



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

CARLOS EDUARDO FERNANDES CORRÊA

OS DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DE BIOMASSAS
LIGNOCELULÓSICAS EM PLANTAS INDUSTRIAIS PIONEIRAS:
O Caso das Plantas de Etanol de Segunda Geração

RIO DE JANEIRO
2023

Carlos Eduardo Fernandes Corrêa

OS DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DE
BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS EM
PLANTAS INDUSTRIAIS PIONEIRAS: O Caso
das Plantas de Etanol de Segunda Geração

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia de Processos
Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
preenchimento parcial dos requisitos para obtenção
do grau de Doutor em Engenharia de Processos
Químicos e Bioquímicos.



Orientadores: Prof. Flávia Chaves Alves, D.Sc.
Prof. José Vitor Bomtempo, D.Sc.

Rio de Janeiro
Março, 2023

C824d Corrêa, Carlos Eduardo Fernandes
 Os Desafios da Utilização de Biomassas
 Lignocelulósicas em Plantas Industriais Pioneiras: O
 Caso das Plantas de Etanol de Segunda Geração /
 Carlos Eduardo Fernandes Corrêa. -- Rio de Janeiro,
 2023.
 170 f.

 Orientadora: Flavia Chaves Alves.
 Coorientador: José Vitor Bomtempo.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
 de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós
 Graduação em Engenharia de Processos Químicos e
 Bioquímicos, 2023.

 1. etanol de segunda geração. 2. plantas
 pioneiras. 3. biorrefinarias. 4. processos de
 inovação. 5. biomassas lignocelulósicas. I. Alves,
 Flavia Chaves, orient. II. Bomtempo, José Vitor,
 coorient. III. Título.

Carlos Eduardo Fernandes Corrêa

OS DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DE
BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS EM
PLANTAS INDUSTRIAIS PIONEIRAS: O Caso
das Plantas de Etanol de Segunda Geração

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em 15 de março de 2023.

Profa. Flávia Chaves Alves, D.Sc. – EPQB/UFRJ

Prof. José Vitor Bomtempo, D.Sc. – EPQB/UFRJ

Prof. Fábio de Almeida Oroski, D.Sc. – EPQB/UFRJ

Profa. Flavia Consoni, D.Sc. – UNICAMP

Prof. Gonçalo Amarantes Guimarães Pereira, D.Sc. – UNICAMP

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira, D.Sc. – FAPESP

Rio de Janeiro
Março, 2023

Resumo

CORRÊA, Carlos Eduardo Fernandes, **Os Desafios da Utilização de Biomassas Lignocelulósicas em Plantas Industriais Pioneiras: O Caso das Plantas de Etanol de Segunda Geração**. Rio de Janeiro, 2023, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A utilização de biomassas residuais em instalações industriais exige o cumprimento de algumas condições que têm se mostrado desafiadoras. Esforços relativamente recentes, visando a produção do etanol de segunda geração (E2G), trouxeram alguns alertas sobre os obstáculos que ainda precisam ser vencidos para a conversão, em grande escala, de biomassas residuais lignocelulósicas em biocombustíveis. Mesmo após anos de pesquisa no desenvolvimento de pacotes tecnológicos, as primeiras plantas de produção de E2G não conseguiram operar continuamente dentro das condições de projeto, gerando uma grande quebra de expectativas no mercado. A partir da análise dos desafios enfrentados pelas plantas pioneiras do E2G e suas relações com os processos de inovação, essa tese tem o objetivo de propor reflexões e considerações que auxiliem na compreensão desses desafios e de seus desdobramentos para projeto e construção de outras plantas pioneiras (*first-of-a-kind*). Os resultados do trabalho indicam que a falta de domínio tecnológico para o manuseio industrial de biomassas lignocelulósicas pode ter sido responsável pelo relativo insucesso operacional das plantas pioneiras de produção do E2G e, que o uso desses novos tipos matérias-primas em grande escala deverá influenciar as trajetórias e os modelos clássicos dos processos de inovação. As conclusões da tese sugerem que o preenchimento dessa lacuna de conhecimento e a compreensão desses novos modelos e padrões podem ser fundamentais para o sucesso dos processos de inovação necessários à implementação de plantas pioneiras, no âmbito da bioeconomia.

