats, for instance) and other nutritional benefits? That was the challenge. The company that could come up with a healthy and palatable flour — many saw a route to riches. Whole algal flour was, as they would write on their website, “A whole food ingredient which significantly improves the nutritional qualities of recipes (reduces fat, optimizes lipid profile) while preserving taste and texture.” It could be used to make “Delicious brownies with lipid profile enhancement (Biofuels Digest, 2015)”

Alguns anos após o anúncio, no entanto, a nova firma enfrentou sérias dificuldades em escalonar a sua tecnologia para atingir níveis industriais de produção. Como a maioria das firmas tecnologicamente imaturas, a Solozyme tinha carência de recursos financeiros para

viabilizar a sua operação comercial, falta de experiência na produção a níveis industriais, e falta de reconhecimento internacional - e de confiabilidade, consequentemente.

Havia, sobretudo, um problema de contaminação nos tanques fechados que afetava o rendimento do processo de fermentação. Como desdobramento, a Roquette, por fim, decidiu retirar-se da joint venture, sob discordância da Solazyme, em 2013 (Biofuels Digest, 2015).

O súbito e inesperado anúncio da dissolução da joint venture com a Roquette teve sérias consequências para a Solazyme. A perda de confiança decorrente do anúncio desdobrou-se em uma queda imediata de 13% no preço das ações da firma.

A causa alegada publicamente pelas empresas para o fim da parceria foram visões diferentes sobre o direcionamento da estratégia de mercado a ser adotada. No entanto, a dissolução criou a suspeita de que a tecnologia da Solazyme não estava funcionando tão bem quanto era esperado. Como pontuou um analista do mercado:

*The history of the Industrial Biotechnology space is littered with major strategic partners pulling out of agreements that struggled during commercialization – **when promise doesn't match up with reality**. Now we can add Roquette to that list...We can presume that if profitability was as near at hand as Solazyme's management team would have us believe, Roquette's hat would still be in the ring* (Biofuels Digest, 2015. Destaque em negrito do autor da tese).

Desfeita a joint venture, a Solazyme tentou produzir e comercializar seus produtos por conta própria, sob a marca AlgaVia. No entanto, os danos causados à sua reputação foram significativos, acabando por minar a capacidade da firma de atrair recursos financeiros para resolver desafios tecnológicos, desenvolver produtos e alcançar novos mercados.

Em 2016, a Solazyme anunciou o abandono do desenvolvimento de biocombustíveis e o direcionamento de seus esforços tecnológicos para o desenvolvimento da produção de produtos alimentícios, nutracêuticos e especialidades químicas, adotando o nome Terravia. Para tanto, recebeu um aporte de US\$28 milhões de um fundo composto investidores do setor

alimentício, como Glenhill Capital, VMG Partners, PowerPlant Ventures, ARTIS Ventures e Simon Equities (Biofuels Digest, 2016).

Esta mudança de foco foi o desdobramento final dos problemas enfrentados pela firma com a crise que se abateu sobre o setor decorrente do comportamento do preço do petróleo a partir de 2012³⁴. Como publicado na Biofuels Digest:

“On the industrials side, it would come as no surprise that there’s the exhaustion powered by \$30-\$40 oil and crashing rig counts that doomed Encapso and made Solazyme’s fuels unaffordable except in boutique quantities” (Biofuels Digest, 2016).

A mudança de estratégia exigiu da Solazyme (agora Terravia) o acesso a competências de aplicação e distribuição dos seus novos produtos, o que foi obtido principalmente através do estabelecimento de acordos com usuários importantes. Assim, por exemplo, em 2016, a Terravia firmou uma parceria com a Unilever para fornecimento de óleos renováveis. A parceria foi um desdobramento de anos de colaboração entre as duas firmas para desenvolvimento de aplicações dos óleos renováveis produzidos pela Solazyme na indústria de cosméticos e de higiene pessoal.

A firma também firmou parceria com Bunge e BioMar Group para distribuição de AlgaPrime DHA - um ingrediente alimentício nativo de algas inteiras rico em ômega-3 DHA - tornando o produto comercialmente disponível em larga escala para produtores de salmão e outros participantes da indústria da aquicultura. Como pontuou um diretor da firma em 2016:

““We are moving forward with a strong business foundation and clear vision,” said CFO Tyler Painter, Chief Financial and Operating Officer. “We have invested significant time and capital in the development of our innovation platform and large-scale manufacturing capability. We enjoy long-standing commitments from partners, led by Bunge and Unilever, who have helped bring our vision to life. Importantly, we have also learned significant lessons

³⁴ Os desafios enfrentados pelas empresas da biotecnologia industrial decorrentes do comportamento do mercado de petróleo são apresentados no Capítulo 3 deste trabalho.

*in scale-up and commercialization, helping to de-risk the inherent challenges in bringing disruptive products to market. **These strengths combined with our refined focus, a proven suite of products and the expanded market knowledge we gain with our new investors and board member, position us well to execute on our opportunities in food, nutrition and specialty ingredients.***” (Biofuels Digest, 2016. Destaque em negrito do autor da tese.)

Em 2017, a Terravia foi adquirida pela Corbion, uma firma holandesa especializada no desenvolvimento e na fabricação de especialidades químicas para os mercados de alimentos, bioquímicos, bioplásticos e biofármacos³⁵. A operação envolveu inclusive a aquisição, pela Corbion, dos demais 49,9 por cento do capital social da joint venture Solazyme Bunge Brasil, operação a partir da qual passou a deter 100 por cento do controle da companhia.

Os problemas enfrentados pela Solazyme em sua trajetória de desenvolvimento são recorrentes no mundo das start-ups da biotecnologia industrial. Como é grande a assimetria de informações entre as firmas (que “surfam” a fronteira científica no desenvolvimento de suas tecnologias) e o público em geral, e mesmo em relação aos investidores, muitas vezes a expectativa criada pela estratégia de comunicação da firma fica muito aquém da realidade (em relação à velocidade de desenvolvimento). Contribuiu para este fato a necessidade imperiosa que estas firmas têm de levantar rapidamente capital, para ser aplicado a atividades que são sabidamente de alto risco.

3.1.2 Firmas licenciadoras de tecnologias ou prestadoras de serviços tecnológicos avançados

Genomatica

A Genomatica é uma firma pioneira na biotecnologia industrial e um dos seus principais expoentes. Fundada em 1998, na Califórnia, EUA, desenvolve e licencia tecnologias de processo *biobased* voltadas à produção de produtos químicos e combustíveis. É, portanto, uma firma que não opera plantas comerciais: ela desenvolve (bio)tecnologias de processo que serão licenciadas para uso por outras firmas em suas atividades produtivas.

³⁵No Brasil, a Corbion atua desenvolvendo atividades relacionadas à produção de ácido láctico e seus derivados, via fermentação do açúcar de cana, e também no mercado de óleos triglicérides customizados.

O foco inicial dos seus esforços tecnológicos nos seus anos mais incipientes estava no desenvolvimento de tecnologias de base renovável para produção de commodities químicas (*bulk chemicals*), que apresentassem melhor desempenho e maior sustentabilidade em relação às contrapartes petroquímicas. Em especial, a firma se concentrou no desenvolvimento de uma tecnologia para produção de 1,4-butanodiol (BDO) renovável. O BDO, produzido em grandes escalas a partir de insumos fósseis, é uma commodity química muito utilizada como solvente ou como insumo na produção de plásticos, fibras elásticas e poliuretanos. A passagem abaixo é reveladora do alinhamento da estratégia de pesquisa da firma em 2016, na ocasião do estabelecimento de uma parceria de pesquisa:

*“The combination of our technologies will allow us to more rapidly extend the benefits of biotech into **many high-volume markets** (...). Genomatica is the perfect ally to help bring the power of our foundries to **mainstream chemical markets**. Genomatica is proven at high-yield bio-based processes, which is essential for widespread deployment of cost-effective technology to **produce major-market chemicals**. (Biofuels Digest, 2016. Destaque em negrito do autor da tese)”*

No mesmo ano, na Itália, entrou em operação a primeira planta comercial para produção de Bio-BDO do mundo, sob operação da Novamont, utilizando a tecnologia de processo desenvolvida pela Genomatica, com capacidade de produção de 30.000 toneladas anuais (Elabora Consultoria, 2014; Biofuels Digest, 2016).

Ainda em 2016, houve o anúncio de que a firma estava trabalhando em conjunto com a AVAPCO, LLC, em um projeto de US\$3,7 milhões para desenvolvimento de biorrefinarias integradas, com foco principal em diesel renovável. Poucos meses depois foi anunciada a parceria com a Versalis para desenvolvimento da produção de bio-butadieno, uma commodity química utilizada na produção de borracha sintética (ou, mais especificamente, biopolibutadieno). O projeto foi antecedido pelo estabelecimento de uma joint venture tecnológica entre as firmas em 2013, que desenvolveu um processo completo para produção de bio-BDO, licenciando a tecnologia resultante para a Versalis. Segundo anunciou a Genomatica à época:

Genomatica applied its ‘whole-process’ systems approach to bioengineering to develop a microorganism that produces 1,3-BDO in a way that enables cost-efficient, scalable fermentation, recovery and subsequent process operations. Versalis leverages its industrial process engineering and catalysis capabilities, plus expertise in overall polymer production, to purify the 1,3-BDO, dehydrate it and then purify the resulting butadiene. Versalis has produced several kilograms of butadiene from 1,3-BDO made in 200-liter fermenters at their research centers at Novara and Mantova, and then made bio-polybutadiene, at the Ravenna R&D centre, using both anionic and Ziegler-Natta catalysis (Genomatica, 2016).

No entanto, apesar de obter avanços significativos no licenciamento industrial de suas biotecnologias, a Genomatica enfrentou problemas com sua estratégia inicial, ou seja, de foco em commodities químicas. A longa passagem abaixo apresentada, um excerto de uma entrevista do CEO da firma (Christophe Schilling) para o Biofuels Digest comparando a Genomatica com outras startups da em biotecnologia da Califórnia que faliram, é reveladora a respeito das dificuldades que a firma enfrentou e de como respondeu a elas:

“(...) Schilling pointed me towards the next building, a character-less dark brown structure, that is notable only because it has a near-empty parking lot, a rare sight in these parts.

“That parking lot used to be crammed with cars,” he said. “This company was formed, they expanded rapidly, it was busy, and then whatever it was they were working on didn’t pass the final stage of the clinical trials, and that was it, they were gone. They might not even known all the specific details of what caused them to fail, and even if they did, they weren’t in control of anything. Either it worked or it didn’t, and the technology and the company was entirely dependent on factors beyond its control, really.

*“I didn’t want to have a company like that. I wanted us to be the UOP of renewables,” Schilling added. In other words, the process technology experts that supported a whole range of molecules and applications. **Yet, with the big-market great molecules they had focused on at first, like BDO, they were entirely dependent on the oil price. Just like the drug companies, no matter how good or work could be, there wasn’t a market demand for renewable BDO with \$20 oil.***

“We had become what I feared, a company dependent on factors beyond our control,” Schilling said. Fonte: Biofuels Digest, 2018. Destaque em negrito do autor da tese).

A Genomatica, então, alterou sua estratégia, e passou a priorizar o desenvolvimento de processos voltados à produção de especialidades químicas, ao invés de commodities. Esta mudança de foco traduziu-se em esforços dedicados ao desenvolvimento de um processo para a produção de 1,3 butadieno glicol (Bio-BG), a partir de um processo conhecido como GENO BG, em tanques de fermentação de 85.000 litros em planta localizada em Leuna, Alemanha. Este processo gera butadieno glicol de base renovável, que pode substituir o acetaldeído fóssil em formulações de combustíveis, um produto tóxico, irritante e carcinogênico. O produto pode ser utilizado também na formulação de cosméticos para melhorar a retenção de umidade e como um carregador de extratos de plantas, além de acrescentar a estes produtos um apelo ambiental. Ainda de acordo com a Biofuels Digest:

So Genomatica changed, Schilling explained. Not how they worked, but how they aimed. Now, they’re looking for molecules like BG, where there is an existing, established market that a young company, that has to move quickly, can work with. And where it is not just about making the same molecule at the same market price, only renewably. Because, what do you do when the oil price drops from \$70 to \$20 in a few months? Either the reality of that, or even just the fear that this might happen, makes corporate licensees tough to find, slow to bring along. Not every company is as forward thinking and pioneering as a Novamont, or has the combination of heft, vision and patience of a BASF (Biofuels Digest, 2018. Destaque em negrito do autor da tese)”.

Esta mudança de estratégia traduziu-se também no desenho das parcerias que a firma passou a realizar. Uma delas, com a Ginkgo Bioworks, foi realizada em 2016. A aliança foi estruturada como uma colaboração de amplo alcance, com o compartilhamento *two-way* de tecnologia e propriedade intelectual, além do desenvolvimento conjunto de novas soluções tecnológicas unificadas, que incluía o design de microrganismos ‘engenheirados’, o desenvolvimento de tecnologias ancilares e o suporte na transferência de tecnologia. Sobre a parceria, escreveu o periódico Biofuels Digest:

“In some ways, Ginkgo needs a company like Genomatica to exist and Genomatica needs a Ginkgo. One develops the organisms that make important chemicals and materials (Ginkgo), and the other develops the process technology that converts a promising organism into a sustainable, affordable, reliable, available alternative to a petroleum-based chemical or material.”(Biofuels Digest, 2016)

A Genomatica, portanto, é outro bom exemplo de pioneiros da biotecnologia industrial que migrou do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities para especialidades e produtos especiais de modo a se adaptar às mudanças em seu ambiente competitivo.

Arzeda

A Arzeda faz parte de uma nova geração de firmas da biotecnologia industrial, que desenvolve tecnologias que fazem parte do campo conhecido como “Biologia Digital”. Em um plano rápido, a firma desenha e produz proteínas. A sua tecnologia proprietária e sua plataforma de biologia sintética possibilitam novos avanços em design para desenvolver instruções genéticas complexas requeridas para a produção biológica de proteínas e enzimas de interesse industrial, altamente customizáveis, para diferentes setores. Estas ‘instruções’ são então inseridas no DNA de leveduras e outros microrganismos, transformando-os em *cell factories* capazes de produzir uma ampla gama de moléculas industriais a partir da fermentação.

A história da Arzeda tem início em 2008, quando os biólogos computacionais Eric Althoff, David Baker, Daniela Grabs e Alexandre Zanghellini, juntamente com outros pesquisadores, publicaram dois artigos seminais nos periódicos de elite *Science*³⁶ e *Nature*³⁷, que revolucionaram o projeto e a síntese de enzimas a partir de ferramentas computacionais. Com o objetivo de implementar seu trabalho pioneiro em aplicações agrícolas e de biotecnologia, a equipe de cientistas lançou as bases para a Arzeda Corporation com operações preliminares no Centro de Comercialização da Universidade de Washington (C4C).

³⁶ Jiang et al. (2008) De Novo Computational Design of Retro-Aldol Enzymes. *Science*. 2008 Mar 7; 319(5868): 1387–1391. doi: 10.1126/science.1152692

³⁷ Making the paper: Enzymes made from scratch to speed up a common chemical reaction. *Nature* volume 453, page xii (08 May 2008)

Baseada na cidade de Seattle, EUA, a firma desenvolve tecnologias avançadas para o design de proteínas e de caminhos metabólicos, que são plataforma para geração de novas e revolucionárias rotas de produção de bioprodutos, incluindo alguns até então impossíveis de se produzir (por rotas biológicas ou não).

A firma já desenvolveu novas proteínas para líderes da indústria química como DowDuPont, Mitsubishi Chemical e INVISTA, além de outras destinadas a melhorar a resistência e a produtividade de culturas agrícolas, para melhorar o desempenho e a sustentabilidade de polímeros avançados e para reduzir o custo de produção de ingredientes de alto valor para a indústria de alimentos (Biofuels Digest, 2017).

A atuação da firma está baseada no uso combinado de duas tecnologias, ambas desenvolvidas por ela: o software Archytas, destinado ao design de proteínas e a ferramenta computacional de design de rotas metabólicas Scylax³⁸. Estas tecnologias são utilizadas em conjunto para identificar e projetar novas vias enzimáticas capazes de produzir moléculas impossíveis de sintetizar por via química convencional.

Esses projetos são implementados e testados pela plataforma de teste e desenvolvimento de alta produtividade da Zymergen, firma localizada em Emeryville, EUA. Em 2016, as duas firmas assinaram um acordo de pesquisa colaborativa de longo prazo para desenvolver novas linhagens e novos processos para fabricar novas moléculas e materiais de alta utilidade, combinando as competências de design de novas enzimas e novas rotas metabólicas da Arzeda com as competências de construção de cepas da Zymergen (Arzeda, 2016).

Em 2016, a Arzeda alcançou um importante marco do seu desenvolvimento com a constituição de uma parceria com a Amyris, como parte de um Acordo de Investimento Tecnológico da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Defesa dos EUA (US DARPA). O *pipeline* de engenharia de proteínas e descoberta de novas rotas metabólicas da Arzeda foi utilizado para produção de duas novas moléculas que foram depois otimizadas pela Amyris. Estas duas moléculas são importantes insumos industriais, sendo utilizadas em aplicações como corantes, ingredientes alimentícios e intermediários farmacêuticos. Sua fabricação atual envolve o uso de substâncias altamente tóxicas e cancerígenas, como cianeto e benzeno, que apresentam riscos à saúde ocupacional, consomem muita energia e levam a

³⁸ Arquitas de Tarento foi um grego filósofo, cientista, estratega, estadista, astrônomo e, mais destacadamente, um matemático. Já Cílix de Carianda (Scylas, em inglês) foi um pioneiro na geografia.

danos ambientais pela geração de efluentes altamente tóxicos. Conforme pontuou o periódico *Biofuels Digest*:

“Under this DARPA-funded TIA, led by Amyris, Arzeda has been developing a high-throughput automated pipeline for the computational design of novel enzymes and pathways for the production of novel molecules in a variety of fermentation hosts. Amyris leverages its world-class high-throughput strain construction and optimization to validate and further optimize the resulting synthetic organisms to industrially relevant levels. The next steps in the project were to produce more molecules for testing and to scale the technology to produce commercial quantities of molecules that are shown to have industrial application.

Back in November 2016, Joel Cherry, President of R&D at Amyris said “These two keystone molecules resulting from Arzeda designs have the potential to be a step change for small molecule production. Their successful commercial production would allow a safer and lower cost alternative to current chemical syntheses, and further demonstrate that biology is a preferred alternative to existing industrial chemistry.”

(Biofuels Digest, 2018).

Recentemente, a firma realizou uma rodada de financiamento Serie A (funding round)³⁹ na qual captou US\$ 15,2 milhões, que contou com investidores como *OS Fund and Bioeconomy Capital, Sustainable Conversion Ventures* e *WRF Capital* (que já havia aportado capital-semente na firma). O financiamento proveniente desta rodada será utilizado para expandir a capacidade de produção da plataforma proprietária de design de proteína e desenvolvimento de produtos, com foco no fornecimento de novas proteínas e novas vias biológicas adequas à produção de bioprodutos em escala comercial (Arzeda, 2017).

³⁹ Segundo a Wikipedia, “A series A round is the name typically given to a company's first significant round of venture capital financing. The name refers to the class of preferred stock sold to investors in exchange for their investment. It is usually the first series of stock after the common stock and common stock options issued to company founders, employees, friends and family and angel investors.” Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Series_A_round. Acesso em 19/09/2018.

Em 2017, a firma anunciou o licenciamento da solução de informática baseada em nuvem da TeselaGen⁴⁰ e a intenção de estabelecer colaborações para desenvolver a sua plataforma de automação de design biológico. O CEO, Michael Fero, recentemente declarou:

“I believe that the combination of Arzeda’s advanced computational design infrastructure with the TeselaGen platform will yield one of the most advanced information technology systems for the forward engineering of microbial systems in the world (Biofuels Digest, 2017).”

Ginkgo Bioworks

Fundada em 2009 em Boston, Massachusetts, a Ginkgo Bioworks se autodenomina “The Organism Company”. A firma é estrategicamente focada no uso de conhecimentos avançados em biologia que possam revolucionar setores como fragrâncias e sabores; cosméticos e produtos de higiene pessoal; e alimentos e nutrição avançada, entre outros.

A firma parte do princípio de que organismos vivos podem atuar como fábricas. Projetar o melhor organismo para determinada função específica requer competências avançadas em design, combinadas a ferramentas da automação, competências analíticas e de desenvolvimento de softwares que possam trabalhar de forma sincronizada. A Ginkgo Bioworks fundou a primeira planta industrial do mundo especializada no design e na produção de microrganismos geneticamente modificados sob encomenda, denominada Bioworks 1, na qual engenheiros prototipam designs biológicos.

A Ginkgo desenha e ‘imprime’ DNA, o código digital que comanda o funcionamento de organismos vivos. Com as competências que possui, a Ginkgo pode desenhar microrganismos customizados para consumidores em diferentes indústrias, de leveduras que produzem ingredientes para a indústria de aromas e sabores até bactérias que podem diminuir a dependência da humanidade de fertilizantes químicos, ou ainda medicamentos (Biofuels Digest, 2018).

⁴⁰ “TeselaGen builds enterprise quality software platforms for designing, building and precision editing DNA, enabling the development of vaccines, biologic medicines, and sustainably sourced chemicals. TeselaGen uses its Synthetic Evolution technology for efficient rapid prototyping and editing of recombinant molecules.” Fonte: TeselaGen Website.

Recentemente, a firma anunciou a construção da sua segunda fábrica, com avanços importantes em relação à que a precedeu. Como pontuou o periódico Biofuels Digest:

A step change in that transition arrived this morning with news that Ginkgo BioWorks announced the launch of their next generation foundry, Bioworks2. With 125,000 square feet and at least 6X expected increase in capacity compared to BioWorks 1, Bioworks2 represents a step change in what is possible for organism design (Biofuels Digest, 2016).

Em 2018, ocorreu o anúncio do lançamento da terceira planta da firma, Bioworks3. Para tanto, a firma captou \$275 milhões em um financiamento adicional incluindo investidores como Viking Global, Y-Combinator's Continuity Fund e Bill Gates' Cascade Investment. Com esta nova rodada, a firma atingiu a captação total de \$429 milhões (Biofuels Digest, 2018). Os novos recursos serão utilizados para financiar a expansão da Ginkgo para novos mercados, em especial para a agricultura. Foi com este intuito de atingir novos mercados que a Ginkgo construiu uma joint venture com o conglomerado alemão Bayer, com investimentos de US\$100 milhões, denominada Joyn Bio. A nova firma visa desenvolver novas tecnologias sustentáveis para fixação de nitrogênio no solo (Bayer, 2018). Ainda em 2018, a Ginkgo anunciou a aquisição da Gen9, uma firma líder na impressão de DNA.