Palavras-chave: etanol de segunda geração, plantas pioneiras, biorrefinarias, processos de inovação, biomassas lignocelulósicas.

Abstract

CORRÊA, Carlos Eduardo Fernandes, **Os Desafios da Utilização de Biomassas Lignocelulósicas em Plantas Industriais Pioneiras: O Caso das Plantas de Etanol de Segunda Geração**. Rio de Janeiro, 2023, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Using residual biomass in industrial plants requires to fulfill some conditions that have proven to be challenging in developing production processes based on renewable sources. Relatively recent efforts to produce second-generation ethanol (2GE) have brought some warnings about the obstacles to face for the large-scale conversion of residual lignocellulosic biomass into biofuel. Even after years of research to develop technological packages that would make the production of 2GE feasible, the first plants installed could not operate continuously within the nameplate conditions, generating a breach of expectations in the market. Based on the analysis of challenges faced by the pioneer 2GE production plants and their relationships with the innovation processes, this thesis aims to propose reflections and considerations that help to understand these challenges and their consequences for the projects and construction of other first-of-a-kind industrial plants. The results of the work indicate that the lack of technological mastery for the industrial handling of lignocellulosic biomass may have been responsible for the relative operational failure of the pioneer E2G production plants and that the use of these new types of raw materials on a large scale should influence the trajectories and the classic models of the innovation processes. The thesis' conclusions suggest that filling this knowledge gap and understanding these new models and patterns should be fundamental for the success of the innovation processes necessary to implement first-of-a-kind plants within the scope of the bioeconomy.

Keywords: second-generation ethanol, first-of-a-kind plants, biorefineries, innovation process, lignocellulosic biomass.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Processos de inovação	19
2.2	Modelos de inovação	27
2.3	A Empresa inovadora	31
2.4	Padrões setoriais de inovação	33
2.4.1	Empresas com trajetórias tecnológicas “dominadas pelos fornecedores”	35
2.4.2	Empresas com trajetórias tecnológicas “intensivas em escala”	35
2.4.3	Empresas com trajetórias tecnológicas “baseadas em ciência”	37
2.4.4	Interrelações entre tecnologias e trajetórias	38
2.5	Quadro analítico	40
3	A TRAJETÓRIA DO ETANOL – LINHA DO TEMPO	43
3.1	A transição do carvão para o petróleo – 1920 a 1970	44
3.2	O etanol como combustível alternativo – 1970 a 2000.	46
3.3	A retomada do etanol – 2000 a 2006.	49
3.4	As biomassas lignocelulósicas e a produção do E2G – 2006 a 2008.	52
3.5	Os incentivos para produção do E2G – 2008 a 2012.	59
3.6	As plantas pioneiras do E2G – 2013 a 2016.	65
3.7	Os problemas operacionais nas biorrefinarias – 2016 a 2019	66
3.7.1	Os desafio operacionais e o fechamento de plantas do E2G	66
3.7.2	Dificuldades operacionais em outras biorrefinarias	68
3.8	Um novo fôlego para o E2G – a partir de 2020.	70
3.9	Considerações finais	71
4	METODOLOGIA	72
4.1	Pesquisas bibliográficas	73
4.2	Entrevistas e visitas	74
4.2.1	Perguntas e respostas – Tratamento e análise dos dados	79
4.3	Pesquisa de patentes	81
4.4	Análise e interpretação dos resultados	83
5	O CASO DAS PLANTAS PIONEIRAS DE PRODUÇÃO DO E2G	85

5.1	Descrição do caso	85
5.1.1	Resultado das entrevistas – Análise preliminar	86
5.1.2	Resumo descritivo	90
5.1.3	Contexto geral	93
5.2	Resultados e análises das entrevistas – Exploração do conteúdo	94
5.2.1	Tomada de decisão	94
5.2.2	Escolha da tecnologia	97
5.2.3	Riscos considerados x problemas ocorridos	102
5.2.4	Equipe técnica, projeto e trocas de experiência	107
5.2.5	Mercado	114
5.2.6	Resultados da pesquisas de patentes	115
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	120
6.1	Comentários gerais	120
6.2	Os Processos de inovação no caso do E2G – Quadro analítico	123
6.2.1	Resumo – Quadro analítico	127
6.3	Considerações e reflexões	127
6.3.1	Sobre as perguntas que nortearam a tese	128
6.3.2	Sobre os conceitos e fatores ligados aos processos de inovação	130
6.3.3	Sobre gestores de empresas e gestores de projetos	131
6.3.4	Sobre retorno dos investimentos	132
6.3.5	Sobre fornecedores de equipamentos e tecnologia	133
6.3.6	Sobre políticas públicas	133
6.3.7	Sobre a formação universitária de engenheiros de processo	134
7	CONCLUSÕES	136
8	REFERÊNCIAS	138
9	ANEXOS	149
9.1	ANEXO I – PESQUISA DE PATENTES	149
9.2	ANEXO II – ARTIGO / BIOMASS FEEDING IN CELLULOSIC ETHANOL PROJECTS: AN UNDERESTIMATED ISSUE	159

Agradecimentos

Meus agradecimentos a todos os amigos e colegas que, com sua gentileza, experiência, dedicação e competência me estimularam a entrar no mundo dos biocombustíveis e a todos os que viabilizaram e participaram das entrevistas, das visitas e demais trocas de informação que fundamentaram essa tese.

Meus agradecimentos também a meus orientadores, professora Flavia Chaves Alves e professor José Vitor Bomtempo, pelo conhecimento, paciência, dedicação e a enorme contribuição que deram a esse texto. Toda construção de meu conhecimento na área se deveu à sua orientação.

Agradeço também aos membros das bancas de qualificação e de defesa por suas importantes contribuições e orientações.

Por fim, agradeço a meus filhos pelo estímulo de sempre.

Listas de Figuras e Quadros

Lista de Figuras

Figura 1 Modelo de dinâmica da inovação	22
Figura 2 Primeira geração dos processos de inovação: Impulsionado pela tecnologia	28
Figura 3 Segunda geração dos processos de inovação: Puxado pelo mercado	29
Figura 4 Modelo encadeado (<i>chain-linked</i>) dos processos de inovação	30
Figura 6 Transição energética - Participação das fontes de energia primária.	43
Figura 7 Etanol de segunda geração – Linha do tempo	44
Figura 8 Evolução dos preços internacionais do barril de petróleo	49
Figura 9 Produção de etanol nos EUA (em bilhões de litros)	51
Figura 10 Produção de etanol no Brasil (em bilhões de litros)	51
Figura 11 Comparação dos fluxos esquemáticos de produção para E1G e E2G	54
Figura 12 Esquema de produção de E2G a partir da palha de cana	67
Figura 13 Esquema de produção de E2G a partir da palha de cana – Pré-tratamento	105
Figura 14 Domínio tecnológico das 171 patentes	116

Lista de Quadros

Quadro 1 Quadro analítico – Processos de inovação	41
Quadro 11 Níveis de maturidade tecnológica – TRL (EMBRAPA)	63
Quadro 2 Principais fornecedores das plantas de etanol celulósico	66
Quadro 3 Questionário de referência usado nas entrevistas	74
Quadro 4 Participantes das entrevistas por perfil de empresa	76
Quadro 5 Entrevistas – perguntas e respostas (Modelo)	80
Quadro 6 Entrevistas – perguntas e respostas (Modelo2)	81
Quadro 7 Compilação das respostas obtidas nas entrevistas	87
Quadro 8 Respostas das entrevistas – Tomada de decisão	94
Quadro 9 Respostas das entrevistas – Caracterização de planta industrial	97
Quadro 10 Respostas das entrevistas – Escolha da tecnologia	98
Quadro 12 Respostas das entrevistas – Maturidade tecnológica	99
Quadro 13 Respostas das entrevistas – Riscos considerados x problemas reais	102
Quadro 14 Respostas das entrevistas – Equipe técnica	107
Quadro 15 Respostas das entrevistas – Desenvolvimento do projeto	110
Quadro 16 Respostas das entrevistas – Troca de experiências	112
Quadro 17 Respostas das entrevistas – O papel das empresas	114
Quadro 18 Respostas das entrevistas – Permanência no setor	114
Quadro 19 Quadro analítico – Processos de inovação do E2G	123

1 INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis já foram, por milhares de anos, as principais fontes de geração de energia. Resíduos agrícolas eram as fontes de energia utilizadas para aquecer ambientes, preparar alimentos e, também, nas indústrias, como na produção de vidro e cerâmica, por exemplo. Apenas há poucos séculos formas fósseis de energia, começaram a ser utilizadas (NOGUEIRA et al, 2021). Durante a primeira revolução industrial, o carvão mineral passou a ser a principal fonte de energia sendo ultrapassado pelo petróleo quase cem anos depois, com a criação da indústria petroquímica (SPITZ, 1988).