A convergência de competências em computação avançada e em biotecnologia, representada pelo surgimento de firmas como a Ginkgo, está na base da transformação da genética de um campo praticamente 'artesanal', ou de baixa assertividade, para um campo onde novas biotecnologias são geradas de maneira bastante assertiva, sem tantas tentativas e sem tantos erros, diminuindo, portanto, o custo e aumentando a velocidade do processo de desenvolvimento. Avanços como este só foram possíveis devido a uma maior interação entre a biologia e as tecnologias da informação, dando origem a um novo campo do conhecimento, que podemos denominar de biologia digital. Como afirmou o periódico Biofuels Digest em 2016:

Today, our intelligence allows us to parrot and manipulate an organism with the complexity of a microbe. Eventually, we will have the sophistication to design, build and operate factories that work like animals — complex works of inputs, outputs, sensors, barriers,

analytics, waste recovery, separation, and dare we say intelligence. When the factory and the animal converge, you will know that we are there. Large, public companies in practically every industry are starting to test, or invest in biology-driven tech. Now along comes a string of Digital Biology companies whose designers are using automated CAD design platforms — originally developed to assist in the design of rooms and buildings — to revolutionize the design of proteins and metabolic pathways. The list of markets that will be touched by these innovations is long, from agriculture and advanced materials, to specialty chemicals and pharmaceuticals (Biofuels Digest, 2016).

Zymergen

A Zymergen é uma firma de Emeryville, Califórnia, fundada em 2013. A Zymergen usa aprendizado de máquina para desenvolver novas soluções tecnológicas baseadas em genômica para diversos setores, como agricultura, química e farmacêutica.

Aplicando automação & robótica, softwares proprietários de aprendizado-máquina e análise computacional de grande profundidade ao campo da microbiologia industrial, a Zymergen consegue “programar” com grande acurácia microrganismos para produzir moléculas de alto valor comercial.

A plataforma tecnológica da firma combina conhecimentos de três diferentes áreas: automação, aprendizado máquina e genômica, abaixo descritas em maior detalhe:

- a. Automação: sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem a necessidade da interferência do homem.
- b. Aprendizado-máquina: campo de estudo que dá aos computadores a habilidade de aprender sem serem explicitamente programados.
- c. Genômica: ramo da bioquímica dedicado ao estudo do genoma.

Um dos desenvolvimentos recentes da Zymergen são microrganismos para produção de moléculas para utilização em adesivos biomédicos. Estes ingredientes críticos podem ser usados como colas cirúrgicas mais eficazes pelos socorristas — como bombeiros, paramédicos, e tripulações de voo, dentro do corpo ou na pele para fechar uma ferida ou para proteger contra infecções.

A Zymergen também está trabalhando para desenvolver materiais que possam permitir a produção de dispositivos eletrônicos flexíveis usados em telefones celulares, monitores e outros eletrônicos portáteis.

Em 2015, a firma completou uma rodada de financiamento Series A na qual captou \$44 milhões. Em 2016, em uma rodada Series B⁴¹, a firma captou \$130 milhões.

Em 2016, a Zymergen fechou uma parceria com a Arzeda para desenvolvimento de cepas e processos para produção de novas moléculas e materiais combinando as suas competências em construção de cepas com as competências de design de proteínas e enzimas daquela firma.

Em 2016, o CEO da Zymergen, Josh Hoffman, declarou à Biofuels Digest:

“Biology is just too complicated (...). “Our approach is highly differentiated. We don’t use scientific insight and we take the geniuses out of the process. We build machines and use robots that learn to engineer microbes faster than ever, and more predictably, and at a level of performance previously unattainable. The machines move fast, learn fast, and then they get faster and learn faster. And its data driven, so the more you do, the better they get, the better the algorithms become. We’ve been able to show in cases as much as four to five times as much improvement as companies themselves, using the old ways, have been able to achieve in a decade (Biofuels Digest, 2016)”

A aplicação de ferramentas avançadas da matemática e da computação à biologia está revolucionando a biotecnologia industrial. Trata-se da construção de novas possibilidades de geração de novas aplicações, novos usos e novos microrganismos com novas funções que não eram economicamente viáveis no passado recente, mesmo em escala industrial.

⁴¹ Series B financing is the second round of financing for a business through any type of investment including private equity investors and venture capitalists. Successive rounds of financing or funding a business are consecutively termed Series A, Series B and Series C financing. The Series B round generally takes place when the company has accomplished certain milestones in developing its business. Fonte: Investopedia. Disponível em <https://www.investopedia.com/terms/s/series-b-financing.asp>. Acesso em 25/09/2018

3.2 Entrevistas

Entrevistas são fundamentais quando se precisa ou se deseja mapear práticas, crenças, valores e sistemas classificatórios de universos (sociais, econômicos ou tecnológicos) específicos, não claramente delimitados, e em que os conflitos e contradições não estejam manifestadamente explicitados sobre uma ou mais questões referentes àquele universo. Nesse caso, se forem bem realizadas, as entrevistas permitem ao pesquisador fazer uma espécie de ‘mergulho em profundidade’, coletando indícios dos modos como cada um daqueles sujeitos percebe e compreende o objeto de pesquisa em sua realidade, levando à construção de novo conhecimento que permite descrever e compreender questões não prontamente observáveis por outros meios (Galletta, 2013; Duarte, 2004).

O objetivo da realização de entrevistas com atores-chave da biotecnologia industrial no Brasil foi aferir a validade das hipóteses adotadas nesta tese, bem como angariar percepções de natureza mais sutil daquelas obtidas nos estudos de caso realizados de EBTs, não prontamente disponíveis em fontes secundárias. As entrevistas permitem construir novo conhecimento a partir da interação entre entrevistado e entrevistador, de modo que sua utilização vai além da simples coleta de informações.

A etapa de entrevistas se aproveitou do mesmo banco de dados de projetos no Brasil e no mundo utilizado para na etapa de estudo de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial. Neste banco, foi possível identificar firmas e universidades envolvidas em projetos relacionados à biotecnologia industrial no Brasil, e pessoas a estes relacionadas.

Evidentemente, o conjunto de entrevistados não compõe uma amostra estatisticamente representativa da população de atores envolvidos com a biotecnologia industrial no país, mas busca apresentar a diversidade deste universo: há representante(s) de startups e pequenas empresas de base tecnológica, de grandes atores da química e de instituições de ciência e tecnologia e universidades.

Os critérios de seleção utilizados foram: a. a importância das instituições e das pessoas para a biotecnologia industrial brasileira, conforme percebido pelo autor desta tese, um estudioso do setor há 10 anos; b. a acessibilidade que o autor da tese possui às pessoas e; c. a disponibilidade e interesse destas em contribuir. Todas as entrevistas ocorreram por telefone

ou Skype⁴², utilizando um guia semiestruturado, que está descrito em uma seção posterior deste capítulo. A duração de cada entrevista variou de 45 a 90 minutos. Abaixo, é apresentada a lista de entrevistados:

1. Alan Hiltner

Co-fundador e sócio administrador da Bioma4me. Foi vice-presidente da GranBio de 2011 a 2016.

2. Eduardo Loosli

Vice-presidente da Amyris Brasil.

3. Gonçalo Amarante Guimarães Pereira

Professor do Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Foi diretor do Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE). Foi vice-presidente de tecnologia da GranBio (2012-2016).

4. Ivan Coelho

Diretor de desenvolvimento do negócio de etanol de segunda geração da Biochemtex.

5. Jaime Finguerut

Diretor e membro do Conselho do Instituto de Tecnologia Canavieira (ITC). Foi responsável pela de área de estratégia industrial do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) por 39 anos.

6. Jose Vitor Bomtempo Martins

Professor da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Especialista em bioeconomia e em biotecnologia industrial.

7. Luis Fernando Cassinelli

Foi diretor de inovação da Braskem de 2008 a 2016.

⁴² Skype é uma plataforma para realização de conferências envolvendo duas ou mais pessoas. Disponível em <https://www.skype.com/pt-br/>

8. Wilson A. Araujo

É diretor de desenvolvimento de negócios da Nitto America. Foi gerente sênior de inovação em biotecnologia industrial da DuPont (2011-2016).

Quadro resumo 3: atores da biotecnologia industrial brasileira entrevistados

Alan Hiltner	<i>Bioma4me, GranBio</i>
Eduardo Loosli	<i>Amyris</i>
Gonçalo Amarante Guimarães Pereira	<i>UNICAMP, GranBio</i>
Ivan Coelho	<i>Biochemtex</i>
Jaime Finguerut	<i>Instituto de Tecnologia Canavieira (ITC), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)</i>
Jose Vitor Bomtempo Martins	<i>UERJ</i>
Luis Fernando Cassinelli	<i>Braskem</i>
Wilson A. Araujo	<i>DuPont</i>

Para a realização das entrevistas, foi adotada uma abordagem semiestruturada, na qual o entrevistado tem uma maior liberdade para expor suas percepções (em relação a abordagens estritamente estruturadas). Assim sendo, o roteiro elaborado serviu como apoio para direcionar as entrevistas, sem, porém, obliterar a formulação de questões e hipóteses derivadas, não previstas na partida, motivadas pelas respostas inicialmente obtidas. Esta abordagem, de natureza mais opinativa do que entrevistas rigidamente estruturadas, tem a vantagem de capturar nuances na descrição do fenômeno estudado não prontamente observáveis nos estudos de caso realizados e de possibilitar a incorporação de novos elementos e variáveis relevantes, até então desconhecidos pelo pesquisador (Galletta, 2013). O Guia utilizado nas entrevistas é apresentado a seguir:

1. Em sua opinião, porque os volumes produzidos de biocombustíveis avançados, em especial de etanol celulósico, são muito inferiores aos previstos em mandatos como o RFS dos EUA e em projetos industriais pioneiros?

2. *Quais são os principais gargalos que atualmente impedem que a produção de etanol celulósico e outros biocombustíveis avançados atinja níveis de custo e desempenho competitivos, que possibilitem a sua ampla difusão? Há gargalos tecnológicos importantes?*
3. *Quais são as principais competências que as empresas de base tecnológica (EBTs) da biotecnologia industrial têm mobilizado para superar estes obstáculos?*
4. *Neste trabalho, nós identificamos uma migração dos esforços inovativos na biotecnologia industrial de EBTs da produção de biocombustíveis e commodities químicas para especialidades químicas e outros produtos especiais, como nutracêuticos. Você concorda com esta tese?*
5. *Em qual medida esta transição está relacionada aos gargalos que você citou?*
6. *Em sua opinião, o desenvolvimento da produção de especialidades químicas por rota biotecnológica é viável nas condições ‘ambientais’ atuais (as mesmas que dificultam o desenvolvimento da produção de etanol 2G)? Por quê?*
7. *Os desafios técnicos para o desenvolvimento de plantas industriais de base biotecnológica para produção de especialidades químicas são diferentes dos que enfrentam os biocombustíveis e commodities?*
8. *Os ativos complementares importantes no desenvolvimento da produção de biocombustíveis e biocommodities avançados podem ser aproveitados no modelo especialidades químicas & produtos especiais? Quais são os novos ativos que precisam ser construídos ou acessados pelas firmas que empreendem a pivotagem?*
9. *Quais são os parâmetros que balizam a escolha de ‘produtos-alvo’ em projetos da biotecnologia industrial?*
10. *O que faz com que algumas firmas consigam transitar da produção de biocombustíveis e commodities para especialidades químicas e produtos especiais enquanto outras sucumbem?*
11. *Por gentileza, faça os comentários adicionais que julgar necessários.*

3.3 Análise dos estudos de caso e das entrevistas

3.3.1 Análise dos estudos de caso de empresas de base tecnológica

Os estudos de caso de empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial realizados nesta tese permitem afirmar que há, um deslocamento dos esforços tecnológicos, das estratégias e dos modelos de negócio do desenvolvimento da produção em larga escala de biocombustíveis commodities para especialidades químicas e produtos especiais, fabricados em menor volume mas com margens de lucro superiores. Estes ‘nichos’ estão mais protegidos das intempéries dos mercados de commodities, e por isso são um porto seguro para que estas empresas ganhem musculatura em termos do desenvolvimento de ativos e competências e se tornem mais fortes para, talvez, retomarem futuramente seus esforços para desenvolvimento da produção industrial de biocombustíveis avançados.

A importância da realização da etapa metodológica dos estudos de caso de empresas de base tecnológicas reside na demonstração de que *players* pioneiros do setor, como Amyris e Solazyme, que influenciaram muitos outros agentes na tomada de decisão acerca de quais rotas tecnológicas seguir, assumiram direções de desenvolvimento tecnológico e de atuação de mercado muito diferentes daquelas dos seus anos mais incipientes. Esta alteração não é trivial, pelo contrário. Ela reside em grande parte na construção de capacidades dinâmicas de Detecção, de Aprendizado e de Transformação. Estas empresas tiveram que detectar ameaças às suas estratégias iniciais, focadas em biocombustíveis e commodities, e proativamente criar hipóteses derivadas sobre como reagir a estas ameaças. Elas tiveram que aprender com base na resposta às ameaças detectadas, e traduzir este aprendizado em adequações em suas estratégias e modelos de negócio. Ademais e, de modo mais importante, elas tiveram que transformar parcialmente sua base de competências e conhecimentos de modo a lidar com um ambiente competitivo diferente daquele encontrado em seus anos mais incipientes.

A adoção de novas abordagens inspiradas na engenharia para desenvolvimento de novas biotecnologias, como o método *Design Build Test Learn* (DBTL)⁴³, têm dado celeridade ao

⁴³ O ciclo conhecido como DBTL é a base de alguns projetos experimentais e de análise em biologia sintética. Na fase de projeto, o problema é descrito, o caminho de resolução selecionado e as ‘peças’ projetadas ou selecionadas. Na fase de construção, as peças são sintetizadas, montadas e transformadas no organismo hospedeiro de sua escolha. Durante a fase de teste, o organismo modificado é analisado e os dados são coletados. Na fase de aprendizado, os dados da fase de Teste são analisados e usados para informar o próximo estágio de Design, no qual partes-padrão de DNA são construídas para atender aos padrões da comunidade de

processo de P&D, aumentando a eficiência das tecnologias geradas e diminuindo seu custo. Isto tem abertonovas possibilidades de penetração comercial para processos industriais baseados em biotecnologias. A biotecnologia, assente na geração e na combinação sinérgica de diferentes campos do conhecimento que compõe o que convencionou-se chamar de biologia sintética – e, mais especificamente, da biologia digital - passa a penetrar novos nichos, onde até então sua utilização não era competitiva, por fatores técnicos e econômicos que criavam um diferencial concorrencial negativo em comparação às tecnologias ‘tradicionais’. Aliás, como os estudos de caso revelaram, os avanços recentes da biologia sintética têm feito com que alguns produtos biotecnológicos se tornem, em termos de custos de produção, mais competitivos do que os da química convencional.

Estes avanços recentes na base de conhecimentos do setor têm aumentado o potencial de utilização da biotecnologia, já que novos microrganismos desenhados (ou engenheirados) sob demanda, através de processos avançados que utilizam a automação e a robótica, são agora capazes de criar moléculas que antes só poderiam ser produzidas através de processos petroquímicos ou químicos. O avanço da ciência, portanto, têm permitido às firmas que apostam na biotecnologia penetrarem novos mercados.

As firmas que foram selecionadas para os estudos de caso são de dois tipos. As primeiras são firmas de manufatura. São firmas com competências no design e na operação de plantas industriais que utilizam processos biotecnológicos. O foco destas firmas, quando surgiram, estava no desenvolvimento da produção em larga escala de biocombustíveis e commodities, mas que, devido às condições “hostis” do ambiente, ou a dificuldades técnicas enfrentadas em seus processos produtivos, tiveram que se reinventar, construindo e incorporando novas competências e estratégias. Fazem parte deste grupo Amyris, CoolPlanete Terravia.

Estas firmas migraram da produção de moléculas de baixa margem, como o farneseno da Amyris, para moléculas que atendem nichos de mercado nos quais as margens são mais elevadas, como ingredientes ‘nobres’ para cosméticos, ingredientes para os mercados de sabores e fragrâncias, ingredientes funcionais para alimentos ou ainda fertilizantes de origem renovável. Isto exigiu deste tipo de firma a incorporação de competências no desenvolvimento de aplicações comerciais, o que as aproximou (inclusive através de acordos de pesquisa, desenvolvimento e comercialização) dos usuários dos seus produtos. Este é o caso da Amyris

e Unilever, por exemplo. Também foi necessária a incorporação de competências em distribuição e marketing, específicas aos novos mercados.

A interação destas firmas com a indústria de cosméticos é reveladora. Esta indústria utiliza insumos adquiridos de diferentes firmas, de diferentes tamanhos e com diferentes graus de abrangência de atuação. Há, grosso modo, três grandes segmentos nos quais a indústria de insumos para cosméticos pode ser estratificada. Primeiramente, há firmas de ampla cobertura, que são as grandes firmas da indústria química, como a BASF⁴⁴. Estas firmas realizam pesados investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação, além de adquirirem firmas menores, mais especializadas, que complementam e diversificam seu campo de atuação. Para estas firmas, ao mesmo tempo em que os vínculos de natureza técnica e tecnológica estreitam as relações comerciais com firmas usuárias e fornecedoras, eles abrem espaço também para o fornecimento de produtos mais básicos ou menos diferenciados. Além das firmas que atuam em espectro amplo, existem aquelas que focam sua atuação na produção e fornecimento às firmas de cosméticos dos insumos químicos de volume elevado que compõem as formulações – como Stepan⁴⁵. No Brasil, a principal firma desse segmento do mercado de insumos é a Oxiteno⁴⁶. Existem também na indústria de insumos químicos para cosméticos firmas que produzem e vendem produtos que são chamados de especialidades, no sentido de possuírem propriedades bem precisas, atuação funcional, constituindo a base das reivindicações técnicas e da inserção mercadológica do produto cosmético final. Este é o caso, por exemplo, da Croda⁴⁷, ou da Givaudan⁴⁸ (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2015). Não é à toa que grande parte das parcerias firmadas entre as empresas da biotecnologia industrial e as empresas fornecedoras de insumos para a indústria de cosméticos ocorre envolvendo atores deste terceiro segmento: é justamente para as especialidades químicas que empresas como Amyris ou Genomatica têm migrado.

O segundo tipo selecionado de firmada biotecnologia industrial é composto por licenciadoras de tecnologias e prestadoras de serviços tecnológicos avançados, que surfam a onda da biologia sintética e, em especial, da biologia digital. Estas firmas combinam competências da biologia, da computação, da engenharia e da matemática para a criação de

⁴⁴ BASF SE é uma empresa química alemã global e líder mundial na área química, fundada na segunda metade do século XIX.

⁴⁵ Stepan Company é uma fabricante de especialidades químicas com sede em Northfield, Illinois.

⁴⁶ Oxiteno, parte do grupo Ultra, é uma empresa química global fundada nos anos 70 com sede no Brasil.

⁴⁷ A Croda International plc é uma empresa britânica fabricante de especialidades químicas, sediada em Snaith, East Riding of Yorkshire.

⁴⁸ A Givaudan é a principal fabricante global de sabores, fragrâncias e ingredientes cosméticos. Tem sede na Suíça.

tecnologias muito mais assertivas do que as precedentes, sob encomenda. Fazem parte deste grupo Genomatica, Arzeda, Ginkgo Bioworks e Zymergen.

As firmas dos dois grupos têm interagido sinergicamente de modo a construir processos industriais biotecnológicos muito mais eficientes. Um exemplo é a parceria da Amyris com a Arzeda em um projeto financiado pela Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA) dos EUA. As competências tecnológicas desenvolvidas pela Arzeda para engenharia de proteínas e descoberta de novas rotas metabólicas foi validado para a produção de duas moléculas que agora serão otimizadas pela Amyris. Estas duas moléculas são industrialmente importantes como corantes, ingredientes alimentares e intermediários farmacêuticos, mas a sua fabricação atual, baseada em um processo petroquímico, envolve o uso de substâncias altamente tóxicas e cancerígenas, como cianeto e benzeno. Outro exemplo é a aliança entre Genomatica e Ginkgo Bioworks voltado ao desenvolvimento de biotecnologias para produção de intermediários químicos e especialidades químicas.

Firmas de ambos os conjuntos, atuando de forma sinérgica na geração de novas oportunidades inovativas, têm desenvolvido e incorporado novas competências que têm se mostrado fundamentais para a *pivotagem* identificada. A manufatura e comercialização de especialidades exige o desenvolvimento de novas competências em aplicações para as moléculas desenvolvidas (pela firma que as desenvolve ou por terceiros), algo que não estava ou que estava presente com uma intensidade muito inferior no mercado de biocombustíveis e commodities. Como as especialidades químicas e os demais produtos deste novo ‘modelo’ são produtos de mercados pequenos, muitas vezes de nicho e com alto grau de customização, ter uma relação colaborativa com usuários é fundamental. Não à toa, as EBTs da biotecnologia industrial têm estabelecido acordos importantes com firmas fornecedoras de insumos para cosméticos, com produtoras de cosméticos e produtos de higiene pessoal e com firmas da indústria alimentícia. Temos, como exemplo, acordos de pesquisa entre Amyris e Givaudan ou Amyris e Firmenich. A Terravia, por outro lado, foi adquirida pela Corbion, um líder global na produção de especialidades químicas.

O segundo conjunto de firmas, as prestadoras de serviços tecnologicamente avançados em biotecnologia industrial, têm agregado competências científicas avançadas que têm se mostrado fundamentais. O surgimento destas novas firmas agora não é fruto do acaso, mas está relacionado a avanços consistentes obtidos nos últimos anos no conhecimento científico subjacente ao desenvolvimento da produção de renováveis avançados.

Ao explorarem oportunidades tecnológicas no campo da biologia digital, uma vertente da biologia sintética, estes prestadores de serviços agregam competências avançadas no design de novas tecnologias, combinadas a ferramentas da automação, a competências analíticas e de desenvolvimento de software que trabalham de forma sincronizada, diminuindo o custo de realização de P&D e do *time to market* das inovações.

As firmas não são entes estanques; elas possuem a capacidade de aprender e evoluir face aos desafios e às oportunidades que encontram no ambiente que as rodeiam. Esta capacidade frequentemente se traduz na construção e incorporação de novas competências, alicerces da diversificação tecnológica e da penetração de novos mercados. Firms que “surfam” ondas de revolução tecnológica, como a que representa a biotecnologia industrial, estão a todo momento lidando com mecanismos complexos de seleção, que premiam as mais bem adaptadas e excluem aquelas que não se adaptam. Os estudos de caso realizados nesta tese mostram que, no caso da biotecnologia industrial, as do primeiro grupo invariavelmente são próceres do desenvolvimento de novas competências dinâmicas.

3.3.2 Análise das entrevistas

Seguindo o recomendado por Duarte (2004), a análise dos resultados obtidos nas entrevistas foi realizada a partir da fragmentação do todo e da subsequente reorganização dos fragmentos resultantes a partir dos pressupostos da tese. Esta metodologia consiste em segmentar a fala dos entrevistados em *unidades de significação* – o mínimo de texto necessário à compreensão do significado – que, por sua vez, municiam um procedimento posterior de minuciosa interpretação, articulando as unidades entre si, tendo por objetivo a formulação de hipóteses explicativas do problema ou do universo estudado. As unidades de significação criadas nesta tese foram as seguintes:

- a. Trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial
- b. Desafios colocados ao desenvolvimento da biotecnologia industrial
- c. Competências relacionadas à superação de desafios e à *pivotagem* de EBTs (do modelo de produção de biocombustíveis e commodities para o modelo de produção de especialidades e produtos especiais)

A análise final das entrevistas consistiu em dar sentido ao conteúdo do mosaico de categorias ou indexadores no interior dos quais estão agrupadas as unidades de significação, tendo como referência os objetivos da pesquisa e o contexto em que os depoimentos foram colhidos. Abaixo, são apresentados os resultados obtidos.

a. Trajetórias tecnológicas da biotecnologia industrial

A maioria dos respondentes concordou que há, em certa medida, uma migração de esforços do desenvolvimento da produção de produtos com uso intensivo de matérias-primas, que visam substituir recursos fósseis em grande quantidade, para produtos de alto valor e baixo volume. A biotecnologia industrial pode ser aplicada a segmentos que vão desde especialidades químicas até plásticos de base biológica, biocombustíveis e bioenergia. No entanto, cada uma destas cadeias de valor diferem significativamente entre si em relação a aspectos como a relação entre volume e preço, vantagens potenciais sobre alternativas ‘tradicionais’, características do produto e maturidade tecnológica, por exemplo.

Como apontaram os entrevistados, a transição para especialidades químicas permite relativamente a operação em plantas menores com menor investimento de capital (CAPEX). A necessidade de atração e alocação de capital de risco, então, também é menor. Isto significa que a apropriação dos resultados inovativos é relativamente menos dependente do acúmulo de ativos complementares “físicos”, como plantas industriais. Por terem atributos únicos de desempenho e qualidade, a viabilidade comercial deste tipo de produto está menos atrelada ao seu preço relativo. Suas margens são muito mais atrativas do que a dos biocombustíveis e, em decorrência, a viabilidade destes produtos está relativamente mais protegida das intempéries dos mercados de petróleo e gás natural.

No entanto, mais de um respondente apontou que o diagnóstico que fez da existência desta *pivotagem* se aplica somente a empresas de base tecnológica com foco exclusivo na biotecnologia industrial, como Amyris e Terravia (Solazyme), e não necessariamente a grandes grupos como os *outsiders* ou seja, firmas ou conglomerados empresariais com trajetórias construídas em outros setores, como a química ou automobilística, por exemplo, que adentraram a biotecnologia industrial em busca de novas oportunidades de negócios. Um dos respondentes comentou:

“Essa opção (pivotagem) não está disponível para grandes grupos como DuPont (hoje DowDuPont) ou Granbio, por exemplo. Essas firmas realizaram pesados investimentos em grandes plantas industriais, as quais possuem sunk costs importantes. Não há sunk cost para a Solazyme, ou este é relativamente pequeno. Logo, empresas de base tecnológica estão menos ancoradas a determinadas decisões de investimento, e podem migrar mais facilmente”

E, acrescenta:

“Mesmo entre os grupos que realizaram grandes investimentos, o impacto do atraso no desenvolvimento dos projetos é muito diferente. Para uma firma como DowDuPont, é só um dos muitos projetos de inovação que faliu. Já para uma firma como a GranBio, o peso do investimento é muito mais significativo. O peso do negócio (de renováveis avançados) é diferente para diferentes firmas.”

Já outro respondente pontuou:

“Para que uma firma seja minimamente relevante na produção de (bio)combustíveis ela precisa ter uma capacidade de produção imensa. A necessidade de capital é, portanto, também imensa. Isto coloca dificuldades adicionais a uma pequena firma baseada em uma tecnologia de ruptura, com uma modesta estrutura de capital, em comparação às gigantes da química, por exemplo, para atuar em biocombustíveis.”

Muitas das EBTs pioneiras na biotecnologia industrial que empreenderam a *pivotagem* o fizeram com base no desenvolvimento de plataformas tecnológicas flexíveis, que servem teoricamente à produção de um vasto número de moléculas. É importante frisar, no entanto, que adaptar estas plataformas a diferentes usos (diferentes aplicações) não é algo trivial. Estas firmas estão focando seus esforços tecnológicos no desenvolvimento de novas, adentrando novos mercados, muitas vezes através do estabelecimento de acordos estratégicos com usuários dos seus produtos, ou com distribuidores para usuários.

A transição do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e outras commodities para especialidades químicas e produtos especiais, conforme captado pelas entrevistas, se traduz em dois movimentos: o primeiro é o de desenvolver novas aplicações

(que não biocombustíveis) para moléculas que já são produzidas, como o caso do farneseno da Amyris e seus derivados esqualano (molécula com 30 carbonos - C30) e hemi-esqualano (C15)⁴⁹. Este primeiro movimento envolve competências no desenvolvimento de aplicações comerciais e de distribuição & marketing e, portanto, uma relação próxima e profícua com usuários, como a indústria de cosméticos ou de alimentos, ou com fornecedores destas indústrias, como o setor de insumos para cosméticos. A outra diz respeito ao desenvolvimento de novas plataformas tecnológicas, a partir do uso de conhecimentos da biologia digital, por exemplo, para a produção de novas moléculas ou para a criação de meios mais eficientes para a produção de moléculas já existentes. Aqui competências científicas avançadas são necessárias, como as relacionadas à biologia sintética, as quais frequentemente são acessadas ou desenvolvidas em parceria com firmas prestadoras de serviços tecnologicamente avançados em biologia sintética, como Ginkgo Bioworks, Zymergen e Arzeda.

As entrevistas nos forneceram outros aspectos sobre esta dinâmica: os dois movimentos acima retratados (busca de novas aplicações e desenvolvimento de novas moléculas) são complementares e muitas firmas avançam simultaneamente nas duas direções, uma vez frequentemente se faz necessário encontrar rapidamente novas fontes de rendimentos, uma vez que o mercado de capitais de risco escasseou após 2008. Como produtos não commodities como especialidades químicas e produtos especiais têm usos muito específicos, muitas vezes de nicho, e, portanto, mercados limitados, não é possível sobreviver com base em uma estratégia “monoproduto”. Diversificar os segmentos de atuação e os segmentos atendidos, portanto, muitas vezes é fundamental para a sobrevivência.

b. Desafios colocados ao desenvolvimento da biotecnologia industrial

Todos os respondentes concordaram com o diagnóstico de que a produção de biocombustíveis avançados, em especial de etanol celulósico, tem se desenvolvido a um ritmo muito mais lento do que o que era inicialmente anunciado pelos pioneiros e pelos *experts* no setor, a prejuízo de investidores e firmas, para não dizer de instituições públicas. Os principais gargalos (ou desafios) relacionados ao desenvolvimento da biotecnologia industrial conforme identificado pelos entrevistados são os seguintes:

⁴⁹ Em 2018, a Amyris anunciou investimento de US\$110 milhões para construção de duas plantas para produção de esqualano no Brasil. Fonte: InvesteSP. Disponível em <https://www.investe.sp.gov.br/noticia/amyris-vai-investir-us-110-milhoes/>. Acesso em 16/12/2019.

- a. Concorrência direta com petroquímicos por preço (e, portanto, dependência de que o preço dos insumos fósseis esteja relativamente elevado).
- b. Problemas técnicos não previstos nas tecnologias de processo, como na etapa de pré-tratamento da biomassa.
- c. Desafios de consolidação de uma cadeia de fornecimento de biomassa, em termos da homogeneidade, da qualidade e da regularidade no fornecimento.

O primeiro diz respeito ao comportamento do preço do petróleo, de outros insumos fósseis e de seus derivados, especialmente após 2014. Houve uma queda brusca e inesperada no preço destes produtos, o que inviabilizou muitos dos projetos pioneiros da biotecnologia industrial.

Interessante notar que este comportamento dos insumos fósseis foi algo que não foi antecipado nem pelas firmas, nem pelos analistas do setor, tampouco por órgãos governamentais que realizam ‘estudos de futuro’ para pautar políticas públicas. Como disse um respondente:

“Ninguém sabia que aconteceria o que aconteceu com o preço do petróleo. O shale oil apareceu e ninguém viu. O cenário justificava os investimentos que foram realizados(pelos pioneiros da biotecnologia industrial)”

O segundo desafio diz respeito aos desafios técnicos enfrentados pelas plantas produtivas pioneiras da biotecnologia industrial. Segundo um dos respondentes, os desafios referem-se a lidar com uma matéria-prima (biomassa) que...

“...após o processamento não é nem líquida, nem sólida. O fluxo resultante do seu processamento, portanto, não é homogêneo. O “cozido” da celulose, que é uma mistura de água, vapor e celulose, gera problemas em termos da engenharia de projeto, o que impacta a operação, aumentando seus custos.”

Os problemas de engenharia básica de projeto, segundo mais de um respondente, foram subestimados. Pensou-se que o conhecimento acumulado na produção de biocombustíveis de primeira geração e no processamento de commodities agrícolas e florestais seria suficiente para vencer os desafios desta etapa. Os tomadores de decisão das diversas firmas julgavam que seus esforços deveriam se centrar quase que exclusivamente na resolução dos problemas próprios da biotecnologia, ou seja, do melhoramento genético dos microrganismos utilizados, uma vez que os problemas de engenharia seriam resolvidos utilizando a base de conhecimentos já existente. Achava-se que, uma vez resolvidos os problemas da biotecnologia, os problemas de engenharia industrial seriam resolvidos quase que automaticamente, pois imagina-se que seriam semelhantes aos das demais indústrias que utilizam biomassa (papel & celulose, por exemplo), ou processos de fermentação (produção de combustível de primeira geração ou indústria de alimentos). Isto não ocorreu. Como registrou um dos entrevistados:

“Há dificuldades inerentes ao uso da matéria-prima, problemas que não foram antecipados. Em escala de laboratório, muitas firmas fizeram testes com açúcar. Na hora que passaram a utilizar bagaço ou palha em escala industrial, surgiram dificuldades de grande complexidade. Toda inovação possui obstáculos não antecipados, mas nesse caso ninguém nunca tinha feito, ninguém nunca tinha moído palha de cana. Não houve conhecimento que pode ser incorporado, tomado emprestado de outros setores, para superar estes desafios muito específicos”.

Há também a questão referente às expectativas sobre as taxas e a velocidade de desenvolvimento das biotecnologias. Sobre este aspecto, é interessante registrar a percepção de um dos respondentes:

“Se os pioneiros não tivessem sido exageradamente otimistas, os resultados obtidos não seriam considerados tão ruins. Nenhuma nova tecnologia radical progride tão rápido quanto se pensou que a biotecnologia industrial pudesse progredir”.

Ainda sobre este ponto, outro respondente afirmou:

“Todo mundo subestimou os processos na entrada das plantas; todo mundo ficou focado na resolução dos problemas da biotecnologia, como a fermentação de C5 e C6, simultânea ou não, por exemplo; e subestimou os desafios que pareciam mais básicos. Quase todos os players tiveram problemas com impureza mineral na biomassa, como a presença de componente corrosivos, como a sílica, o que causou fortes impactos nas unidades industriais. Firmas diferentes, em culturas diferentes, cometeram os mesmos erros estratégicos”.

No entanto, mesmos os desafios próprios do desenvolvimento das biotecnologias não foram totalmente equacionados. Como cita um dos respondentes:

“Hoje, os processos mais utilizados na produção industrial de biocombustíveis avançados são os de hidrólise enzimática; havia a expectativa de que a dosagem de enzimas necessária nestes processos fosse menor do que o que realmente aconteceu. Isso aumentou muito o custo de operação. Mesmo com preço do petróleo mantido aos níveis de meados da década de 2000, muitos destes processos hoje não seriam viáveis devido ao custo maior das enzimas do que o esperado. As bactérias e os demais microrganismos geneticamente modificados não evoluíram tanto quanto os líderes pioneiros da indústria indicaram que evoluiriam. Hoje, são necessárias quantidades muito superiores de enzimas do que se previa. A evolução biológica não foi suficientemente rápida para manter a taxa de utilização de enzimas que estava prevista na partida, gerando custos adicionais importantes”.

O terceiro problema diz respeito ao desenvolvimento de uma cadeia de fornecimento de biomassa. Este é outro problema que foi subestimado. A biomassa que tem chegado às plantas tem parâmetros de qualidade (pureza, por exemplo) inferiores aos que eram esperados, exigindo a adição de etapas adicionais aos processos produtivos (para limpeza, por exemplo). A quantidade também muitas vezes não é suficiente para sustentar os níveis de produção pretendidos. Para que os custos logísticos de obtenção da biomassa não sejam impeditivos, é necessário que se tenha uma quantidade relativamente alta de biomassa em uma área

relativamente pequena, próxima às plantas industriais. Esta densidade necessária para viabilizar muitos projetos ainda não foi atingida.

É preciso lembrar que o uso da biomassa como matéria-prima para biocombustíveis não é o uso mais racional sob o ponto de vista da sua composição. Como disse um respondente:

Era esperado que a biomassa se comportasse como o petróleo e gás, mas ela se comporta de forma muito diferente. A celulose perde muito massa durante seu processo de conversão, o que faz com que o rendimento do processo seja relativamente baixo. O produto resultante precisa ter uma margem de lucro alta para compensar os custos maiores envolvidos na produção, em relação às rotas concorrentes, como as fósseis. Na produção de especialidades como o ácido succínico, por exemplo, o uso da biomassa é mais eficiente (em relação à produção de biocombustíveis).

Ademais, é interessante notar que há *trade-offs* entre os desafios identificados. Como registrado em uma das entrevistas:

Para economizar na quantidade de enzima utilizada, por exemplo, é preciso aumentar a utilização de biomassa. Por outro lado, ter uma biomassa menos homogênea do que o esperado (com a presença de terra e fuligem, por exemplo), implica ter uma engenharia de projeto mais sofisticada, o que encarece o custo de capital dos projetos.

Evidentemente, o comportamento do preço do petróleo de 2012 a 2017 foi um fator que impactou fortemente a operação de projetos que haviam sido montados esperando um cenário no qual o preço do barril fosse de, no mínimo, US\$100. No entanto, no caso da Amyris e Solazyme (e também de outras EBTs da biotecnologia), talvez um parâmetro mais importante do que o preço do petróleo seja o preço do açúcar. Um dos entrevistados pontuou que:

O açúcar é a matéria-prima que estas firmas utilizam. Quando o preço do açúcar está elevado, estas firmas precisam focar no desenvolvimento de aplicações de valor final muito

*elevado. Isto (o aumento do preço do açúcar) em grande parte explica a transição que fizeram de biocombustíveis para especialidades*⁵⁰.

Por fim, é interessante refletir sobre como estes desafios colocados às EBTs atingem de diferentes maneiras atores com diferentes características. Para os *outsiders*, como as grandes firmas da petroquímica, a biotecnologia industrial muitas vezes é apenas um investimento tecnológico que compõe um portfólio muito abrangente, com muitos outros investimentos semelhantes em outras áreas *de fronteira*. Estas firmas estão acostumadas a ter sucesso em alguns destes investimentos, e a fracassar em outros, em um sistema de compensação (“perde e ganha”). Faz parte do negócio. Deste modo, muitas estão simplesmente abandonando ou adormecendo seus projetos em biotecnologia industrial, como é o caso da DowDuPont com suas plantas para etanol celulósico.

Para outros grandes *bioindustrial pure-players*, que fizeram pesados investimento de capital para a produção industrial de biocombustíveis, em especial etanol celulósico, o caminho à frente é mais sombrio. Muitas vezes as moléculas produzidas por estas firmas são pouco flexíveis, no sentido de que não podem se adaptar a usos industriais diversificados que não o uso como combustíveis de transporte. Suas plantas também são de difícil adaptação para a produção de moléculas que não biocombustíveis, e muitas vezes as competências e os ativos complementares necessários não estão presentes para a transição. Isto implica na presença de *sunk costs* importantes nestes projetos.

Os desafios acima retratados, que impactam projetos por vezes de forma destrutiva, fazem parte do que a literatura chama de “ônus do pioneiro”, ou seja, problemas que enfrentam os desbravadores na exploração de um campo tecnológico revolucionário, como é a biotecnologia industrial.

Esta nova dinâmica pode inclusive ter desdobramentos sobre a localização das plantas e dos centros de P&D destas firmas. A grande (e, talvez, principal) atratividade do Brasil está em ter matéria-prima relativamente mais barata, por conta da indústria de cana instalada (primeira geração). Não é à toa que a primeira planta da Amyris no país tenha sido instalada dentro de uma usina de cana-de-açúcar. Como a principal vantagem do Brasil está na ampla disponibilidade de matéria-prima, que supostamente estaria prontamente disponível, o país

⁵⁰ Os preços internacionais do açúcar tiveram uma alta de mais de

atraiu investimentos no desenvolvimento da produção em larga escala de biocombustíveis, muitas vezes em sinergia com a produção de etanol ou diesel de primeira geração. Para quem mira especialidades, produtos de alto valor agregado e de volumes diminutos, ter açúcar a preços mais elevados é um obstáculo menos relevante. Estas firmas poderiam, assim, estar localizadas na Califórnia, por exemplo, ou em outras localidades nas quais as externalidades positivas ligadas ao desenvolvimento de especialidades estejam presentes.

c. Competências relacionadas à pivotagem de biocombustíveis e commodities para especialidades e produtos especiais

Neste trabalho, o foco analítico esteve centrado nas competências organizacionais que são desenvolvidas e mobilizadas quando as firmas precisam adaptar as suas estratégias tecnológicas e seus modelos de negócio a comportamentos não esperados de variáveis relevantes para a tomada de decisão estratégica em atividades inovativas. Ambientes desta natureza são marcados por forte incerteza. Neste tipo de ambiente, frequentemente o conjunto de competências e as estratégias das firmas precisam ser adaptados a “condições mutantes”. Neste sentido, é importante para firmas que lidam com um ambiente tecnológico dinâmico, como é o da biotecnologia industrial, a construção e manutenção de um conjunto de capacidades dinâmicas de nível superior (*higher level*), justamente por que são estas as competências que possibilitarão a adequação de sua estratégia ao longo do tempo.

As entrevistas realizadas revelaram que a alteração estratégica de biocombustíveis e commodities para especialidades e produtos especiais é um trabalho intensivo em conhecimento e intensivo na construção de novas competências organizacionais, mas não necessariamente intensivo em conhecimento científico *strictu senso*, embora novas competências em ciência e tecnologia, especialmente as relacionadas à biologia sintética, sejam parte indissociável das mudanças profundas pelas quais passa atualmente a biotecnologia industrial. Ora, avanços recentes na biologia sintética, incluindo a rápida ‘montagem’ do DNA, a edição do genoma, a reformulação abrangente de rotas metabólicas, a triagem de alto rendimento e as ferramentas de design de rotas metabólicas, têm permitido uma maior automação dos processos de produção de químicos a partir de biotecnologias, o que tem agregado eficiência e rapidez aos processos produtivos da indústria. Essas

ferramentas e competências estão sendo desenvolvidas em um contexto de uma indústria que tem evoluído muito rapidamente, e tendem a afetar a direção e a velocidade desta mudança.

No entanto, frequentemente a transição está também ancorada na construção de competências que permitam desenvolver novas aplicações comerciais para as plataformas tecnológicas já existentes, por exemplo, ou na construção ou acesso a novos ativos complementares em distribuição e marketing.

A estratégia adotada pelas firmas da biotecnologia industrial que têm exercido com sucesso a pivotagem identificada contém competências relacionadas aos três conjuntos de capacidades dinâmicas identificados na revisão bibliográfica da tese, ou seja, Detectar, Aprender e Transformar. As firmas necessitam constantemente monitorar os parâmetros competitivos do ambiente, através do amplo conhecimento sobre tecnologias que têm sido desenvolvidas ou que tenham seu desenvolvimento apoiado por organismos públicos ou ainda por investidores privados. Estas firmas necessitam também ter uma pronta capacidade de resposta a estas oportunidades e desafios que são identificados como resultado do processo de monitoramento.

A comercialização de especialidades apresenta desafios muito diferentes da dos biocombustíveis e commodities. Frequentemente, os mercados de especialidades são de *nicho*, ou seja, são limitados a segmentos bastante específicos, e exigem grande especialização e customização às necessidades de cada cliente, o que também não estava no radar das firmas quando o alvo eram biocombustíveis e commodities químicas, para os quais existem mercados de alto volume bem definidos.

Os parâmetros competitivos do mercado de especialidades químicas são muito diferentes daqueles do mercado de biocombustíveis. Como os volumes produzidos e comercializados são muito menores em comparação ao dos biocombustíveis, e como há grande margem para customização de produtos, as firmas precisam dedicar constantemente esforços para a ‘construção’ de novas demandas para seus produtos. Isso exige a alocação mais intensa de recursos a atividades de desenvolvimento de novas moléculas, já que o mercado para cada molécula é restrito, como também para o desenvolvimento de novas aplicações comerciais para cada molécula produzida.

Isso por sua vez exige destas firmas a incorporação de competências capazes de manter alinhados os elementos que compõe a organização, tanto entre si mesmos como em relação à estratégia organizacional. Estas firmas necessitam constantemente avaliar a necessidade de

renovação da sua base de conhecimentos e competências, atribuindo responsabilidades, alocando recursos e garantindo que a força de trabalho possua o conhecimento necessário para enfrentar os desafios que o grande dinamismo do ambiente impõe. Afinal de contas, embora sujeito a limitações, existe um mercado para biocombustíveis – no Brasil, muito bem estabelecido. As especialidades, ao contrário dos combustíveis, não são commodities. O uso que se dá a cada uma delas é muito específico às especificidades de diferentes nichos e às necessidades de cada cliente. Neste sentido, ter uma relação próxima e sinérgica com usuários, ou com os fornecedores destes, é fundamental. Adicionalmente, o modelo de negócios em especialidades é totalmente diferente do modelo de biocombustíveis. Os apelos mercadológicos (*key drivers*) e as características da demanda são muito diferentes. As formas de se avaliar e de se medir a viabilidade de determinada operação, também.