Desde 1920, o petróleo foi se consolidando como a principal fonte mundial de geração de energia, além de produzir derivados que estruturaram a economia do século XX: desde combustíveis para o setor de transportes e para a geração de energia, até a fabricação de produtos químicos e plásticos que passaram a ser fundamentais para a economia e o para desenvolvimento tecnológico que se seguiria (BENNETT; PEARSON, 2009). Essa posição de liderança do petróleo se manteve incontestável por 50 anos até sofrer seu primeiro abalo com o embargo comandado pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP, que provocou aumentos nos preços do barril e gerou uma crise global despertando o interesse pela busca de fontes alternativas para geração de energia. Essa crise foi sucedida por outras, nos anos que se seguiram, resultando em grandes flutuações no preço do óleo e especulações sobre sua escassez que continuaram a estimular a busca por fontes alternativas de combustível. Um século depois, o mundo caminha para uma nova mudança em sua base energética. (CALDERON; ARANTES, 2019; PHILP, 2018; VISWANATHAN, 2015 e CALISE, 2019).

Mesmo a partir de 2008, com a reversão na tendência de crescimento dos preços do petróleo, que diminuiriam as especulações sobre sua escassez, as demandas pela substituição de combustíveis fósseis por fontes limpas e renováveis continuaram estimuladas por pressões sociais e regulatórias para a diminuição da carga de emissão de carbono na atmosfera. Entre as diversas fontes renováveis que mais se destacaram no desenvolvimento de pesquisas a partir do início dos anos 2000, está a biomassa, que vem sendo colocada no papel de um importante competidor com os derivados de petróleo para a produção de combustíveis automotores (CHERUBINI, 2010 e CALDERON; ARANTES, 2019).

As pesquisas para o desenvolvimento de inovações com uso de biomassa para a produção de biocombustíveis iniciadas com as primeiras crises do petróleo, ganharam um novo impulso a partir de 2006 através do *Renewable Fuel Standard* (RFS), lançado pelos Estados Unidos em 2005 e do *European Emissions Trading System* (ETS), também lançado em 2005. O RFS foi lançado visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa e para expandir a produção de combustíveis renováveis, reduzindo a dependência dos Estados Unidos do petróleo importado, enquanto o ETS teve o objetivo de incentivar o desenvolvimento de tecnologias para substituir os combustíveis fósseis na Europa (ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016).

Por ser o biocombustível mais utilizado no mundo, o bioetanol foi o candidato natural a ser o principal concorrente dos combustíveis automotores derivados de petróleo. Além disso, o bioetanol é uma fonte de energia renovável que tem um importante papel a desempenhar na promoção da sustentabilidade econômica e ambiental nos países em desenvolvimento. A economia do etanol tem o potencial de aliviar a pobreza rural, aumentar a produtividade agrícola e impulsionar o crescimento econômico, além de gerar empregos, promover a igualdade e provocar reduções significativas na emissão de gases de efeito estufa. Como um combustível de queima limpa, o etanol pode substituir os combustíveis fósseis no todo ou em parte para uso tanto em veículos quanto no uso doméstico (UNIDO, 2022).

O bioetanol vinha sendo fabricado, principalmente, a partir de matérias-primas à base de açúcar e amido (principalmente cana-de-açúcar e milho), com um volume de produção ainda incapaz de atender as necessidades globais de combustíveis. Como o aumento de produção de etanol a partir dessas mesmas matérias-primas sofria forte resistência, principalmente na Europa, em função de seu potencial conflito com a produção de alimentos, a introdução de novas fontes para produção de bioetanol se tornou vital para o sucesso do seu crescimento como substituto do petróleo. Uma das alternativas foi desenvolver inovações para viabilizar a produção de bioetanol também a partir de biomassas lignocelulósicas residuais que, além de não competir com a produção de alimentos, eram consideradas como abundantes e de baixo custo (CHERUBINI, 2010; NYKO et al, 2010; GUSTAFSSON, 2015; SOCCOL et al., 2016 e CALDERON; ARANTES, 2019). O etanol produzido a partir de açúcar e amido foi denominado de etanol de primeira geração (E1G) enquanto o gerado a partir de biomassa lignocelulósica, foi chamado de etanol celulósico ou etanol de segunda geração (E2G).