São necessários muitas vezes, portanto, competências e conhecimentos muito diferentes dos que estas firmas desenvolveram em seus anos mais incipientes de atuação. Conforme citou um dos nossos entrevistados referindo-se a exemplos conhecidos da biotecnologia industrial no Brasil:

“Estas firmas possuíam competências em biologia sintética desde sua fundação, mas não possuíam, enquanto seu foco principal estava no mercado de biocombustíveis, competências necessárias para o desenvolvimento de novas aplicações para suas moléculas destinadas ao mercado de cosméticos, ou à indústria de alimentos.”

Neste sentido, como pontua um dos respondentes, as incertezas no etanol celulósico, por exemplo, são menores do que nas especialidades.

“O mercado para etanol está mais muito mais consolidado (do que o de bioespecialidades). A produção de biocombustíveis avançados também já alcançou a escala industrial, já foram inauguradas mais de uma dezena de plantas no mundo – embora muitas destas ainda apresentem sérios problemas de operação. A equação de custo e valor destes produtos, portanto, já está estabelecida em muitos lugares, o que diminui a incerteza relacionada ao tamanho do mercado. No caso das especialidades químicas e outros bioprodutos, isto ainda não existe. São mercados cujos parâmetros competitivos ainda estão em construção.”

Esta seção apresenta a seguir as principais competências relacionadas à pivotagem que identificamos. Para fins analíticos, separamos estas competências em dois grandes blocos: competências relacionadas à ciência e à tecnologia; e competências de outra natureza, como aquelas aplicáveis à construção de novos modelos de negócios. Com isso, não queremos estabelecer uma hierarquia (em termos de importância para o sucesso da estratégia de *pivotagem*) entre competências de naturezas distintas. Frequentemente, empresas de base tecnológica da biotecnologia industrial têm que mobilizar e combinar competências muito diferentes para sobreviver, de modo que a separação que é feita a seguir em dois blocos teve pretensão analítica, somente.

c1. Competências relacionadas à ciência & tecnologia

A habilidade do homem de modificar e de construir organismos vivos geneticamente modificados tem avançado muito rapidamente nos últimos anos, e isso tem dado grande impulso à biotecnologia industrial. Muitos têm sido os avanços da ciência que têm permitido às firmas a construção de novas competências destinadas à criação de biotecnologias mais assertivas e eficientes, que permitam uma maior flexibilidade e abrangência em termos de moléculas-alvo que podem ser produzidas.

A aplicação de princípios da engenharia, da computação e da automação à biologia tem possibilitado o aumento da complexidade de sistemas vivos que os cientistas são capazes de construir (ou *engenheirar*), como microrganismos geneticamente modificados de interesse industrial. Novas abordagens baseadas em princípios da engenharia, mais racionais e preditivas, tem aumentado o entendimento de cientistas sobre o controle de sistemas vivos, sobre como construí-los, e sobre como usá-los como base para criação de novas tecnologias de interesse industrial.

Um dos principais princípios emprestados da engenharia que tem guiado novas abordagens no desenvolvimento de novas biotecnologias é a busca pela *padronização* de insumos e de processos, o que, na biotecnologia, se traduz como a construção de processos-padrão para combinação de pedaços de DNA utilizando métodos consistentes, simples e de fácil compreensão – assim como na engenharia clássica. A criação de partes biológicas padrão de alta qualidade (*building blocks* biológicos, a partir dos quais podem ser construídos novos sistemas vivos), de alta disponibilidade, tem diminuído o custo e o tempo de desenvolvimento

de projetos de biologia sintética. Estas partes podem ser combinadas de infinitas maneiras para criação de organismos sintéticos.

O design e a construção *bottom up* de DNA, guiados por fins industriais, é a próxima fronteira do desenvolvimento da biotecnologia. Este é um campo de desenvolvimento incipiente, mas que avança rapidamente no suporte da prototipagem rápida e barata de sistemas biológicos. São necessárias ainda novas abordagens que reduzam o tempo de produção e que simplifiquem os processos de manufatura para materiais biológicos. Por exemplo, a síntese de material biológico sob encomenda, incluindo construções de grande complexidade, como cromossomos sintéticos e partículas virais, podem acelerar o processo de desenvolvimento de novas tecnologias. Como afirmou um dos entrevistados:

“É preciso diminuir o custo e aumentar a eficiência do processo de engenheirar a biologia. Trata-se de olhar a biologia com os olhos do engenheiro. É preciso avançar no sentido de criar abordagens mais racionais do ponto de vista do desenvolvimento de novas biotecnologias, que sejam mais preditivas e mais eficazes no controle de como atuam os seres vivos que são criados”

A biologia sintética reúne uma série de novas competências que têm ajudado a dar novos contornos à biotecnologia industrial. O mapeamento digital detalhado de sistemas vivos e das suas partes biomoleculares, por exemplo, bem como da interação entre essas partes, é a base de partida para a criação de novas biotecnologias por abordagens mais assertivas; a criação de bases de dados publicamente disponíveis sobre partes biológicas também é algo de suma importância. Algo neste sentido é o projeto Registry of Standardized Biological Parts⁵¹,

⁵¹ “The Registry of Standard Biological Parts is a collection of genetic parts that are used in the assembly of systems and devices in synthetic biology. The registry was founded in 2003 at the Massachusetts Institute of Technology. The registry, as of 2018, contains over 20,000 parts. Recipients of the genetic parts include academic labs, established scientists, and student teams participating in the iGEM Foundation's annual synthetic biology competition. The Registry of Standard Biological Parts conforms to the BioBrick standard, a standard for interchangeable genetic parts. BioBrick was developed by a nonprofit composed of researchers from MIT, Harvard, and UCSF. The registry offers genetic parts with the expectation that recipients will contribute data and new parts to improve the resource. The registry records and indexes biological parts and offers services including the synthesis and assembly of biological parts, systems, and devices. The registry offers many types of biological parts, including DNA, plasmids, plasmid backbones, primers, promoters, protein coding sequences, protein domains, ribosomal binding sites, terminators, translational units, riboregulators, and composite parts.[2] It also includes devices such as protein generators, reporters, inverters, receptors, senders, and measurement devices. A key idea that motivated the development of the Registry was to develop

do MIT, que consiste na construção de um banco de dados de ‘trechos’ de DNA bem caracterizados que codificam diferentes funções biológicas (como a produção de uma ou mais moléculas de interesse, por exemplo).

A automação de processos também é parte essencial das novas competências que têm revolucionado a biologia sintética. O desenvolvimento de algoritmos de simulação de interação entre partes biológicas, por exemplo têm acelerado muito a produção de novas biotecnologias. Novas ferramentas computacionais, por exemplo, permitem o design da sequência de uma proteína específica e entendimento do modo no qual esta proteína irá se desdobrar em uma estrutura 3D na qual cada átomo é definido em termos da sua posição.

A combinação destas novas competências tem permitido a produção industrialmente conveniente de células, vírus e moléculas biológicas diretamente de genes digitalizados que codificam sequências de DNA. Isto é uma abordagem muito mais assertiva e eficiente do que as dos métodos “primitivos” da biologia industrial, como afirmaram alguns entrevistados.

c2. Competências de outra natureza

Além das competências propriamente relacionadas à seara da ciência e da tecnologia, as entrevistas revelaram que a *pivotagem* do modelo biocombustíveis e commodities para especialidades químicas e produtos especiais exige das firmas a incorporação de uma série de competências de outra(s) natureza(s).

Uma das principais é o desenvolvimento de novas aplicações para moléculas que estas firmas já fabricavam e para as novas moléculas. Como já mencionado, o mercado de especialidades químicas e produtos especiais têm drivers muito diferentes daquele de biocombustíveis e commodities químicas. Os produtos do novo modelo permitem um alto grau de customização, a depender da necessidade de cada cliente. Por isso, ter relações próximas e de confiança com usuários, como firmas do setor de cosméticos, ou com fornecedores de usuários, como o segmento de insumos para cosméticos, é fundamental.

Um outro movimento detectado nos estudos de caso e confirmado pelas entrevistas é o acesso a competências de marketing no mercado de especialidades.

As especialidades são a base das reivindicações técnicas e da inserção mercadológica do produto final. Em cosméticos, a sua atuação ocorre principalmente em produtos com volumes de produção e de mercado relativamente reduzidos, um fato que impõe efeitos relevantes à sua lógica de atuação. Por um lado, raramente a escala de um só país pode justificar a produção local. Consequentemente, os investimentos são pensados em uma lógica que vai além dos limites de um país, podendo ser uma região (Europa, por exemplo), ou mesmo o mercado global. Por esta razão, ter ativos complementares em distribuição & marketing é fundamental para comercialização de especialidades.

As firmas da biotecnologia industrial têm conseguido acesso a estes ativos principalmente através de parcerias com firmas como Firmenich e Givaudan, que são fornecedores mundiais de insumos especiais para a indústria de cosméticos e alimentos. Estas firmas atendem firmas multinacionais do setor de cosméticos, perfumaria, higiene & cuidados pessoais, bem como a indústria de alimentos, entre outras. Têm relações sinérgicas bem estabelecidas com estes grandes usuários e, portanto, confiabilidade. O estabelecimento de parcerias com este tipo de firma tem permitido uma penetração mais ampla e mais profunda dos produtos da biotecnologia industrial.

Conclusões

A ciência tem acumulado evidências que demonstram que a emissão de gases causadores do efeito estufa e de outros poluentes tóxicos tornarão mais hostis, ou mesmo insustentáveis, as condições de vida em nosso planeta em um horizonte não muito distante. O uso de combustíveis para transporte e a produção de químicos de base fóssil pelo homem, como demonstra amplamente a literatura (ao menos aquela que se enquadra nas boas práticas científicas), estão intimamente relacionados a este fenômeno.

Neste sentido, apesar dos enormes benefícios que a humanidade experimentou ao longo dos últimos séculos com o desenvolvimento da indústria química, faz-se necessária uma readequação radical de suas práticas e de suas tecnologias para que as diferentes sociedades possam continuar usufruindo da melhora da qualidade de vida decorrente das atividades inovativas do setor, evitando, entretanto, os efeitos deletérios ao meio ambiente causados por sua operação.

A velocidade de avanço deste novo modelo, do qual a biotecnologia é parte indissociável, é dependente de uma série de fatores (dentre os quais o desenvolvimento de alternativas tecnológicas viáveis), mas este é um processo irreversível, se tomamos como dado que o homem pretende permanecer fora da lista das espécies ameaçadas de extinção no longo prazo. Devido à expectativa de crescimento populacional no mundo nas próximas décadas, encontrar fontes alternativas de energia e de matérias-primas para os bens de consumo correntes e duráveis é fundamental.

Contextualizada no aumento da preocupação mundial com o aquecimento global e a expectativa de esgotamento das fontes de recursos fósseis, há uma transição em curso na indústria química e petroquímica, rumo à ampliação do uso de tecnologias e produtos de menor impacto ambiental, o que tem impulsionado o desenvolvimento da chamada *biotecnologia industrial*. Assim como no passado o advento da fabricação de produtos químicos a partir do petróleo e do gás natural, em substituição ao carvão, esteve no centro de um movimento que alterou a hierarquia produtiva e inovativa na indústria química, o surgimento e ganho de importância da química de base renovável e, em especial, da biotecnologia, pode representar um impulso dinâmico de remodelação do setor.

O desenvolvimento da química de base renovável e, mais especificamente, da biotecnologia industrial, pode ser parte importante do enfrentamento ao aquecimento global

antropogênico, uma vez que está baseado no uso de recursos que diminuem significativamente (em comparação à contraparte fóssil) a emissão de poluentes e gases causadores do efeito estufa.

A motivação central desta tese foi a constatação de que a transição tecnológica que representa a biotecnologia industrial tem adquirido contornos muito diferentes daqueles inicialmente esperados, tanto por parte das firmas, como por investidores e agências públicas, que podemos descrever como *apivotamento* do desenvolvimento da produção de biocombustíveis e commodities químicas para o desenvolvimento da produção de especialidades e produtos especiais, como insumos tecnologicamente avançados para cosméticos ou nutracêuticos.

Inicialmente, era esperado que as plantas químicas baseadas em biotecnologia assumissem contornos semelhantes aos das refinarias petroquímicas, com plantas industriais de operação em escalas muito dilatadas, dedicadas à geração de produtos com margens de lucro relativamente pequenas, mas produzidos em enormes escalas industriais. Era esperado que esse processo pudesse ser acelerado com o uso de tecnologias presentes em outras indústrias tecnologicamente maduras, que também utilizam biomassa, como a de papel e celulose, o que nem sempre se mostrou factível.

Esta primeira “onda” de projetos da biotecnologia industrial, focada especialmente em biocombustíveis como o etanol celulósico, aproveitou o imperativo de muitos governos em encontrar fontes seguras e baratas de energia renovável em face à escassez e volatilidade dos mercados de insumos fósseis (a revolução do *shale gas* ainda não havia se tornado realidade nos EUA). Com início que podemos datar da metade dos anos 2000, esta primeira “onda” baseou-se na suposição de petróleo e petroquímicos permanentemente caros.

Esta hipótese embasadora mostrou-se depois errada, causando enormes prejuízos a tecnólogos, investidores e firmas, que se dedicaram ao desenvolvimento da produção industrial de biocombustíveis.

Além de enfrentar o ambiente ‘hostil’ criado pelo baixo nível de preços dos insumos fósseis, os projetos da primeira “onda” da biotecnologia industrial têm enfrentado severas dificuldades na progressão das pesquisas em escala de laboratório, piloto e de demonstração para a implantação de plantas industriais. Lacunas existentes no conhecimento tecnológico voltado para o desenvolvimento de novos microrganismos e para o desenvolvimento de tecnologias para etapas como o pré-tratamento da biomassa ou a

separação do produto final, por exemplo, impactaram negativamente a introdução e difusão de novas biotecnologias para produção de biocombustíveis avançados ou commodities químicas.

Embora avanços significativos tenham sido obtidos nos últimos anos como resultados de esforços públicos e privados de pesquisa e desenvolvimento (em termos de custo por litro produzido, por exemplo), estes não foram suficientes para viabilizar a ampla difusão comercial destes produtos. Os volumes esperados de produção de etanol celulósico (como os definidos no mandato federal estadunidense,), por exemplo, têm ficado muito aquém do que era esperado há poucos anos. Diferentes plantas industriais têm operado muito abaixo da capacidade produtiva anunciada na ocasião da divulgação dos investimentos. O ‘vale da morte’ existente entre uma grande ideia, demonstrada em escala laboratorial e validada em plantas-piloto, e a sua exploração industrial, ainda subsiste como um enorme obstáculo que muitas firmas não conseguiram transpor.

Em resposta a estas dificuldades, algumas firmas - algumas com mais sucesso do que outras - têm atuado para adaptar suas estratégias tecnológicas, seu modelo de negócios e sua base de conhecimentos e competências com o objetivo de buscar oportunidades em outros segmentos, como especialidades químicas, nutracêuticos e outros produtos especiais.

A biotecnologia industrial é formada por diferentes cadeias produtivas, que apresentam diferentes parâmetros competitivos entre si. A mudança de foco para o desenvolvimento destes produtos, ao invés de biocombustíveis e commodities, permite a operação em plantas menores com menor investimento de capital (CAPEX) em relação ao desenvolvimento de biocombustíveis. A necessidade de atração e alocação de capital de risco, então, também é menor. Por terem atributos únicos de desempenho e qualidade, a viabilidade comercial deste tipo de produto está menos atrelada ao seu preço relativo. Suas margens são muito mais atrativas do que a dos biocombustíveis e, em decorrência, a viabilidade destes produtos está relativamente mais protegida das intempéries dos mercados de petróleo e gás natural. Em algumas linhas de produtos, as rotas biotecnológicas são tão ou mais eficientes do que a contraparte petroquímica, e isto representa uma enorme oportunidade para empresas de base tecnológica.

A segunda e principal hipótese embasadora desta tese foi a de que a *pivotagem* identificada nas trajetórias tecnológicas e nas estratégias empresariais da biotecnologia industrial está assente na construção e incorporação de novas *capacidades dinâmicas*, capazes de alicerçarem a adaptação de estratégias e tecnologias aos novos parâmetros competitivos.

A capacidade de adaptação é reconhecidamente uma fonte importante de vantagens competitivas porque está relacionada a uma maior flexibilidade das estratégias tecnológica e de negócios. Quando a firma é capaz de se adaptar a condições hostis do ambiente, as quais muitas vezes surgem de maneira inesperada e se agravam rapidamente, ela é capaz de contornar situações nas quais sua sobrevivência se torna muito difícil ou mesmo inviável.

Com isto, este trabalho pretendeu dar uma contribuição ao debate sobre os fatores que se relacionam à sobrevivência de empresas de base tecnológica em um ambiente dinâmico e desafiador, no qual predomina forte incerteza – como é o da biotecnologia industrial.

Os resultados empíricos obtidos na tese foram baseados em estudos de caso de empresas de base tecnológica e entrevistas com atores da biotecnologia industrial. Ambas as etapas foram precedidas pela construção de um abrangente banco de dados de projetos da biotecnologia industrial. As firmas escolhidas para os estudos de caso compõem dois diferentes grupos: o primeiro foi composto por firmas manufatureiras que empreenderam a *pivotagem*; estas firmas estão percorrendo dois diferentes caminhos: o primeiro é o desenvolvimento de novos usos para moléculas que já eram produzidas; este movimento é intensivo em novas competências no desenvolvimento de novas aplicações comerciais e em marketing; o segundo movimento é o de criação de novas biotecnologias, mais baratas e assertivas do que as pré-existentes, e novas moléculas, o que exige novas competências em ciência & tecnologia, em especial aquelas do campo da biologia sintética. Para este segundo movimento, tem sido importante o surgimento de firmas prestadoras de serviços tecnológicos avançados, que combinam habilidades da engenharia, da computação, da automação e da biologia para criar novas tecnologias.

Já as entrevistas realizadas com atores-chave da biotecnologia industrial no Brasil foram dedicadas a aferir a validade das hipóteses adotadas, bem como angariar percepções de natureza mais sutil daquelas disponíveis em fontes secundárias, obtidas nos estudos de caso. Seu principal objetivo foi o de aprofundar a identificação e análise das competências que as firmas têm mobilizado para a *pivotagem*.

As entrevistas corroboraram a tese de que há uma transição em curso como a identificada na biotecnologia industrial rumo à produção de especialidades e produtos especiais. Mais do que isso, as entrevistas mostraram que a *pivotagem* tem sido empreendida principalmente por firmas que possuem plataformas tecnológicas flexíveis, que podem ser adaptadas (não sem custosos esforços de desenvolvimento) a diferentes usos.

Os estudos de caso e as entrevistas revelaram que frequentemente a pivotagem identificada esteve pautada em capacidades dinâmicas de Detecção, de Aprendizado e de Transformação. A pivotagem em grande parte na construção de capacidades dinâmicas de Detecção, de Aprendizado e de Transformação. Estas empresas tiveram que detectar ameaças às suas estratégias iniciais, focadas em biocombustíveis e commodities, e proativamente criar hipóteses derivadas sobre como reagir a estas ameaças. Elas tiveram que aprender com base na resposta às ameaças detectadas, e traduzir este aprendizado em adequações em suas estratégias e modelos de negócio. Ademais e, de modo mais importante, elas tiveram que transformar parcialmente sua base de competências e conhecimentos de modo a lidar com um ambiente competitivo diferente daquele encontrado em seus anos mais incipientes.

A ciência tem sido um locus importante de novos conhecimentos que pautam a pivotagem. Avanços na biologia sintética têm provocado uma queda vertiginosa dos custos associados ao sequenciamento de DNA e à síntese de DNA. O desenvolvimento de disciplinas como a proteômica e a metabolômica tem permitido uma compreensão cada vez mais acurada sobre a bioquímica das células. Técnicas de alto rendimento têm acelerado o avanço da engenharia metabólica e reduzido o tempo e custo associado com a construção de novas rotas metabólicas em organismos hospedeiros, permitindo a produção de novas moléculas, cuja produção, por biotecnologias mais ‘tradicionais’, era impossível ou inviável.

No entanto, as entrevistas mostraram que a *pivotagem* frequentemente está relacionada também à construção de competências que não tem propriamente caráter científico ou mesmo tecnológico. É preciso, por exemplo, acessar *ativos complementares* em distribuição & marketing devido às especificidades do mercado de especialidades, e aqui desenvolver parcerias com fornecedores da indústria de cosméticos ou alimentícia, por exemplo, torna-se muito importante.

A biotecnologia industrial e os que ‘surfam’ as suas ondas de *destruição criadora* lidam com um ambiente em rápida e profunda transformação. Embora promissoras, são muitos os passos ainda necessários para superar os enormes desafios que por hora impedem a ampla difusão comercial de tecnologias renováveis avançadas. As necessidades financeiras associadas à transposição de gargalos científicos e tecnológicos ainda são relativamente altas e usualmente estão associadas a grandes riscos e incertezas, o que torna o acesso ao capital necessário ainda mais difícil. São muitos os desafios a serem superados. A *pivotagem* identificada também traz por si só grandes desafios às firmas. Entre biocombustíveis e

especialidades, os apelos comerciais são muito diferentes, assim como são também as formas de se medir e avaliar os desempenhos das novas estratégias e modelos de negócio.

A superação destes desafios passa, ao menos em parte, pelo desenvolvimento e aplicação de novos conhecimentos, técnicos e científicos, que permitam a geração de tecnologias mais eficientes e confiáveis, capazes de viabilizar a produção de produtos com atributos únicos de qualidade e desempenho e/ou com vantagens de custo em relação às tecnologias “tradicionais”. No entanto, tão ou mais importantes serão os conhecimentos sobre o que funciona e o que não funciona, o que auxiliará a prever como tecnologias que ainda habitem o mundo das ideias irão funcionar quando levadas à escala comercial.

Embora tenham sido obtidos avanços importantes na criação de tecnologias industriais de base biológica para produção de combustíveis e produtos químicos ao longo das últimas décadas, a competição com as tecnologias “tradicionais” ainda não é viável para muitos produtos. Isto apenas em parte está relacionado à existência de lacunas no conhecimento científico e no conhecimento sobre como garantir a eficiência da produção a níveis industriais.