Pesquisas que procuravam desenvolver tecnologias viáveis para a produção do E2G a partir de biomassas lignocelulósicas residuais já vinham sendo desenvolvidas desde os anos 1970 e esbarravam não apenas em aspectos técnicos, mas também em aspectos econômicos, já que além de viável tecnicamente, era necessário que sua produção fosse economicamente competitiva com os combustíveis derivados do petróleo. No início dos anos 2000, a combinação entre os altos preços do petróleo, o lançamento de políticas públicas de estímulo aos combustíveis renováveis e as pressões sociais pela redução da poluição atmosférica deu o impulso necessário para o crescimento das pesquisas que iriam estimular o desenvolvimento das inovações tecnológicas. Pesquisas que, mais tarde, viabilizariam a construção de plantas industriais de produção de E2G e tornariam o etanol produzido a partir da biomassa, um concorrente efetivo aos derivados de petróleo como combustível automotor (ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016; CALDERON; ARANTES, 2019).

Diversas empresas estabelecidas em diferentes setores industriais participaram dos desenvolvimentos tecnológicos que culminaram na construção de seis plantas industriais, que podem ser consideradas pioneiras na produção de E2G, entre 2010 e 2016: desde gigantes petrolíferas (Shell, Petrobras e BP) até grandes empresas do setor químico & petroquímico (DuPont, Clariant e M&G) passando por uma grande distribuidora de energia (Abengoa) e produtoras globais de insumos (Novozymes e DSM) e equipamentos (Metso e Dedini) além de alguns produtores de E1G como a americana POET, e a brasileira COSAN, e de novas empresas criadas para participar das iniciativas de produção do E2G, como a GranBio, entre outros (OLIVEIRA FILHO, 2017 e CALDERON; ARANTES, 2019). Algumas delas construíram plantas industriais, outras participaram do movimento com fornecimento de equipamentos e insumos. E outras, ainda, participaram das etapas iniciais e intermediárias de desenvolvimento do E2G, mas não investiram em plantas de escala comercial por motivos diversos.

A primeira planta foi construída em 2013, na Itália pela M&G, seguida por duas outras no Brasil (GranBio e Raízen) e três nos Estados Unidos (Abengoa, DuPont e POET-DSM). A planta da M&G anunciou que operaria com diversos tipos de biomassas agroflorestrais residuais; as duas plantas do Brasil iniciaram operação com resíduos de cana de açúcar: GranBio com palha e Raízen, uma *joint venture* formada entre COSAN e Shell, com bagaço. As três plantas dos Estados Unidos operaram com palha e outros resíduos de milho – *corn stover* (CALDERON; ARANTES, 2019).

O recente boom na construção de instalações de demonstração de etanol celulósico e a proximidade da entrada em operação de novas biorrefinarias comerciais em grande escala e em diferentes países mostra que os biocombustíveis de segunda geração se tornaram uma realidade. Em comparação com os lentos projetos de P&D sobre o etanol celulósico nas últimas três décadas do século 20, agora ele se tornou uma corrida. (GUSAKOV, 2013, p. 567, tradução nossa).

Uma nova indústria foi lançada: o navio de biocombustíveis celulósicos (finalmente) zarpou. (DALE, 2015, p. 1, tradução nossa).

Logo após a entrada em operação das plantas, dificuldades técnicas e operacionais impediram que elas conseguissem estabilizar sua produção. Poucos anos depois – em 2019, apenas duas das seis plantas instaladas ainda estavam em operação (ambas no Brasil), mas com níveis de utilização bem abaixo de suas capacidades nominais de produção. As outras quatro já haviam anunciado o término de suas operações, por motivos diversos (ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016 e CALDERON; ARANTES, 2019).