Por fim, é necessário ponderar as limitações desta tese. Em primeiro lugar, devo ressaltar que, embora o banco de dados sobre projetos da biotecnologia industrial que construí seja abrangente, ele não é representativo, em termos estatísticos, do universo de projetos da biotecnologia industrial. A amostra de empresas de base tecnológica escolhida para os estudos de caso, tampouco. Deste modo, não é possível afirmar com precisão qual o alcance da *pivotagem* identificada. Em segundo lugar, a escolha das firmas para os estudos de caso, dentre os projetos compreendidos pelo banco, possui elementos de arbitrariedade, assim como dos atores entrevistados. Por último, como o conjunto de firmas estudadas, assim como de atores entrevistados, é diminuto, não é possível inferir dados quantitativos significativos dos resultados empíricos de pesquisa. Isto também se deve à escolha pela abordagem semiestruturada para as entrevistas, que gera, em termos estruturais, respostas menos padronizadas.

Não obstante estas limitações, espera-se que este trabalho possa ser um bom ponto de partida para municiar pesquisadores, executivos e tomadores de decisão em política de ciência, tecnologia e inovação com conhecimentos relevantes sobre as trajetórias de desenvolvimento da biotecnologia industrial, no Brasil e no mundo, e sobre competências que

têm se mostrado importantes para que empresas de base tecnológica sobrevivam neste ambiente.

Por último, como legado, são apresentadas algumas questões tentativas derivadas das conclusões obtidas nesta tese que podem pautar uma nova agenda de pesquisa:

- Quais são as implicações locacionais, para plantas industriais e instalações de P&D, derivadas da *pivotagem* identificada? Quais os impactos para o Brasil?
- A *pivotagem* traduz-se em mudanças na base de conhecimentos do setor? E em mudanças na hierarquia players dedicados à produção de conhecimento (artigos científicos) e de tecnologias (ativos de propriedade industrial)? Estas mudanças podem ser analisadas quantitativamente?
- Qual o papel que programas e políticas públicas exerceram e podem exercer no direcionamento dos esforços de C,T&I e das trajetórias tecnológicas na biotecnologia industrial?
- A revolução que representa a biologia digital traz grandes oportunidades e desafios para o setor de energia renovável e para a indústria química. O Brasil estará preparado?

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. A INDÚSTRIA DE INSUMOS QUÍMICOS PARA COSMÉTICOS. SÃO PAULO: SP. 2015.

AHORSU, MEDINA & CONSTANTÍ, SIGNIFICANCE AND CHALLENGES OF BIOMASS AS A SUITABLE FEEDSTOCK FOR BIOENERGY AND BIOCHEMICAL PRODUCTION: A REVIEW. ENERGIES 2018, 11, 3366; DOI:10.3390/EN11123366.

ALEKLETT, K HOW CORRECT WERE COLIN CAMPBELL AND JEAN LAHERRÈRE WHEN THEY PUBLISHED "THE END OF CHEAP OIL" IN 1998? ALEKLETT'S ENERGY MIX: 2015. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ALEKLETT.WORDPRESS.COM/2015/02/26/HOW-CORRECT-WERE-COLIN-CAMPBEL..](https://aleklett.wordpress.com/2015/02/26/how-correct-were-colin-campbell/)ACESSO EM 15/10/2019.

ALEKLETT, K. FRACKING (TIGHT OIL) DELAYS PEAK OIL BY SOME YEARS. FONTE: ALEKLETT'S ENERGY MIX. 2017. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://ALEKLETT.WORDPRESS.COM/2017/04/16/FRACKING-TIGHT-OIL-FORSKJUTER-...](https://aleklett.wordpress.com/2017/04/16/fracking-tight-oil-forskjuter-...)ACESSO EM 15/10/2019.

ALGAE INDUSTRY MAGAZINE. SOLAZYME AND ROQUETTE DISSOLVING JOINT VENTURE. 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.ALGAEINDUSTRYMAGAZINE.COM/SOLAZYME-AND-ROQUETTE-DISSOLVING-JOINT-VENTURE/](http://www.algaeindustrymagazine.com/solazyme-and-roquette-dissolving-joint-venture/). ACESSO EM 22/08/2018.

ALISSON, E. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO PODERÁ SER ECONOMICAMENTE VIÁVEL A PARTIR DE 2025. AGÊNCIA FAPESP, 28 DE SETEMBRO DE 2017. DISPONÍVEL EM [HTTP://AGENCIA.FAPESP.BR/ETANOL_DE_SEGUNDA_GERACAO_PODERA_SER_ECONOMICAMENTE_VIAVEL_A_PARTIR_DE_2025/26272/](http://agencia.fapesp.br/etanol_de_segunda_geracao_podera_ser_economicamente_viaavel_a_partir_de_2025/26272/). ACESSO EM 28/09/2017.

AMYRIS ANNUAL REPORT. 2010. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/B9DE5433-FBDC-4989-8C05-4D5A4408EF02](http://investors.amyris.com/static-files/B9DE5433-FBDC-4989-8C05-4D5A4408EF02). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2011. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/613CC4D3-7A54-48B8-A1BF-B86AAA0DCE3A](http://investors.amyris.com/static-files/613CC4D3-7A54-48B8-A1BF-B86AAA0DCE3A). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2012. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/38A021E0-C09F-4E73-A690-837771198C2E](http://investors.amyris.com/static-files/38A021E0-C09F-4E73-A690-837771198C2E). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2013. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/624E1C6A-6F18-498D-94CC-EF2D0EC9C854](http://investors.amyris.com/static-files/624E1C6A-6F18-498D-94CC-EF2D0EC9C854). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2014. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/30503c64-9737-4bfe-be47-18a1efe57553](http://investors.amyris.com/static-files/30503c64-9737-4bfe-be47-18a1efe57553). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2015. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/498c8c37-f65f-4ead-93f8-ac4b52416e02](http://investors.amyris.com/static-files/498c8c37-f65f-4ead-93f8-ac4b52416e02). ACESSO EM 10/08/2018

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/7510d57d-5764-4efe-b9f9-2b602916f474](http://investors.amyris.com/static-files/7510d57d-5764-4efe-b9f9-2b602916f474). ACESSO EM 10/08/2018.

AMYRIS. ANNUAL REPORT. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/STATIC-FILES/81d5dc1b-b2e2-48b7-a7e5-4ad7ea441565](http://investors.amyris.com/static-files/81d5dc1b-b2e2-48b7-a7e5-4ad7ea441565). ACESSO EM 10/08/2018.

AMYRIS WEBSITE. AMYRIS ANNOUNCES KEY ADVANCEMENTS UNDER DARPA MULTI-YEAR TECHNOLOGY INVESTMENT AGREEMENT — ENABLES DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL-SCALE FERMENTATION PROCESS FOR VIRTUALLY ANY BIOLOGICAL MOLECULE. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTP://INVESTORS.AMYRIS.COM/NEWS-RELEASES/NEWS-RELEASE-DETAILS/AMYRIS-ANNOUNCES-KEY-ADVANCEMENTS-UNDER-DARPA-MULTI-YEAR](http://investors.amyris.com/news-releases/news-release-details/amyris-announces-key-advancements-under-darpa-multi-year). ACESSO EM 19/09/2018.

ANDERSEN, E.S. TECHNO-ECONOMIC PARADIGMS AS TYPICAL INTERFACES BETWEEN PRODUCERS AND USERS. JOURNAL OF EVOLUTIONARY ECONOMICS. JUNE, VOLUME 1, ISSUE 2, PP 119–144, 1991.

ARESTA, MICHELE; DIBENEDETTO, ANGELA & DUMEIGNIL, FRANCK. BIOREFINERY: FROM BIOMASS TO CHEMICALS AND FUELS. WALTER DE GRUYTER GMBH & CO. KG, BERLIN/BOSTON 14: 95-112. OXFORD UNIVERSITY PRESS, OXFORD, 1995.

AREZKI, R., RAMEY, V. A., & SHENG, L. IMF WORKING PAPER NEWS SHOCKS IN OPEN ECONOMIES: EVIDENCE FROM GIANT OIL DISCOVERIES. FMI. 2015. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.IMF.ORG/EXTERNAL/PUBS/FT/WP/2015/WP15209.PDF](https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2015/wp15209.pdf). ACESSO EM 15/10/2019.

ARTHUR, W. BRIAN. COMPETING TECHNOLOGIES, INCREASING RETURNS, AND LOCK-IN BY HISTORICAL EVENTS. THE ECONOMIC JOURNAL, 99, MARCH, 116-131, 1999.

ARTHUR, W. BRIAN. COMPLEXITY AND THE ECONOMY. OXFORD UNIVERSITY PRESS. 2015.

ARZEDA WEBSITE. ARZEDA AND ZYMERGEN COLLABORATE ON DEVELOPMENT OF NEW MOLECULES. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTPS://ARZEDA.COM/2016/03/ARZEDA-AND-ZYMERGEN-COLLABORATE-ON-DEVELOPMENT-OF-NEW-MOLECULES/](https://arzeda.com/2016/03/Arzeda-and-Zymergen-collaborate-on-development-of-new-molecules/). ACESSO EM 18/10/2018.

ARZEDA WEBSITE. ARZEDA RAISES \$12 MILLION IN SERIES A ROUND OF FUNDING LED BY OS FUND. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTPS://ARZEDA.COM/2017/07/ARZEDA-RAISES-12-MILLION-IN-SERIES-A-ROUND-OF-FUNDING-LED-BY-OS-FUND/](https://arzeda.com/2017/07/arzeda-raises-12-million-in-series-a-round-of-funding-led-by-os-fund/). ACESSO EM 18/10/2018.

BAILEY, ANDREA; LEONG, JEREMY; AND ITZGERALD, NICHOLE (2015) BIOPRODUCTS TO ENABLE BIOFUELS WORKSHOP SUMMARY REPORT. US DEPARTMENT OF ENERGY; WESTMINSTER, COLORADO

BARCLAY'S E&P SPENDING OUTLOOK. E&P CAPEX: FIRST DOUBLE DIP SINCE '86. 2016. FONTE: OIL & GAS 360: [HTTPS://WWW.OILANDGAS360.COM/EP-CAPEX-FIRST-DOUBLE-DIP-SINCE-86/](https://www.oilandgas360.com/ep-CAPEX-first-double-dip-since-86/)

BAYER WEBSITE. BAYER AND GINKGO BIOWORKS UNVEIL JOINT VENTURE, JOYN BIO, AND ESTABLISH OPERATIONS IN BOSTON AND WEST SACRAMENTO. 2018. DISPONÍVEL EM [HTTPS://MEDIA.BAYER.COM/BAYNEWS/BAYNEWS.NSF/ID/BAYER-GINKGO-BIOWORKS-UNVEIL-JOINT-VENTURE-JOYN-BIO-ESTABLISH-OPERATIONS-BOSTON-WEST-SACRAMENTO](https://media.bayer.com/baynews/baynews.nsf/id/bayer-ginkgo-bioworks-unveil-joint-venture-joyn-bio-establish-operations-boston-west-sacramento). ACESSO EM 23/10/2018.

BCC RESEARCH. SYNTHETIC BIOLOGY: GLOBAL MARKETS; BCC RESEARCH: WELLESLEY, MA, 2014.

BECKER, JUDIT; LANGE, ANNA; FABARIUS, JONATHAN; AND WITTMAN, CHRISTOPH. TOP VALUE PLATFORM CHEMICALS: BIO-BASED PRODUCTION OF ORGANIC ACIDS. CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY, 36:168–175, 2015.

BIOFUELS DIGEST. GOOGLE INVESTS IN COOLPLANETBIOFUELS, JOINS \$2M SERIES B ROUND. 2011. DISPONÍVEL EM. ACESSO EM 23/08/2018

BIOFUELS DIGEST. COOL PLANET TO INVEST \$168M IN LOUISIANA – STEALTHY BIOTECHNOLOGY HEADS FOR SCALE. 2013. DISPONÍVEL EM [HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2013/08/25/COOL-PLANET-TO-INVEST-168M-IN-LOUISIANA-STEALTHY-BIOTECHNOLOGY-HEADS-FOR-SCALE/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2013/08/25/cool-planet-to-invest-168m-in-louisiana-stealthy-biotechnology-heads-for-scale/). ACESSO EM 27/08/2018

BIOFUELS DIGEST. SOLAZYME ROQUETTE: LE BREAK-UP EN LA BOULANGERIE. 2013. DISPONÍVEL EM [HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2013/06/25/SOLAZYME-ROQUETTE-LE-BREAK-UP-EN-LA-BOULANGERIE/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2013/06/25/solazyme-roquette-le-break-up-en-la-boulangerie/). ACESSO EM 22/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. 4 MINUTES WITH...WES BOLSEN, COOL PLANET, STRATEGIC PARTNERSHIPS. 2014. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2014/11/04/4-MINUTES-WITHWES-BOLSEN-COOL-PLANET-STRATEGIC-PARTNERSHIPS/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/11/04/4-minutes-with-wes-bolsen-cool-planet-strategic-partnerships/). ACESSO EM 29/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. COOL PLANET TAKES BIG STEPS TOWARD SCALE FOR WASTE-TO-GASOLINE, SOIL AMENDMENT. 2014. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2014/10/05/COOL-PLANET-TAKES-BIG-STEPS-TOWARD-SCALE-FOR-WASTE-TO-GASOLINE-SOIL-AMENDMENT/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/10/05/cool-planet-takes-big-steps-toward-scale-for-waste-to-gasoline-soil-amendment/). ACESSO EM 29/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. THE GREAT ALGAE ROBBERY. 2015. DISPONÍVEL EM:
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2015/02/27/THE-GREAT-ALGAE-ROBBERY/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/02/27/the-great-algae-robbery/)
 ACESSO EM 21/08/2018

BIOFUELS DIGEST. AMYRIS AND THE VELOCITY OF RENEWABLES. 2015. DISPONÍVEL EM
[HTTPS://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2015/08/27/AMYRIS-AND-THE-VELOCITY-OF-RENEWABLES/](https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/08/27/amyris-and-the-velocity-of-renewables/). ACESSO EM 11/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. THE RISE OF ORGANIC MANUFACTURING: GINKGO, AMYRIS, GENOMATICA'S CIRCLE OF INNOVATION IS A TREND TO WATCH. 2016. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2016/09/29/THE-RISE-OF-ORGANIC-MANUFACTURING-GINKGO-AMYRIS-GENOMATICAS-CIRCLE-OF-INNOVATION-IS-A-TREND-TO-WATCH/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/09/29/the-rise-of-organic-manufacturing-ginkgo-amyris-genomaticas-circle-of-innovation-is-a-trend-to-watch/). ACESSO EM 04/09/2018.

BIOFUELS DIGEST. "CALL ME TERRAVIA": SOLAZYME TRANSFORMS, SHAKES UP AND REFINANCES. 2016. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2016/03/13/CALL-ME-TERRAVIA-SOLAZYME-TRANSFORMS-SHAKES-UP-AND-REFINANCES/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/03/13/call-me-terravia-solazyme-transforms-shakes-up-and-refinances/) ACESSO EM 22/08/2018

BIOFUELS DIGEST. THE RISE OF ORGANIC MANUFACTURING: GINKGO, AMYRIS, GENOMATICA'S CIRCLE OF INNOVATION IS A TREND TO WATCH. 2016. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2016/09/29/THE-RISE-OF-ORGANIC-MANUFACTURING-GINKGO-AMYRIS-GENOMATICAS-CIRCLE-OF-INNOVATION-IS-A-TREND-TO-WATCH/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/09/29/the-rise-of-organic-manufacturing-ginkgo-amyris-genomaticas-circle-of-innovation-is-a-trend-to-watch/). ACESSO EM 04/09/2018.

BIOFUELS DIGEST. CORBION BIDS TO ACQUIRE TERRAVIA. 2017. DISPONÍVEL EM
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/08/02/CORBION-BIDS-TO-ACQUIRE-TERRAVIA/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/08/02/corbion-bids-to-acquire-terravia/) ACESSO EM 22/08/2018

BIOFUELS DIGEST. ENGAGE THE HYPER-DRIVE: SYN BIO'S FASTEST ARE GOING FASTER, BIGGER AS KYTOPEN, GINKGO, TWIST BIOSCIENCES, ARZEDA, TESELAGEN FEEL THE NEED FOR SPEED. 2017. DISPONÍVEL EM

[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/10/09/ENGAGE-THE-HYPER-DRIVE-SYNBIOS-FASTEST-ARE-GOING-FASTER-BIGGER-AS-KYTOPEN-GINKGO-TWIST-BIOSCIENCES-ARZEDA-TESELAGEN-FEEL-THE-NEED-FOR-SPEED/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/10/09/engage-the-hyper-drive-synbios-fastest-are-going-faster-bigger-as-kytopen-ginkgo-twist-biosciences-arzeda-teselagen-feel-the-need-for-speed/). ACESSO EM 19/09/2018

BIOFUELS DIGEST. GENOMATICA GOES BIG WITH BIO-BG. 2017. DISPONÍVEL EM

[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/08/12/GENOMATICA-GOES-BIG-WITH-BIO-BG/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/08/12/genomatica-goes-big-with-bio-bg/). ACESSO EM 03/09/2018

BIOFUELS DIGEST. TERRAVIA IN THE WILDERNESS YEARS. 2017. DISPONÍVEL EM

[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/04/19/TERRAVIA-IN-THE-WILDERNESS-YEARS/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/04/19/terravia-in-the-wilderness-years/). ACESSO EM 22/08/2018

BIOFUELS DIGEST. THE SEXY 7: THE BIO MARKETS AND APPS IN PET, PX, PEF, PLA, PHA, PBS, AND PE. 2017. DISPONÍVEL EM

[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/06/06/THE-SEXY-7-THE-BIO-MARKETS-AND-APPS-IN-PET-PX-PEF-PLA-PHA-PBS-AND-PE/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/06/06/the-sexy-7-the-bio-markets-and-apps-in-pet-px-pef-pla-pha-pbs-and-pe/). ACESSO EM 16/10/2017.

BIOFUELS DIGEST. THIS IS AN ALGORITHM, THAT IS ALIVE: THE RISE OF ARZEDA AND DIGITAL BIOLOGY. 2017. DISPONÍVEL EM

[HTTPS://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/12/07/THIS-IS-AN-ALGORITHM-THAT-IS-ALIVE-THE-RISE-OF-ARZEDA-AND-DIGITAL-BIOLOGY/](https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/12/07/this-is-an-algorithm-that-is-alive-the-rise-of-arzeda-and-digital-biology/). ACESSO EM 17/09/2018

BIOFUELS DIGEST. BIOCHAR'S BUZZING AND COOL PLANET'S \$20M CAP RAISE IS FEEDING IT. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/03/23/BIOCHARS-BUZZING-AND-COOL-PLANETS-20M-CAP-RAISE-IS-FEEDING-IT/](https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/03/23/biochars-buzzing-and-cool-planets-20m-cap-raise-is-feeding-it/). ACESSO EM 28/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. GENOMATICA AND THE NEW ROAD TO BIOECONOMY INNOVATION. 2018. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2018/08/29/GENOMATICA-AND-THE-NEW-ROAD-TO-BIOECONOMY-INNOVATION/](https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/08/29/genomatica-and-the-new-road-to-bioeconomy-innovation/). ACESSO EM 30/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. GENOMATICA AND THE NEW ROAD TO BIOECONOMY INNOVATION. 2018. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2018/08/29/GENOMATICA-AND-THE-NEW-ROAD-TO-BIOECONOMY-INNOVATION/](https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/08/29/genomatica-and-the-new-road-to-bioeconomy-innovation/). ACESSO EM 30/08/2018.

BIOFUELS DIGEST. GINKGO'S INSANE \$275M VENTURE HAUL SAYS IT LOUD: DIGITAL BIOLOGY IS HERE. 2018. DISPONÍVEL EM:
[HTTP://WWW.BIOFUELSDIGEST.COM/BDIGEST/2017/12/14/GINKGOS-INSANE-275M-VENTURE-HAUL-SAYS-IT-LOUD-DIGITAL-BIOLOGY-IS-HERE/](http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2017/12/14/ginkgos-insane-275m-venture-haul-says-it-loud-digital-biology-is-here/). ACESSO EM 07/09/2018

BIOTECHNOLOGY INNOVATION ORGANIZATION. SYNTHETIC BIOLOGY EXPLAINED. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.BIO.ORG/ARTICLES/SYNTHETIC-BIOLOGY-EXPLAINED](https://www.bio.org/articles/synthetic-biology-explained). ACESSO EM 02/10/2017.

BNDES. FIRMAPAULISTA IMPLEMENTA O MAIOR PROJETO DE QUÍMICA VERDE DO PAÍS. 2016. DISPONÍVEL EM
[HTTPS://WWW.BNDES.GOV.BR/WPS/PORTAL/SITE/HOME/TRANSPARENCIA/RESULTADOS-PARA-A-SOCIEDADE/PROJETOS-APOIADOS/FIRMA-PAULISTA-IMPLEMENTA-O-MAIOR-PROJETO-DE-QUIMICA-VERDE-DO-PAIS](https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/resultados-para-a-sociedade/projetos-apoiados/firma-paulista-implementa-o-maior-projeto-de-quimica-verde-do-pais). ACESSO EM 23/08/2018.

BORNSTEINY, G., KRUSELLZ, P., & REBELO, S. LAGS, COSTS AND SHOCKS: AN EQUILIBRIUM MODEL OF THE OIL INDUSTRY. 2017. FONTE:
[HTTP://WWW.KELLOGG.NORTHWESTERN.EDU/FACULTY/REBELO/HTM/OIL.PDF](http://www.kellogg.northwestern.edu/faculty/rebelo/hlm/oil.pdf). ACESSO EM 02/01/2018.

BP. (2017). BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY JUNE 2017. FONTE:
[HTTPS://WWW.BP.COM/CONTENT/DAM/BP/EN/CORPORATE/PDF/ENERGY-ECONOMICS/STAT...](https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistics_review/2017) ACESSO EM 02/01/2018.

BRACMORT, KELSI. MEETING THE RENEWABLE FUEL STANDARD (RFS) MANDATE FOR CELLULOSIC BIOFUELS: QUESTIONS AND ANSWERS. 2012. US CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE. DISPONÍVEL EM
[HTTPS://FAS.ORG/SGP/CRS/MISC/R41106.PDF](https://fas.org/sgp/crs/misc/R41106.pdf) [HTTPS://FAS.ORG/SGP/CRS/MISC/R41106.PDF](https://fas.org/sgp/crs/misc/R41106.pdf). ACESSO EM 15/10/2019.

BRENNER, M. THE ANALYSIS OF SITUED SOCIAL ACTION: THE CASE OF THE RESEARCH INTERVIEW. IN: GINSBURG, G.P.; BRENNER, M.; VON CRANACH, M. (ORGS.) DISCOVERY STRATEGIES IN THE PSYCHOLOGY OF ACTION. LONDON: ACADEMIC PRESS, P. 207-227, 1985..

BRESCHI, S. AND F. MALERBA, SECTORAL INNOVATION SYSTEMS: TECHNOLOGICAL REGIMES, SCHUMPETERIAN DYNAMICS, AND SPATIAL BOUNDARIES. IN EDQUIST C. AND. MCKELVEY M. D (EDS.), SYSTEMS OF INNOVATION: GROWTH, COMPETITIVENESS AND EMPLOYMENT. CHELTENHAM, EDWARD ELGAR, 249-261, 2000.

BRESCHI, S., LISSONI, F. & MALERBA, F. KNOWLEDGE-RELATEDNESS IN FIRM TECHNOLOGICAL DIVERSIFICATION. RESEARCH POLICY 32, 69–87, 2003.

BRESCHI, STEFANI; MALERBA, FRANCO; & ORSENIGO, LUIGI. TECHNOLOGICAL REGIMES AND SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATION. THE ECONOMIC JOURNAL 110 (463), 388-410, 2000.

BUCHANAN, J.M. AND STUBBLEBINE, W.C., ECONOMICA NEW SERIES, VOL. 29, NO. 116, PP. 371-384, 1962.

BUENO, C. DA S.; DA SILVEIRA, BUAINAIN, A. M.; & DAL POZ, E. M. (2018) APPLYING AN IPC NETWORK TO IDENTIFY THE BIOENERGY TECHNOLOGICAL FRONTIER. REV. BRAS. INOV., CAMPINAS (SP), 17 (2), P. 259-286, JULHO/DEZEMBRO 2018

BUSINESS WIRE, TERRAVIA (SOLAZYME) AND UNILEVER SIGN MULTI-YEAR SUPPLY AGREEMENT FOR \$200 MILLION + OF SUSTAINABLE HIGH PERFORMANCE ALGAE OILS. 2018. DISPONÍVEL EM

[HTTPS://WWW.BUSINESSWIRE.COM/NEWS/HOME/20160314006305/EN/TERRAVIA-SOLAZYME-UNILEVER-SIGN-MULTI-YEAR-SUPPLY-AGREEMENT](https://www.businesswire.com/news/home/20160314006305/en/Terravia-Solazyme-Unilever-Sign-Multi-Year-Supply-Agreement). ACESSO EM 23/08/2018.

CAMPBELL, C. J., & LAHERRERE, J. H. THE END OF CHEAP OIL. SCIENTIFIC AMERICAN. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://NATURE.BERKELEY.EDU/ER100/READINGS/CAMPBELL_1998.PDF](https://nature.berkeley.edu/er100/readings/campbell_1998.pdf). ACESSO EM 05/05/2018.

CAMPOS, H.M.; AGUIRRE, I.D P.; SOLE, F. & NUÑO, J.P. TECHNOLOGY STRATEGY AND NEW TECHNOLOGY BASED FIRMS. JOURNAL OF TECHNOLOGY MANAGEMENT AND INNOVATION 4(4) · DECEMBER/2009.

CARLSSON, B. & STANKIEWICZ, R. ON THE NATURE, FUNCTION, AND COMPOSITION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS. JOURNAL OF EVOLUTIONARY ECONOMICS, 1(2) 93-118, 1991.

CARLSSON, B. (ED.) TECHNOLOGICAL SYSTEMS AND INDUSTRIAL DYNAMICS. KLUWER ACAD. PUBL., DORDRECHT. 1997

CHANDLER, A.D. STRATEGY AND STRUCTURE: CHAPTERS IN THE HISTORY OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE. CAMBRIDGE, MA.: HARVARD UNIV. PRESS, 1963.

CHEIKY, MIKE CARBON NEGATIVE LIQUID FUELS. APRESENTAÇÃO PARA O FÓRUM “WE SOLVE FOR X”. 2018. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=ZKYVLZ9V_0o](https://www.youtube.com/watch?v=ZKYVLZ9V_0o). ACESSO EM 24/08/2018.

CHERUBINI, FRANCESCO AND STRØMMAN, ANDERS CHEMICALS FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: OPPORTUNITIES, PERSPECTIVES, AND POTENTIAL OF BIOREFINERY SYSTEMS. BIOFUELS, BIOPROD. BIOREF. 5:548–56, 2011

CLARKE, T. THE DEMISE OF THE GLOBAL OIL INDUSTRY. 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.FEASTA.ORG/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/01/SYSTEMIC-CHANGE-REV-7.PDF](http://www.feasta.org/wp-content/uploads/2017/01/systemic-change-rev-7.pdf). ACESSO EM 18/09/2017.

CLAXTON, L. THE HISTORY, GENOTOXICITY, AND CARCINOGENICITY OF CARBON-BASED FUELS AND THEIR EMISSIONS: 1. PRINCIPLES AND BACKGROUND. MUTATION RESEARCH 762 (2014) 76–107, 2014.

COHEN, W. M., & LEVINTHAL, D. A. ABSORPTIVE CAPACITY: A NEW PERSPETIVE ON LEARNING AND INNOVATION. ADMINISTRATIVE SCIENCE QUARTERLY, VOL. 35, No. 1, SPECIAL ISSUE: TECHNOLOGY, ORGANIZATIONS, AND INNOVATION. MAR., PP. 128-152, 1990.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO RAMO QUÍMICO. PANORAMA INDÚSTRIA QUÍMICA. 2015. DISPONÍVEL EM [HTTP://CNQ.ORG.BR/SYSTEM/UPLOADS/PUBLICATION/2530840AD5BF3C7A5B23896BA2EB4C33/FILE/PANORAMA-INDUSTRIA-QUIMICA-B.PDF](http://cnq.org.br/system/uploads/publication/2530840ad5bf3c7a5b23896ba2eb4c33/file/panorama-industria-quimica-b.pdf). ACESSO EM 02/08/2019

COOL PLANET WEBSITE. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.COOLPLANET.COM/](https://www.coolplanet.com/). ACESSO EM 28/08/2018

CORROCHER, N., F. MALERBA, AND MONTOBIO F, SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATIVE ACTIVITY IN THE ICT FIELD. RESEARCH POLICY, 36(3), 418-432, 2007.

COUTINHO, F. O PREÇO DO PETRÓLEO E O SINAL DOS TEMPOS. FONTE: OCUPAR A PETROBRAS: 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://FELIPECOUTINHO21.FILES.WORDPRESS.COM/2016/02/O-PREC3A7O-DO-PETRC...](https://felipecoutinho21.files.wordpress.com/2016/02/o-prec3a7o-do-petrc...) ACESSO EM 15/05/2017.

COUTINHO, F. O FIM DO PETRÓLEO BARATO E DO MUNDO QUE CONHECEMOS. 2017.

DISPONÍVEL EM: [HTTPS://JORNALGGN.COM.BR/NOTICIA/O-FIM-DO-PETROLEO-BARATO-E-DO-MUNDO-QUE-CONHECEMOS-POR-FELIPE-COUTINHO](https://jornalggn.com.br/noticia/o-fim-do-petroleo-barato-e-do-mundo-que-conhecemos-por-felipe-coutinho). ACESSO EM 07/07/2017.

COUTINHO, F. A ENERGIA É O MEIO E A PETROBRAS É A CHAVE PARA O DESENVOLVIMENTO SOBERANO DO BRASIL. 2017 B. DISPONÍVEL EM: BLOG OCUPAR A PETROBRAS:

[HTTPS://FELIPECOUTINHO21.FILES.WORDPRESS.COM/2017/07/A-ENERGIA-C3A9-O-ME...](https://felipecoutinho21.files.wordpress.com/2017/07/a-energia-c3a9-o-me...) ACESSO EM 20/01/2018.

DAVID, PAUL. THE COMPUTER AND THE DYNAMO. AMERICAN ECONOMY REVIEW, V.90, PP 355-61, 1990. DAVISON, BRIAN H., AND LIEVENSE, JEFF. TECHNOLOGY CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN COMMERCIALING INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY. UNITED STATES: N. P., 2016. WEB.

DAVISON, PAUL. IS PROBABILITY THEORY RELEVANT FOR UNCERTAINTY? A POST KEYNESIAN PERSPECTIVE. JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES, VOLUME 5, NUMBER 1, WINTER 1991, PAGES 129–143

DIETRICH, JEFFREY A. THE RESSURGENCE OF INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://LYGOS.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2015/03/2014-11-SYNBIOBETA-FLYER.PDF](https://lygos.com/wp-content/uploads/2015/03/2014-11-synbiobeta-flyer.pdf). ACESSO EM 29/11/2019

DOSI AND F. MALERBA (EDS.) ORGANIZATIONS AND STRATEGY IN THE EVOLUTION OF THE ENTERPRISE. LONDON: MACMILLAN. 1996.

DOSI AND L. MARENGO. SOME ELEMENTS OF AN EVOLUTIONARY THEORY OF ORGANIZATIONAL COMPETENCES', IN R. W. ENGLAND, EVOLUTIONARY CONCEPTS IN CONTEMPORARY ECONOMICS, ANN ARBOR: UNIVERSITY OF MICHIGAN PRESS, 1994.

DOSI, FREEMAN, AND S. FABIANI. THE PROCESS OF ECONOMIC DEVELOPMENT: INTRODUCING SOME STYLIZED FACTS AND THEORIES ON TECHNOLOGIES, FIRMS AND INSTITUTIONS', INDUSTRIAL AND CORPORATE CHANGE, 3: 1-32, 1994.

DOSI, G. TECHNOLOGICAL PARADIGMS AND TECHNOLOGICAL TRAJECTORIES: A SUGGESTED INTERPRETATION OF THE DETERMINANTS AND DIRECTIONS OF TECHNICAL CHANGE', RESEARCH POLICY, 11: 147-162, 1984.

DOSI, G. MUDANÇA TÉCNICA E TRANSFORMAÇÃO INDUSTRIAL. A TEORIA E UMA APLICAÇÃO À INDÚSTRIA DOS SEMICONDUTORES. EDITORA DA UNICAMP: CAMPINAS, SP, 2006.

DOSI, G. & MAZZUCATO, M. KNOWLEDGE ACCUMULATION AND INDUSTRY EVOLUTION. THE CASE OF PHARMA-BIOTECH. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2006.

DOSI, G., NELSON R. AND WINTER S.G.(EDS.) THE NATURE AND DYNAMIC OF ORGANIZATIONAL CAPABILITIES. OXFORD/NEW YORK, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2000.

DOSI, GIOVANNI. TECHNOLOGICAL PARADIGMS AND TECHNOLOGICAL TRAJECTORIES: A SUGGESTED INTERPRETATION OF THE DETERMINANTS AND DIRECTIONS OF TECHNICAL CHANGE. RESEARCH POLICY 11 (3), 147-162, 1984.

DOSI, GIOVANNI. OPPORTUNITIES, INCENTIVES AND THE COLLECTIVE PATTERNS OF TECHNOLOGICAL CHANGE. THE ECONOMIC JOURNAL 107 (444), 1530-1547, 1997.

DOSI, GIOVANNI; FALLO, MARCO; & MARENGO, LUIGI. ORGANIZATIONAL CAPABILITIES, KNOWLEDGE ACCUMULATION AND GOVERNANCE STRUCTURES IN BUSINESS FIRMS AN INTRODUCTION. LEM WORKING PAPERS SERIES, 2003/11.

DOSI, NELSON & WINTER, THE NATURE AND DYNAMICS OF ORGANIZATIONAL CAPABILITIES. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2002.

DUARTE, ROSALIA. ENTREVISTAS EM PESQUISAS QUALITATIVAS. EDUCAR, CURITIBA, N. 24, P. 213-225, 2004.

DUSSELIÉ M., MASCAL M., SELS B.F. TOP CHEMICAL OPPORTUNITIES FROM CARBOHYDRATE BIOMASS: A CHEMIST'S VIEW OF THE BIOREFINERY. IN: NICHOLAS K. (EDS) SELECTIVE CATALYSIS FOR RENEWABLE FEEDSTOCKS AND CHEMICALS. TOPICS IN CURRENT CHEMISTRY, VOL 353. SPRINGER, CHAM, 2014.

EIA, U. WORLD CRUDE OIL PRODUCTION BY YEAR. FONTE: INDEX MUNDI: DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.INDEXMUNDI.COM/ENERGY/?PRODUCT=OIL&GRAPH=PRODUCTION](https://www.indexmundi.com/energy/?product=oil&graph=production). ACESSO EM 15/07/2017.

EISENHARDT, K.M. & MARTIN, J. A. DYNAMIC CAPABILITIES: WHAT ARE THEY?. STRAT. MGMT. J., 21: 1105–1121, 2000.

ELABORA CONSULTORIA. WORLD DIRECTORY OF ADVANCED RENEWABLE FUELS AND CHEMICALS. ELABORA EDITORA: SÃO PAULO, 2014.

ELIGON, JOHN & WALD, MATTHEW L. DAYS OF PROMISE FADE FOR ETHANOL. THE NEW YORK TIMES. MARCH 16, 2013. DISPONÍVEL EM:

<https://www.nytimes.com/2013/03/17/us/17ethanol.html>. ACESSO EM 29/11/2019.

EVALUATE ENERGY, THE 7 TOP WAYS TO MEASURE OIL & GAS FINDING & DEVELOPMENT COSTS. DISPONÍVEL EM: [HTTP://CDN2.HUBSPOT.NET/HUB/312313/FILE-437446448-PDF/WHITEPAPERS/TOP_7_...](http://cdn2.hubspot.net/hub/312313/file-437446448-pdf/whitepapers/top_7...) ACESSO EM 15/10/2016.

FESTEL, G, J KNÖLL AND H GÖTZ. INDUSTRIAL BIOTECH — INFLUENCING PRODUCTION, CHEMISTRY AND INDUSTRY, 7(5), 21–22, 2014.

FESTEL, G. TECHNOLOGY TRANSFER MODELS BASED ON ACADEMIC SPIN-OFFS WITHIN THE INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY SECTOR. INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION MANAGEMENT VOL. 19, NO. 4 (AUGUST) 1550031, 2015.

FERRARI, VINÍCIUS EDUARDO; FERREIRA JARDIM DA SILVEIRA, JOSÉ MARIA; SOARES DAL-POZ, MARIA ESTER. PATENT NETWORK ANALYSIS IN AGRICULTURE: A CASE STUDY OF THE DEVELOPMENT AND PROTECTION OF BIOTECHNOLOGIES. ECONOMICS OF INNOVATION AND NEW TECHNOLOGY, V. 28, P. 1-23, 2019.

FERRARI, V.; SILVEIRA, JOSÉ MARIA F.J.; POZ, M. E. S. D. . AN OVERVIEW OF THE APPROPRIABILITY MECHANISMS USED IN PLANT BIOTECHNOLOGY INDUSTRY. INTERNATIONAL JOURNAL FOR INNOVATION EDUCATION AND RESEARCH, V. 7, P. 351-358, 2019.

FREEMAN, C. & SOETE, L. A ECONOMIA DA INOVAÇÃO INDUSTRIAL. CAMPINAS, SP. EDITORA DA UNICAMP, 2008.

FREEMAN, C. INNOVATION, CHANGES OF TECHNO-ECONOMIC PARADIGM AND BIOLOGICAL ANALOGIES IN ECONOMICS. REVUE ÉCONOMIQUE, 1991.

FREEMAN, C. THE ECONOMICS OF INDUSTRIAL INNOVATION. LONDON: PINTER, 2ND EDN, 1982

FUTURE MARKET INSIGHTS. BIO-PLASTICS MARKET: GLOBAL INDUSTRY ANALYSIS AND OPPORTUNITY ASSESSMENT 2014 TO 2020. 2014. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.FUTUREMARKETINSIGHTS.COM/REPORTS/GLOBAL-BIO-PLASTICS-MARKET](https://www.futuremarketinsights.com/reports/global-bio-plastics-market). ACESSO EM 16/10/2018

FURTADO, JOÃO EDUARDO DE MORAIS PINTO & URIAS, EDUARDO MUNIZ PEREIRA. RECURSOS NATURAIS E DESENVOLVIMENTO. ESTUDOS SOBRE O POTENCIAL DINAMIZADOR DA

MINERAÇÃO NA ECONOMIA BRASILEIRA. PRIMEIRA EDIÇÃO. SÃO PAULO: ED. DOS AUTORES/IBRAM, 2013. ISBN 97885915804-08.

GALLETTA, ANNE. MASTERING THE SEMI-STRUCTURED INTERVIEW AND BEYOND: FROM RESEARCH DESIGN TO ANALYSIS AND PUBLICATION. NEW YORK UNIVERSITY PRESS. NEW YORK, LONDON, 2013.

GANDHAM, S. A TECHNICAL PERSPECTIVE ON 2G BIOFUELS AND THE WAY FORWARD. EU-INDIA CONFERENCE ON ADVANCED BIOFUELS NEW DELHI, 7TH – 8TH MARCH, 2018. DISPONÍVEL EM

[HTTPS://EC.EUROPA.EU/ENERGY/SITES/ENER/FILES/DOCUMENTS/14_SRIGANESH_GANDHAM-HPCL.PDF](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/14_sriganesh_gandham-hpcl.pdf). ACESSO EM 28/01/2019

GAO, SHAN; SONG, WEIPING; & GUO, MINGXIN. THE INTEGRAL ROLE OF BIOPRODUCTS IN THE GROWING BIOECONOMY. INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY. VOL. 16 No. 1. FEBRUARY 2020. PP. 13-25.

GARDNER, TYMOTHI S. AND HAWKINS, KRISTY. SYNTHETIC BIOLOGY: EVOLUTION OR REVOLUTION? A CO-FOUNDER'S PERSPECTIVE. CURRENT OPINION IN CHEMICAL BIOLOGY 2013, 17:871–877, 2013.

GAVIGAN, J. P. & SCAPOLLO, F. MATCHING METHODS TO THE MISSION: A COMPARISON OF NATIONAL FORESIGHT EXERCISES. FORESIGHT, VOL. 01, N. 06, DEC. 1999.

GENOMATICA WEBSITE. GENOMATICA INTRODUCES NEXT PROCESS TECHNOLOGY. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.GENOMATICA.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/02/GENOMATICA-INTRODUCES-NEXT-PROCESS-TECHNOLOGY.PDF](https://www.genomatica.com/wp-content/uploads/2017/02/genomatica-introduces-next-process-technology.pdf). ACESSO EM 03/09/2018

GILBERT, G. N. BEING INTERVIEW: A ROLE ANALYSIS. SOCIAL SCIENCE INFORMATION, LONDON, BEVERLY HILLS, V. 19, N. 2, P. 227-236, 1980.

GORAYEB, D. S.; GARCIA, R. C.; NUNES FERREIRA, A.; ULTREMARE, F. O SEGMENTO DE INSUMOS QUÍMICOS PARA O SETOR DE COSMÉTICOS. ABDI. RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO SETORIAL. JUNHO, 2013.

GRANDO, R.L. STARTUPS E MODELOS DE NEGÓCIO EM BIOECONOMIA: AS TRAJETÓRIAS DE AMYRIS E SOLAZYME. DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS, ESCOLA DE QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS. RIO DE JANEIRO, RJ. 2013

GRAVILESCU, MARIA AND CHISTI, YUSUFBIOTECHNOLOGY—A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR CHEMICAL INDUSTRY. BIOTECHNOLOGY ADVANCES 23 471–499, 2005.

KRAFT, G. &SAVIOTTI, P.P. ON THE LIFE CYCLE OF KNOWLEDGE INTENSIVE SECTORS. REVUE DE L'OFCE, 63–86, 2007.

GRILICHES, Z. PATENT STATISTICS AS ECONOMIC INDICATORS: A SURVEY. JOURNAL OF ECONOMIC LITERATURE, 28(4), 1661-1707, 1990.

GRUSHKIN, D. THE RISE AND FALL OF THE COMPANY THAT WAS GOING TO HAVE US ALL USING BIOFUELS. 2012. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.FASTCOMPANY.COM/3000040/RISE-AND-FALL-COMPANY-WAS-GOING-HAVE-US-ALL-USING-BIOFUELS](https://www.fastcompany.com/3000040/RISE-AND-FALL-COMPANY-WAS-GOING-HAVE-US-ALL-USING-BIOFUELS). ACESSO EM 18/10/2018.

HAMSEN, T. &COENEN, L. UNPACKING INVESTMENTS DECISIONS IN BIORREFINERIES. PAPERS IN INNOVATION STUDIES. PAPER No. 2015/34. CIRCLE, LUND UNIVERSITY, 2015.

HAYDEN, ERIKA. SYNTHETIC-BIOLOGY FIRMS SHIFT FOCUS. NATURE, VOL 505. 2014.

DISPONÍVEL EM

[HTTP://GO.GALEGROUP.COM/PS/I.DO?V=2.1&IT=R&SW=W&ID=GALE%7CA361351579&PRODID=AONE&USERGROUPNAME=UNICAMP_BR](http://go.galegroup.com/ps/i.do?v=2.1&it=R&sw=W&id=GALE%7CA361351579&prodid=AONE&usergroupname=UNICAMP_BR). ACESSO EM 04/09/2018.

HODGSON, G. EVOLUTIONARY AND COMPETENCE-BASED THEORIES OF THE FIRM. JOURNAL OF ECONOMIC STUDIES, VOL. 25 No. 1, 1998, Pp. 25-56, 1998.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, WORLD ENERGY OUTLOOK 2011. CLIMATE CHANGE AND THE 450 SCENARIO. THE DOOR IS CLOSING, BUT WHEN WILL WE BE “LOCKED-IN”? OECD/IEA, PARIS, CAP. 6, 2011.

IPCC. CLIMATE CHANGE 2013. THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. WORKING GROUP I CONTRIBUTION. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA, 2013.

IPCC. CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT. CONTRIBUTION OF WORKING GROUPS I, II AND III TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC, GENEVA, SWITZERLAND, 151 PP, 2014.

KAHL, LINDA J. AND ENDY, DREW A SURVEY OF ENABLING TECHNOLOGIES IN SYNTHETIC BIOLOGY. JOURNAL OF BIOLOGICAL ENGINEERING 2013, 7:13, 2013.

KAUFMANN, R. K. THE END OF CHEAP OIL: ECONOMIC, SOCIAL, AND POLITICAL CHANGE IN THE US AND FORMER SOVIET UNION. ENERGIES, 2014 (7): 6225-6241 · OCTOBER 2014.

KENNEDY, MARY. A GUIDE TO INTERVIEWS GUIDES. DISPONÍVEL EM [HTTPS://MSU.EDU/USER/MKENNEDY/DIGITALADVISOR/RESEARCH/INTERVIEWING.HTM](https://msu.edu/user/mkennedy/digitaladvisor/research/interviewing.htm). ACESSO EM 25/01/2017.

KLEVORICK, A. K., R. C. LEVIN, RR NELSON, SG WINTER. ON THE SOURCES AND SIGNIFICANCE OF INTERINDUSTRY DIFFERENCES IN TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES. RESEARCH POLICY, 24(2), 185-205, 1995.

KLINE, S., ROSENBER, G. AN OVERVIEW OF INNOVATION, IN: LANDAU, R., ROSENBERG, N. (EDS), THE POSITIVE SUM STRATEGY: HARNESSING TECHNOLOGY FOR ECONOMIC GROWTH, WASHINGTON, DC, NATIONAL ACADEMY PRESS, PP. 275-305, 1986.

KNIGHT, F.H. RISK, UNCERTAINTY AND PROFIT, HOUGHTON MIFFLIN, NEW YORK, NY, 1921.

KNOCKAERT, M.; MANIGART, S.; CATTOIR, S.; VERSTRAETE, W. A PERSPECTIVE ON THE ECONOMIC VALORIZATION OF GENE MANIPULATED BIOTECHNOLOGY: PAST AND FUTURE. BIOTECHNOLOGY REPORTS 6 (2015) 56– 60, 2015.

KRAFFT, J. AND F. QUATRARO. THE DYNAMICS OF TECHNOLOGICAL KNOWLEDGE: FROM LINEARITY TO RECOMBINATION. IN ANTONELLI C. (ED), HANDBOOK ON THE ECONOMIC COMPLEXITY OF TECHNOLOGICAL CHANGE. CHELTENHAM, EDWARD ELGAR, 2011.

KRAFFT, J. QUATRARO, F. & SAVIOTTI, P. THE KNOWLEDGE BASE EVOLUTION IN BIOTECHNOLOGY: A SOCIAL NETWORK ANALYSIS, ECONOMICS OF INNOVATION AND NEW TECHNOLOGY, 20:5, 445-475, 2011.

KRAFFT, J., F. QUATRARO, AND SAVIOTTI P. P. KNOWLEDGE CHARACTERISTICS AND THE DYNAMICS OF TECHNOLOGICAL ALLIANCES IN PHARMACEUTICALS: EMPIRICAL EVIDENCE FROM EUROPE, US AND JAPAN, JOURNAL OF EVOLUTIONARY ECONOMICS, 24, 587-622, 2014.

KWOK, ROBERTA. FIVE HARD TRUTHS FOR SYNTHETIC BIOLOGY. NATURE, VOL. 463, 21. LEARNING AND INNOVATION." ADMINISTRATIVE SCIENCE QUARTERLY, 35(1): 128-152, 2010.

LEVINTHAL, D. LEARNING AND SCHUMPETERIAN DYNAMICS, IN DOSI & MALERBA, ORGANIZATION AND STRATEGY IN THE EVOLUTION OF THE ENTERPRISE, MACMILLAN PRESS LTD, LONDON, 1996.

LEVINTHAL, D. ADAPTATION ON RUGGED LANDSCAPES. MANAGEMENT SCIENCE 43 (7), 934-950, 1997.

LEVINTHAL, D., & MARCH, J. MYOPIA OF LEARNING. STRATEGIC MANAGEMENT JOURNAL, 1993

LEVITT, B. & MARCH, J. ORGANIZATIONAL LEARNING. ANNUAL REVIEW OF SOCIOLOGY, VOL. 14. (1988), PP. 319-340, 1988.

LOASBY, B. EQUILIBRIUM AND EVOLUTION: AN EXPLANATION OF CONNECTING PRINCIPLES IN ECONOMICS, 1991.

LYND, LEE. THE GRAND CHALLENGE OF CELLULOSIC BIOFUELS. WHY CELLULOSIC BIOFUELS HAVE FALLEN SHORT OF EXPECTATIONS AND WHAT WE CAN DO ABOUT IT. NATURE BIOTECHNOLOGY. VOLUME 35 NUMBER 10 OCTOBER 2017

MALEKI, ALI; ROSIELLO, ALESSANDR AND WIELD, DAVID. THE EFFECT OF THE DYNAMICS OF KNOWLEDGE BASE COMPLEXITY ON SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATION: THE UPSTREAM PETROLEUM INDUSTRY. INNOGEN INSTITUTE, UNIVERSITY OF EDINBURGH, 2016.

MALERBA, F. AND L. ORSENIGO. SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATION. CAMBRIDGE JOURNAL OF ECONOMICS, 19(1), 47-65, 1995

MALERBA, F. AND L. ORSENIGO, SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATION ARE TECHNOLOGY-SPECIFIC. RESEARCH POLICY, 25(3), 451-478, 1996.

MALERBA, F. AND L. ORSENIGO, TECHNOLOGICAL REGIMES AND SECTORAL PATTERNS OF INNOVATIVE ACTIVITIES. INDUSTRIAL AND CORPORATE CHANGE, 6(1), 83-118, 1997.

MALERBA, F. AND L. ORSENIGO, KNOWLEDGE, INNOVATIVE ACTIVITIES AND INDUSTRIAL EVOLUTION. INDUSTRIAL AND CORPORATE CHANGE, 9(2), 289-314, 2000.

MALERBA, F., INNOVATION AND THE EVOLUTION OF INDUSTRIES. JOURNAL OF EVOLUTIONARY ECONOMICS, 16(1), 3-23, 2006.

MALERBA, F. SCHUMPETERIAN PATTERNS OF INNOVATION AND TECHNOLOGICAL REGIMES. IN HANUSCH H. AND PYKA A. (EDS), ELGAR COMPANION TO NEO-SCHUMPETERIAN ECONOMICS. CHELTENHAM, EDWARD ELGAR, 2007.

MANZINI, E. J. A ENTREVISTA NA PESQUISA SOCIAL. DIDÁTICA, SÃO PAULO, V. 26/27, P. 149-158, 1990/1991.

MANZINI, E.J. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ELABORAÇÃO DE ROTEIRO PARA ENTREVISTA SEMI-ESTRUTURADA. IN: MARQUEZINE: M. C.; ALMEIDA, M. A.; OMOTE; S. (ORGS.) COLÓQUIOS SOBRE PESQUISA EM EDUCAÇÃO ESPECIAL. LONDRINA:EDUEL, P.11-25, 2003.

MARCH, J.G. FOOTNOTES TO ORGANIZATIONAL CHANGE, ADMINISTRATIVE SCIENCE QUARTELY, 26, PP. 563-77, 1981.

MARQUES, F. IMPACTO NO MERCADO. REVISTA FAPESP, ABRIL DE 2018. DISPONÍVEL EM [HTTP://REVISTAPESQUISA.FAPESP.BR/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/04/032-036_RENOVABIO_266.PDF](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2018/04/032-036_RENOVABIO_266.PDF). ACESSO EM 28/01/2019.

MARQUES, F. OBSTÁCULOS NO CAMINHO. REVISTA PESQUISA FAPESP, EDIÇÃO 268, JUN. 2018. DISPONÍVEL EM [HTTP://REVISTAPESQUISA.FAPESP.BR/2018/06/18/OBSTACULOS-NO-CAMINHO/](http://revistapesquisa.fapesp.br/2018/06/18/obstaculos-no-caminho/). ACESSO EM 27/01/2019.

MARQUES, GUILHERME DE OLIVEIRA. ANELAS DE OPORTUNIDADE PARA CATCHING UP TECNOLÓGICO: PERSPECTIVA E DESAFIOS A EMPRESAS BRASILEIRAS FRENTE AO ADVENTO DAS NOVAS ROTAS BIOTECNOLÓGICAS DE DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS INDUSTRIAIS. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP), 2011.

MARQUES, GUILHERME DE OLIVEIRA. EVOLUTION OF THE KNOWLEDGE-BASE IN GREEN CHEMISTRY AFTER TECHNOLOGICAL DISCONTINUITIES: A SOCIAL NETWORK ANALYSIS OF PATENT DATA. PAPER PRESENTED AT THE GLOBELICS INTERNATIONAL CONFERENCE 2015, HAVANA, CUBA.

MARQUES, GUILHERME DE OLIVEIRA., URIAS, EDUARDO., & FURTADO, JOÃO. GREEN CHEMISTRY AND BIOPLASTICS: ANALYSIS OF THE OPPORTUNITIES AND THE SPECIFIC

CHALLENGES TO DEVELOPING COUNTRIES, SPECIAL FOCUS IN BRAZIL. PAPER PRESENTED AT THE INTERNATIONAL SCHUMPETER SOCIETY CONFERENCE 2010 ON INNOVATION, ORGANIZATION, SUSTAINABILITY AND CRISES, AALBORG, DENMARK.

MARTINS, JOSÉ VITOR BOMTEMPO. DESAFIOS DO ECOSISTEMA DE INOVAÇÃO EM BIOECONOMIA NO BRASIL. BOLETIM INFOPETRO, V. 18, P. 46, 2018.

MARTINS, JOSÉ VITOR BOMTEMPO & CHAVES, FLÁVIA. O FUTURO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS XII – AS NOVAS EMPRESAS DA BIOINDÚSTRIA E O BRASIL: COMPARANDO AMYRIS, SOLAZYME E Ls9. BLOG INFOPETRO. 2012. DISPONÍVEL EM [HTTPS://INFOPETRO.WORDPRESS.COM/2012/05/14/O-FUTURO-DOS-BIOCOMBUSTIVEIS-XII-AS-NOVAS-EMPRESAS-DA-BIOINDUSTRIA-E-O-BRASIL-COMPARANDO-AMYRIS-SOLAZYME-E-Ls9/](https://infopetro.wordpress.com/2012/05/14/o-futuro-dos-biocombustiveis-xii-as-novas-empresas-da-bioindustria-e-o-brasil-comparando-amyris-solazyme-e-ls9/). ACESSO EM 14/08/2018

MARTINS, JOSÉ VITOR BOMTEMPO. O FUTURO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS IV: A POSIÇÃO BRASILEIRA. 2010. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://INFOPETRO.WORDPRESS.COM/2010/09/06/O-FUTURO-DOS-BIOCOMBUSTIVEIS-IV-ARENAS-COMPETITIVAS-DISTINTAS-ESTRATEGIAS-COMPETITIVAS-DISTINTAS/](https://infopetro.wordpress.com/2010/09/06/o-futuro-dos-biocombustiveis-iv-arenas-competitivas-distintas-estrategias-competitivas-distintas/). ACESSO EM 15/08/2018

MARTINS, JOSÉ VITOR BOMTEMPO. O FUTURO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS IX: A DIVERSIDADE DE ESTRATÉGIAS E O FUTURO DA BIOECONOMIA – COMPARANDO SHELL, BRASKEM E AMYRIS. 2011. DISPONÍVEL EM [HTTPS://INFOPETRO.WORDPRESS.COM/2011/09/05/O-FUTURO-DOS-BIOCOMBUSTIVEIS-IX-A-DIVERSIDADE-DE-ESTRATEGIAS-E-O-FUTURO-DA-BIOECONOMIA-COMPARANDO-SHELL-BRASKEM-E-AMYRIS/](https://infopetro.wordpress.com/2011/09/05/o-futuro-dos-biocombustiveis-ix-a-diversidade-de-estrategias-e-o-futuro-da-bioeconomia-comparando-shell-braskem-e-amyris/). ACESSO EM 15/08/2018

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. DISRUPTIVE TECHNOLOGIES: ADVANCES THAT WILL TRANSFORM LIFE, BUSINESS, AND THE GLOBAL ECONOMY; MCKINSEY & COMPANY: WASHINGTON, DC, 2013.

MOLCHANOV ADVANCED BIOECONOMY CONFERENCE HIGHLIGHTS: SCALE-UP, STRATEGICS, SUSTAINABILITY. ALTERNATIVE ENERGY AND CLEAN TECHNOLOGY - FUELS AND CHEMICALS: INDUSTRY TIDBIT, 2015.

MORSCHBAKER, ENTREVISTA AO PORTAL BRASIL-ALEMANHA NEWS. 2012. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.BRASILALEMANHANEWS.COM.BR/ACONTECE-CAMARA/ENTREVISTAS/MATERIAS-PRIMAS-RENOVAVEIS-CONQUISTAM-ESPACO/](http://www.brasilalemanhanews.com.br/acontece-camara/entrevistas/materias-primas-renovaveis-conquistam-espaco/). ACESSO EM 26/09/2018

MOWERY, DAVID & ROSENBERG, NATHAN. PATHS OF INNOVATION: TECHNOLOGICAL CHANGE IN 20TH CENTURY AMERICA. NEW YORK, NY: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1998.

NAMEROFF, T.; GARANT, R. & ALBERT, M. ADOPTION OF GREEN CHEMISTRY: AN ANALYSIS BASED ON US PATENTS. RESEARCH POLICY 33 (2004) 959–974

NASCIMENTO ET AL. TECNOLOGIA DO DNA RECOMBINANTE. APOSTILA DA FACULDADE DE MEDICINA DA USP. RIBEIRÃO PRETO, SÃO PAULO., 2003.

NATIONAL INSTITUTE FOR PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT. ANALYSIS OF DEVELOPMENTS IN WHITE (INDUSTRIAL) BIOTECHNOLOGY. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTPS://BIOTECHNOLOGIE.RIVM.NL/DOCUMENT/ANALYSIS-NEW-DEVELOPMENTS-WHITE](https://biotechnologie.rivm.nl/document/analysis-new-developments-white).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. INDUSTRIALIZATION OF BIOLOGY A ROADMAP TO ACCELERATE THE ADVANCED MANUFACTURING OF CHEMICALS. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS 500 FIFTH STREET, NW WASHINGTON, DC 20001, 2015.

NELSON, R.R. AND WINTER, S.G. AN EVOLUTIONARY THEORY OF ECONOMIC CHANGE, HARVARD, 1982.

NESTA, L. & SAVIOTTI, P.P. COHERENCE OF THE KNOWLEDGE BASE AND THE FIRM'S INNOVATIVE PERFORMANCE: EVIDENCE FROM THE U.S. PHARMACEUTICAL INDUSTRY. THE JOURNAL OF INDUSTRIAL ECONOMICS, VOL. 53, NO. 1 (MAR., 2005), PP. 123-142

NEW YORK TIMES ALGAE-ENGINEERING JOINT VENTURE DISBANDS. 2013. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.NYTIMES.COM/2013/06/25/BUSINESS/ENERGY-ENVIRONMENT/ALGAE-ENGINEERING-JOINT-VENTURE-DISBANDS.HTML](https://www.nytimes.com/2013/06/25/business/energy-environment/algae-engineering-joint-venture-disbands.html). ACESSO EM 22/08/2018

NOOY, W., MRVAR, A. & BATAGELJ, EXPLORATORY SOCIAL NETWORK ANALYSIS WITH PAJEK. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, NEW YORK: NEW YORK, 2005.

NREL & PNNL. TOP VALUE ADDED CHEMICALS FROM BIOMASS, VOL. I. AGO 2004.

NREL & PNNL. TOP VALUE ADDED CHEMICALS FROM BIOMASS, VOL.II. OUT DE 2007.

OCDE THE BIOECONOMY TO 2030: DESIGNING A POLICY AGENDA; OECD PUBLISHING, 2009.

OCDE, SUSTAINABLE CHEMISTRY: EVIDENCE ON INNOVATION FROM PATENT DATA. SERIES ON RISK MANAGEMENT, N. 25. PARIS, 28/FEV/2011.

OCDE, THE APPLICATION OF BIOTECHNOLOGY TO INDUSTRIAL SUSTAINABILITY; OECD PUBLISHING FRANCE, 2001.

OCDE, EMERGING POLICY ISSUES IN SYNTHETIC BIOLOGY [ONLINE]; OECD PUBLISHING, 2014. DISPONÍVEL EM: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1787/9789264208421-EN](http://dx.doi.org/10.1787/9789264208421-en). ACESSO EM DEZEMBRO/2014.

OLGUÍN, E. J.; G. GIULIANO, D. PORRO, R. TUBEROSA, F. SALAMINI, BIOTECHNOL. ADV. 2017, 30, 931.

PAPOUTSAKIS, E.T. RE-ASSESSING THE PROGRESS IN THE PRODUCTION OF ADVANCED BIOFUELS IN THE CURRENT COMPETITIVE ENVIRONMENT AND BEYOND: WHAT ARE THE SUCCESSES AND WHERE PROGRESS ELUDES US AND WHY. IND. ENG. CHEM. RES., 2015, 54 (42), PP 10170–10182.

PENROSE, E.T. THE THEORY OF THE GROWTH OF THE FIRM, BASIL BLACKWELL, OXFORD. REPRINTED, 1959.

PEREZ, C. TECHNOLOGICAL REVOLUTIONS AND TECHNO-ECONOMIC PARADIGMS. CAMBRIDGE JOURNAL OF ECONOMICS, VOLUME 34, ISSUE 1, JANUARY 2010, PAGES 185–202, 2010.

PISANO, G. N SEARCH OF DYNAMIC CAPABILITIES, IN DOSI, NELSON & WINTER, (2002) THE NATURE AND DYNAMICS OF ORGANIZATIONAL CAPABILITIES. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2002.

QUATRARO, FRANCESCO, EVOLUTION OF THE KNOWLEDGE BASE IN KNOWLEDGE INTENSIVE SECTORS. PAPER PRESENT AT DRUID SUMMER CONFERENCE, CBS - COPENHAGEN BUSINESS SCHOOL, 2009.

QUEIROZ, A.U.B. (2015) “CONTRIBUIÇÕES PARA OS ESTUDOS PROSPECTIVOS EM AMBIENTES COMPLEXOS: O CASO DOS BIOPLÁSTICOS”. TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNICAMP PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. CAMPINAS, 2015.

QUEIROZ, SÉRGIO ROBLES REIS DE. APRENDIZADO TECNOLÓGICO, IN PELAEZ, V. & SZMRECSÁNYI, T. ECONOMIA DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. PP 193-211. EDITORA HUGITEC. ORDEM DOS ECONOMISTAS DO BRASIL SÃO PAULO, 2006

RAMANI, SHYAMA & LOOSE, MARIE-ANGELE DE. USING PATENT STATISTICS AS KNOWLEDGE BASE INDICATORS IN THE BIOTECHNOLOGY SECTORS: AN APPLICATION TO FRANCE, GERMANY AND THE U.K. SCIENTOMETRICS, VOL. 54, No. 3 (2002) 319–346

REN, T., DANIELS, B., PATEL, MK & BLOK, K PRODUCTION COSTS IN 2030-2050. RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING. VOLUME 53, ISSUE 12, OCTOBER 2009, PAGES 653-663.

DISPONÍVEL EM

[HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0921344909000780](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344909000780). ACESSO EM 21/01/2019.

REUTERS, SOLAZYME BAGS U.S. NAVY CONTRACT FOR GREEN JET FUEL. 2009. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.REUTERS.COM/ARTICLE/US-SOLAZYME-CONTRACT/SOLAZYME-BAGS-U-S-NAVY-CONTRACT-FOR-GREEN-JET-FUEL-IDUSTRE58N43K20090924](https://www.reuters.com/article/us-solazyme-contract/solazyme-bags-u-s-navy-contract-for-green-jet-fuel-idUSTRE58N43K20090924). ACESSO EM 23/08/2018.

REUTERS. CADE APROVA AQUISIÇÃO PELA CORBION DE CONTROLE NA JOINT VENTURE SOLAZYME BUNGE. 2018. DISPONÍVEL EM:

[HTTPS://BR.REUTERS.COM/ARTICLE/BUSINESSNEWS/IDBRKBN1HR1TR-OBRBS](https://br.reuters.com/article/businessnews/idBRKBN1HR1TR-OBRBS). ACESSO EM 23/08/2018.

ROSENBERG, N. EXPLORING THE BLACK BOX: TECHNOLOGY, ECONOMICS, AND HISTORY, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE AND NEW YORK, 1994.

SALEHI JOUZANI GH., TAHERZADEH M.J. ADVANCES IN CONSOLIDATED BIOPROCESSING SYSTEMS FOR BIOETHANOL AND BUTANOL PRODUCTION FROM BIOMASS: A COMPREHENSIVE REVIEW. BIOFUEL RESEARCH JOURNAL 5 (2015) 152-195.

SALLES-FILHO, SERGIO LUIZ MONTEIRO; CASTRO, PAULA FELÍCIO DRUMMOND DE ; BIN, ADRIANA ; EDQUIST, CHARLES ; FERRO, ANA FLÁVIA PORTILHO ; CORDER, SOLANGE . PERSPECTIVES FOR THE BRAZILIAN BIOETHANOL SECTOR: THE INNOVATION DRIVER. ENERGY POLICY, V. 108, P. 70-77, 2017.

SALLES-FILHO, SERGIO LUIZ MONTEIRO. CONCLUSIONS: FUTURE OF BIOETHANOL – MAIN FINDINGS AND PROSPECTS, IN (SALLES-FILHO, S. ET AL. ED.) GLOBAL BIOETHANOL. EVOLUTION, RISKS, AND UNCERTAINTIES. LONDON: ELSEVIER, 2016.

SALLES-FILHO, SERGIO LUIZ MONTEIRO. CONCLUSÕES: CENÁRIOS DA INOVAÇÃO PARA O SETOR SSUCROENERGÉTICO, IN (SALLES-FILHO ET AL. ED.) FUTUROS DO BIOETANOL. O BRASIL NA LIDERANÇA? SÃO PAULO: ELSEVIER EDITORA LTDA. 2015.

SAVIOTTI, P.P. HE KNOWLEDGE-BASE OF THE FIRM IN BIOTECHNOLOGY BASED SECTORS: PROPERTIES AND PERFORMANCE. REVISTA BRASILEIRA DE INOVAÇÃO (RBI) V. 3, N. 1 JAN/JUN (2004).

SAVIOTTI, P.P. ON THE DYNAMICS OF GENERATION AND UTILIZATION OF KNOWLEDGE: THE LOCAL CHARACTER OF KNOWLEDGE. STRUCTURAL CHANGE AND ECONOMIC DYNAMICS 18 (2007) 387–408, 2007.

SCHUMPETER J.A., CAPITALISM, SOCIALISM AND DEMOCRACY. NEW YORK: HARPER & ROW, 1942.

SCHUMPETER, J.A., THE THEORY OF ECONOMIC DEVELOPMENT. CAMBRIDGE, MA, HARVARD ECONOMIC STUDIES, 1934.

SILVA JR, G.; DA SILVEIRA, J.M., HASENCLEVER, L.; PARANHOS, J. & MIRANDA, R. INNOVATION, MARKET POWER AND BIOTECHNOLOGY IN THE BRAZILIAN CHEMICAL INDUSTRY. ECONOMICS BULLETIN. VOL. 37, ISSUE 2.

SILVA, T. L. AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO DE EXPLOÇÃO A VAPOR CATALISADO POR ÁCIDO CÍTRICO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO SOBRE A HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR. 2017. DISPONÍVEL EM [HTTPS://REPOSITORIO.UFU.BR/BITSTREAM/123456789/18193/1/AVALIACAOPRETRATAMENTO.PDF](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/18193/1/Avaliacaopretratamento.pdf). ACESSO EM 05/05/2018. TRABALHO APRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS.

SILVA, M. F. O. E. ; PEREIRA, F. S. ; MARTINS, JOSÉ VITOR BOMTEMPO . A BIOECONOMIA BRASILEIRA EM NÚMEROS. BNDES SETORIAL, V. 47, P. 277, 2018.

SINGH, R. ACTS, GROWTH, AND OPPORTUNITIES IN INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY. ORGANIC PROCESS RESEARCH & DEVELOPMENT, 15, 175–179, 2011.

STERN REVIEW, THE ECONOMICS OF CLIMATE CHANGE, EXECUTIVE SUMMARY, UK, 2006.

STIGLITZ, JOSEPH E. WANTED: A GLOBAL GREEN NEW DEAL. PROJECT SYNDICATE. ESPECIAL EDITION MAGAZINE, FALL 2019: SUSTAINABILITY. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.PROJECT-SYNDICATE.ORG/ONPOINT/NO-ALTERNATIVE-TO-CARBON-NEUTRALITY-GREEN-NEW-DEAL-BY-JOSEPH-E-STIGLITZ-2019-10](https://www.project-syndicate.org/onpoint/no-alternative-to-carbon-neutrality-green-new-deal-by-joseph-e-stiglitz-2019-10). ACESSO EM 09/10/2019.

TEECE, DAVID. DYNAMIC CAPABILITIES AS (WORKABLE) MANAGEMENT SYSTEMS THEORY. JOURNAL OF MANAGEMENT & ORGANIZATION, 24:3 (2018), PP. 359–368.

TEECE, DAVID. J. BUSINESS MODELS AND DYNAMIC CAPABILITIES. LONG RANGE PLANNING (IN PRESS), 2017, DISPONÍVEL EM: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.LRP.2017.06.007](https://doi.org/10.1016/J.LRP.2017.06.007). ACESSO EM 30/12/2019.

TEECE, DAVID.J. TECHNOLOGICAL CHANGE AND THE NATURE OF THE FIRM", IN DOSI ET AL. (EDS), TECHNICAL CHANGE AND ECONOMIC THEORY, PINTER, LONDON, PP. 256-81.

TEECE, DAVID., PETERAF, M., &LEIH, S. DYNAMIC CAPABILITIES AND ORGANIZATIONAL AGILITY. CALIFORNIA MANAGEMENT REVIEW, 58(4), 2016, 13–35.

TEECE, DAVID. AND PISANO, G. THE DYNAMIC CAPABILITIES OF FIRMS: AN INTRODUCTION. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1994.

TEECE, DAVID.; RUMELT, R.; DOSI, G. &WINTER, S. UNDERSTANDING CORPORATE COHERENCE. THEORY AND EVIDENCE. JOURNAL OF ECONOMIC BEHAVIOR AND ORGANIZATION 23 (1994) L-30. NORTH-HOLLAND, 1994.

TEECE, DAVID; PISANO, GARRY; &SHUEN, AMY. DYNAMIC CAPABILITIES AND STRATEGIC MANAGEMENT. STRATEGIC MANAGEMENT JOURNAL, VOL. 18, NO. 7. (AUG., 1997), PP. 509-533

TEECE, PISANO &SHUEN. DYNAMIC CAPABILITIES AND STRATEGIC MANAGEMENT, IN DOSI, NELSON &WINTER, (2002) THE NATURE AND DYNAMICS OF ORGANIZATIONAL CAPABILITIES. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2002.

THE ECONOMIST. WHEN OIL IS NO LONGER IN DEMAND. 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.ECONOMIST.COM/SPECIAL-REPORT/2016/11/24/WHEN-OIL-IS-NO-LONGER-IN-DEMAND](https://www.economist.com/special-report/2016/11/24/when-oil-is-no-longer-in-demand). ACESSO EM 24/10/2018.

THE ECONOMIST. WHO'S AFRAID OF CHEAP OIL? 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.ECONOMIST.COM/LEADERS/2016/01/23/WHOS-AFRAID-OF-CHEAP-OIL](https://www.economist.com/leaders/2016/01/23/whos-afraid-of-cheap-oil). ACESSO EM 07/07/2017.

THE ECONOMIST. THE OIL CONUNDRUN. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.GOOGLE.COM.BR/SEARCH?Q=WHO%C2%B4S+AFRAID+OF+CHEAP+OIL%3F&OQ=WHO%C2%B4S+AFRAID+OF+CHEAP+OIL%3F&AQS=CHROME..69i57j0l2.956j0j7&SOURCEID=CHROME&IE=UTF-8](https://www.google.com.br/search?q=who%2B4s+afraid+of+cheap+oil%3F&oq=who%2B4s+afraid+of+cheap+oil%3F&aqs=chrome..69i57j0l2.956j0j7&sourc=chrome&ie=utf-8). ACESSO EM 07/07/2017.

THE HILLS GROUP. DEPLETION: A DETERMINATION FOR THE WORLD'S PETROLEUM RESERVE.2015. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.THEHILLSGROUP.ORG/PETROHGV2.PDF](http://www.thehillsgroup.org/petrohgv2.pdf). ACESSO EM 15/10/2019.

THE HILLS GROUP. THE HILL'S GROUP: GOLD MINES VS OIL DEPLETION. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTPS://SRSROCCOREPORT.COM/THE-HILLS-GROUP-GOLD-MINES-VS-OIL-DEPLETION/](https://srsroccoreport.com/the-hills-group-gold-mines-vs-oil-depletion/). ACESSO EM 15/10/2019.

THE MOTLEY FOOL. INTREXON BATTLES THERMODYNAMICS, BUT THERMODYNAMICS ALWAYS WINS. 2016. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.FOOL.COM/INVESTING/2016/06/13/INTREXON-BATTLES-THERMODYNAMICS-BUT-THERMODYNAMICS.ASPX](https://www.fool.com/investing/2016/06/13/intrexon-battles-thermodynamics-but-thermodynamics.aspx). ACESSO EM 06/09/2018

THE PE HUB NETWORK. GOOGLE VENTURES BACKS COOLPLANETBIOFUELS. 2011. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.PEHUB.COM/2011/03/GOOGLE-VENTURES-BACKS-COOLPLANETBIOFUELS/#](https://www.pehub.com/2011/03/google-ventures-backs-coolplanetbiofuels/#). ACESSO EM 23/08/2018

TORRES, A. C.; MARTINS, J.V.B. ; OROSKI, F. A.; ALVES, F. C. TRANSIÇÃO DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS: O DESAFIO DA INCLUSÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS RENOVÁVEIS NA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA. XVI CONGRESSO LATINO IBERO-AMERICANO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO; 2015, PORTO ALEGRE (RS).

TVERBERG, G. AN UPDATED VERSION OF THE "PEAK OIL" STORY. FONTE: OUR FINITE WORLD: 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://OURFINITEWORLD.COM/2016/08/08/AN-UPDATED-VERSION-OF-THE-PEAK-OIL...](https://ourfinitemworld.com/2016/08/08/an-updated-version-of-the-peak-oil...) ACESSO EM 15/10/2019.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION- SHORT-TERM ENERGY OUTLOOK (STEO). 2016. DISPONÍVEL EM [HTTP://WWW.EIA.GOV/FORECASTS/STEO/](http://www.eia.gov/forecasts/steo/). ACESSO EM SETEMBRO/2016.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. FINAL RENEWABLE FUEL STANDARDS FOR 2014, 2015 AND 2016, AND THE BIOMASS-BASED DIESEL VOLUME FOR 2017. 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.EPA.GOV/RENEWABLE-FUEL-STANDARD-PROGRAM/FINAL-RENEWABLE-FUEL-STANDARDS-2014-2015-AND-2016-AND-BIOMASS-BASED](https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/final-renewable-fuel-standards-2014-2015-and-2016-and-biomass-based) . ACESSO EM SETEMBRO/2018.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US EPA. RENEWABLE FUELS STANDARD PROGRAM. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.EPA.GOV/RENEWABLE-FUEL-STANDARD-PROGRAM](https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program). ACESSO EM SETEMBRO/2016. UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, MA.

US 20170197192A1 BIOCHAR AGGREGATE PARTICLES. DISPONÍVEL EM [HTTPS://PATENTS.GOOGLE.COM/PATENT/US20170197192A1/EN](https://patents.google.com/patent/US20170197192A1/en). ACESSO EM 26/06/2019

US DARPA WEBSITE. LIVING FOUNDRIES PROGRAM. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.DARPA.MIL/PROGRAM/LIVING-FOUNDRIES](https://www.darpa.mil/program/living-foundries). ACESSO EM 19/09/2018

US DEPARTMENT OF ENERGY. ENERGY INNOVATION PORTFOLIO PLAN FY2018 – FY2022. 2017

US DOE. SOLAZYME DEVELOPING CHEAPER ALGAE BIOFUELS, BRINGS JOBS TO PENNSYLVANIA. 2010. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.ENERGY.GOV/ARTICLES/SOLAZYME-DEVELOPING-CHEAPER-ALGAE-BIOFUELS-BRINGS-JOBS-PENNSYLVANIA](https://www.energy.gov/articles/solazyme-developing-cheaper-algae-biofuels-brings-jobs-pennsylvania). ACESSO EM 23/08/2018.

US DOE, BIOMASS FEEDSTOCKS. DISPONÍVEL EM [HTTPS://ENERGY.GOV/EERE/BIOENERGY/BIOMASS-FEEDSTOCKS](https://energy.gov/eere/bioenergy/biomass-feedstocks). ACESSO EM 30/09/2017.

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION WEBSITE. NATURAL GAS EXPLAINED. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.EIA.GOV/ENERGYEXPLAINED/INDEX.PHP?PAGE=NATURAL_GAS_WHERE](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=natural_gas_where). ACESSO EM 25/10/2017.

US INFLATION CALCULATOR. US INFLATIONS CALCULATOR. FONTE: US INFLATIONS CALCULATOR: [HTTP://WWW.USINFLATIONCALCULATOR.COM/](http://www.usinflationcalculator.com/). ACESSO EM 10/10/2017.

VAN DIEN, STEPHEN. FROM THE FIRST DROP TO THE FIRST TRUCKLOAD: COMMERCIALIZATION OF MICROBIAL PROCESSES FOR RENEWABLE CHEMICALS. CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY. VOLUME 24, ISSUE 6, DECEMBER 2013, PAGES 1061–1068, 2013.

WEI, JAMES. GREAT INVENTIONS THE CHANGED THE WORLD. JOHN WILEY & SONS, INC., HOBOKEN, NEW JERSEY, 2012.

WEISS, STEVE. HARNESSING BIOTECHNOLOGY: A PRACTICAL GUIDE. 2016. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.GENOMATICA.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/01/HARNESSING-BIOTECHNOLOGY-A-PRACTICAL-GUIDE.PDF](https://www.genomatica.com/wp-content/uploads/2017/01/Harnessing-Biotechnology-A-Practical-Guide.pdf) . ACESSO EM 05/09/2018.

WINTER, S. G. UNDERSTANDING DYNAMIC CAPABILITIES. STRAT. MGMT. J., 24: 991 – 995, 2003.

WONGTSCHOWSKI, PEDRO. THE BRAZILIAN CHEMICAL INDUSTRY - CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, IN JOURNAL OF THE BRAZILIAN CHEMICAL SOCIETY 22(4):605-606 · DECEMBER 2010

WONGTSCHOWSKI, PEDRO. THE BRAZILIAN CHEMICAL INDUSTRY, IN JOURNAL OF THE BRAZILIAN CHEMICAL SOCIETY 23(11):1957-1958 · NOVEMBER 2012

YU, LIN-PING; WU, FU-QING; & CHEN, GUO-QIANG. NEXT-GENERATION
INDUSTRIALBIOTECHNOLOGY-TRANSFORMINGTHE CURRENT INDUSTRIAL
BIOTECHNOLOGYINTOCOMPETITIVE PROCESSES. BIOTECHNOL. J.2019,14,1800437

Anexo 1. Banco de projetos da biotecnologia industrial

A metodologia utilizada na tese principiou pela construção de um amplo banco de dados de projetos da biotecnologia industrial ao redor do mundo, que é um refinamento e um aprimoramento do banco utilizado para o World Directory of Advanced Renewable Fuels and Chemicals, Vol. 1, publicação pela qual o presente autor deste trabalho foi o principal responsável técnico.

O Banco construído contém, para cada projeto, as seguintes informações (dentre outras): nome do projeto, principais responsáveis (organizações); staff (pessoal técnico e científico diretamente relacionado ao projeto); status atual de desenvolvimento; marcos tecnológicos & histórico de informações publicamente disponíveis sobre seu desenvolvimento. Os projetos que constam no banco estão abaixo identificados:

Project Name	Leading Organization(s)
1. Abengoa Bioenergy, S.A. - Commercial Plant, Hugoton, Kansas, United States	Abengoa Bioenergy, S.A.
2. Aemetis - Commercial Plant, Keyes, California, United States	Aemetis
3. Ajinomoto Co Inc & Toray Industries New Nylon Raw Material Project	Ajinomoto Co Inc Toray Industries
4. Lee Integrated Biorefinery	Algenol Biofuels LLC
5. Rural Community Biorefinery	Alltech
6. AlpenaBiorefinery	American Process Inc
7. Amyris - Commercial Plant, Sertãozinho, São Paulo, Brazil	Amyris Biotechnologies
8. Amyris - Commercial Plant, Pradópolis, São Paulo, Brazil	Amyris Biotechnologies
9. Amyris – Commercial Plant, Brotas, São Paulo, Brazil	Amyris Biotechnologies
10. Amyris and ETH Bioenergia Joint Venture Project	Amyris Biotechnologies ETH Bioenergia
11. Integrated Plant to Convert Corn Stover to Fuel and Chemicals	Archer Daniels Midland (ADM)
12. Argent Energy - Commercial Plant, Scotland	Argent Energy

13. Aurora Algae - Commercial Plant, Maitland, Western Australia	Aurora Algae
14. BASF & Corbion Purac - Bio-based Succinic Acid Plant	BASF Purac (CSM)
15. BBI BioVentures LLC - Commercial Plant, Colorado, United States	BBI BioVentures LLC
16. Italian Bio Products (IBP) - Commercial Plant, Italy	Beta Renewables
17. Beyond Aviation - Colorado, United States	Beyond Aviation
18. Bio Architecture Lab (BAL) - Isobutanol Project	Bio Architecture Lab (BAL)
19. Bio Architecture Lab- Chile Facility	Bio Architecture Lab, US (BAL)
20. Bioalgostral & IGV GmbH Commercial Plant	Bioalgostral IGV GmbH
21. Bioamber – Commercial Plant, Sarnia, Ontario, Canada	Bioamber
22. Bioamber - Commercial Plant, Thailand	Bioamber
Project ALPHA - North Carolina, United States	Biochemtex
23. Biochemtex and Colombiana de Biocombustibles Celulósicos (COLBIOCEL) – Commercial Plant, Colombia	Biochemtex
24. Puerto Libertad Power Plant	BioFields
25. BornBioFuel 2	BioGasol ApS
26. BioMCN - Commercial Plant, Netherlands	BioMCN
27. Biosynthetic Technologies & Monsanto Strategic Partnership	Biosynthetic Technologies
28. Blue Marble Biomaterials (BMBM) – Small Commercial Facility, Missoula, MT, United States	Blue Marble Biomaterials
29. BlueFire Renewables - Commercial Plant, Lancaster, California, United States	BlueFire Renewables
30. BlueFire Renewables - Commercial Plant,	BlueFire Renewables

Fulton, Mississippi, United States	
31. Boeing & Hawaii BioEnergy Aviation Fuel Project	Boeing & Hawaii BioEnergy
32. ChemCell Ethanol	Borregaard (ChemCell) Braskem
33. Braskem & Genomatica – Green Butadiene	Genomatica
34. Braskem & Novozymes - Polypropylene from Sugarcane	Braskem Novozymes
35. Energy and Materials from the Fast Pyrolysis Process	BTG Biomass Technology Group
36. Reforming of Crude Glycerine in Supercritical Water to Produce Methanol for Re-Use in Biodiesel Plants	BTG Biomass Technology Group
37. Butamax™ Advanced Biofuels-Demonstration Plant, United Kingdom	Butamax™ Advanced Biofuels LLC
38. Cargill (Nedcalco) - Commercial Plant, Netherlands	Cargill
39. Domsjoe Biorefinery	Chemrec AB
40. Joint collaboration to produce fuel ethanol from steel mill off-gases	China Steel Corp LCY Chemical Corp LanzaTech Ltd
41. Choren Sigma Plant	CHOREN Biomass GmbH
42. ClearFuels Technology - Commercial Plant, Tennessee, United States	Clear Fuels
43. Cobalt & American Process Plant, Michigan, United States	Cobalt Technologies American Process
44. Cobalt Technologies & Rhodia Bio n-Butanol Project	Cobalt Technologies Rhodia
45. Coskata - Commercial Plant, Clewiston, Florida, United States	Coskata
46. Coskata Flagship - Commercial Plant, Alabama, United States	Coskata
47. Diamond Green Diesel LLC - Commercial	Diamond Green Diesel LLC

Plant, Norco, Louisiana, United States	
48. DuPont - Commercial Plant, Iowa, United States	DuPont Biofuels Solutions
49. DuPont Tate&Lyle Bio Products - Commercial Plant, Tennessee, United States	DuPont Tate & Lyle Bio Products
50. Dynamic Fuels - Commercial Plant, Louisiana, United States	Dynamic Fuels LLC
51. Dynamotive Energy Systems Corporation - Commercial Plant, Guelph, Ontario, Canada	Dynamotive Energy Systems Corporation
52. Dynamotive Energy Systems Corporation & Genting Bio-Oil Sdn - Pyrolysis Oil Project	Dynamotive Energy Systems Corporation Genting Bio-Oil Sdn
53. Biomethane 2nd Generation Project	E.ON Sverige AB
54. Ethanol from low-cost cellulosic sugars	Edeniq Usina Vale
55. World Scale Biochemical Refinery - Indonesia	Elevance Renewable Sciences
56. Elevance - Commercial Plant, Mississippi, United States	Elevance Renewable Sciences
57. Endicott Biofuels -Commercial Plant, Port Arthur, Texas, United States	Endicott Biofuels
59. Mississippi Waste-to-Biofuels Plant	Enerkem
58. Waste-to-Biofuels Production Facility	Enerkem
59. Fiberight - Commercial Plant, Iowa, United States	Fiberight
60. Aspartic Acid from Sugar	Flexible Solutions
61. Kinross Plant	Frontier Renewable Resources

62. Fulcrum Sierra BioFuels Waste-to-Biofuels Plant, Nevada, United States	Fulcrum Sierra Biofuels
63. Genomatica and Novamont – Commercial Plant, Italy	Genomatica Novamont
64. Gevo - Commercial Plant, Minnesota, United States	Gevo
65. Gothenburg Biomass Gasification Project	Göteborg Energi AB (GoBiGas AB)
66. Granbio - Commercial Plant, Alagoas, Brazil	GranBio
67. Green Fuel Nordic Ou Commercial Plant	Green Fuel Nordic Oy
68. Cellulosic Bioethanol from Urban Solid Waste (PERSEO Project)	Imecal
69. Inbicon Biomass Refinery	Inbicon
70. Indian River BioEnergy Center	INEOS New Planet BioEnergy (INPB)
71. Iogen - Commercial Plant, Shelley, Idaho, United States	Iogen
72. KiOR - Commercial Plant, Columbus, United States	KiOR, Inc.
73. KiOR - Commercial Plant, Natchez, United States	KiOR, Inc.
74. Western Biomass Energy	KL Energy
75. Freedom Pines Biorefinery	LanzaTech, Inc.
76. Corn-to-Cellulosic Migration Project	Logos Technologies
77. LS9 - Commercial Plant Brazil	LS9
78. Mascoma – Commercial Plant, Canada	Mascoma
79. BP & Mendel Biotechnology Cooperation	Mendel Biotechnology BP Biofuels

80. METabolic Explorer - Commercial Plant, Iskandar, Malaysia	METabolic Explorer
81. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. – Japan Plant	Mitsubishi Heavy Industries (MHI)
82. Myriant - Succinic Acid Plant	Myriant
83. Novozymes - Nebraska Enzyme Plant	Novozymes
84. Novozymes - Mossi & Ghisolfi Group (M&G)	Novozymes ; M&G
85. Novozymes & Dacheng Group - China Project	Novozymes Dacheng Group
86. Novozymes & Poet Partnership	Novozymes Poet
87. Renewable Gas-to-Liquid (RGL) Plant	Novus Energy
88. Cosan & Amyris Joint Venture	Novvi
89. NSE Biofuels Oy - Commercial Plant, Finland	NSE Biofuels
90. Old Town Fuel & Fiber –Maine, United States	Old Town Fuel & Fiber (OTFF)
91. OriginOil & Algasol Renewables Integrated Algae Growth and Harvesting System	OriginOil Algasol Renewables
92. Project Liberty	POET DSM Advanced Biofuels, LLC
93. PURAC & Toyobo Project	PURAC Toyobo
94. Olympiad Project	Rentech
95. Raízen Plant - Brazil	Raízen
96. Reverdia - Commercial Biosuccinium Plant - Italy	Reverdia
97. Sapphire Intergrated Algal Biorefinery	Sapphire Energy Inc
98. SEKAB - Cellulose to Ethanol Reference Plant	SEKAB Group
99. SEKAB - Commercial Plant, Poland	SEKAB Group BioAgra

100. Solazyme integrated Biorefinery: Diesel Fuels from Heterotrophic Algae	Solazyme
101. Solazyme and Bunge - Commercial Plant, Brazil	Solazyme Bunge
102. St1 Lappeenranta Etanolix® plant	St 1 Biofuels Oy
103. Sundrop Fuels - Commercial Plant, United States	Sundrop Fuels
104. Telles - Commercial Plant, Iowa, United States	Telles
105. Virdia Mississippi Manufacturing Facilities	Virdia
106. Virent & Virdia - Jet Fuel Project	Virent Virdia (HCL CleanTech)
107. Vivergo - Commercial Plant, United Kingdom	Vivergo Fuels
108. Yulex & Cooper Tire Bio-based Polymers Project	Weyland AS
109. ZeaChem Inc. – Commercial Plant, Boardman, Oregon, United States	ZeaChem