O navio de biocombustíveis celulósicos pode ter zarpado, mas parece não ter deixado o porto. Não houve nenhuma nova planta de biocombustíveis celulósicos anunciada nos últimos anos e as primeiras plantas parecem estar passando por muitos problemas. Em resumo, a indústria não está crescendo como se esperava. (DALE, 2017, p. 5, tradução nossa)

Além das pioneiras do E2G, outras plantas industriais a partir de fontes renováveis foram construídas em escala comercial, em diferentes países, com diferentes tecnologias e operadas por diferentes empresas. E, assim como no caso do E2G, diversas dificuldades técnicas causaram atrasos nos cronogramas de implantação e ultrapassagem nos custos de capital, além de aumentos nas despesas operacionais, dificultando sua expansão para estágios subsequentes de desenvolvimento de tecnologia (DOE, 2016).

O crescimento contínuo do uso de materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a produção industrial, que teve início com o propósito de produção de biocombustíveis para transporte em substituição aos derivados de petróleo, vem se configurando de uma forma muito mais complexa, dando origem a diversas outras atividades inovadoras que visam, também, a produção de outros bioprodutos (BOMTEMPO; ALVES, 2014). É um contexto que surge com diversas atividades econômicas baseadas em recursos renováveis, capazes de atender as demandas sociais de redução da poluição ambiental e de redução nas emissões de carbono, em harmonia com os requisitos de sustentabilidade. A introdução das matérias-primas renováveis na base industrial se configura como uma grande transformação que pode mudar a estrutura da economia, que ainda tem o petróleo e o carvão como as principais fontes de riqueza, para

uma nova economia – a bioeconomia – que terá recursos renováveis como sua principal base de produção (BOMTEMPO; ALVES, 2014).

Segundo o conceito apresentado no *Global Economy Summit* de 2020, promovido pelo *International Advisory Council on Global Bioeconomy*:

A bioeconomia pode ser definida como a produção, utilização e conservação de recursos biológicos, incluindo conhecimento, ciência, tecnologia e inovação, para fornecer soluções sustentáveis (informações, produtos, processos e serviços) em todos os setores econômicos de modo a viabilizar a transformação para uma economia sustentável (IACGB, 2020, p. 9, tradução nossa).

Dentro desse universo, onde se desenvolve uma ampla gama de tecnologias capazes de converter biomassa em diferentes produtos de valor agregado, como biocombustíveis e produtos químicos, surge também o conceito de biorrefinaria cujo termo carrega uma analogia às refinarias de petróleo, que produzem vários combustíveis e produtos a partir de uma mesma base, o óleo. No caso das biorrefinarias, essa base é a biomassa.

Sob essa ótica, várias unidades de produção baseadas em matérias-primas renováveis poderiam combinar seus fluxos de materiais a fim de alcançar uma utilização completa de todos os componentes da biomassa, com o resíduo de uma unidade tornando-se insumo para outra (CHERUBINI, 2010) e sustentando o conceito de biorrefinarias integradas. Os desdobramentos do uso industrial de biomassa abrem espaço para novos desenvolvimentos, visto que as biorrefinarias, atuando de forma integrada, podem ampliar suas economias de escopo. Além da produção de combustíveis e de geração de energia elétrica, essas biorrefinarias também podem atuar na produção de outros compostos químicos viabilizando, de forma ampla, a substituição dos hidrocarbonetos de origem fóssil como base da economia (OLIVEIRA FILHO, 2017). Várias iniciativas

Diferentemente da economia baseada em recursos fósseis, a bioeconomia deverá ser caracterizada por produções descentralizadas, estabelecendo e consolidando novas cadeias produtivas. O regionalismo da bioeconomia tende a ser um atrativo de desenvolvimentos econômicos adicionais, já que possibilita a difusão de biorrefinarias e, conseqüentemente, gera investimentos, empregos, conhecimentos e renda de forma descentralizada. A bioeconomia tem o potencial de romper com regimes estabelecidos, exigindo um conjunto de inovações que solucionem os desafios da criação de uma oferta sustentável de biomassa, de desenvolvimento de novos processos produtivos que sejam capazes de competir com os processos fósseis e do desenvolvimento de bioprodutos que

agreguem mais valor à biomassa. A construção da bioeconomia representa uma quebra de paradigma que requer grande esforço de inovação dos agentes e de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento tecnológico e que valorizem os benefícios que podem ser gerados pelo uso cada vez maior de fontes renováveis (ABBI, 2022).

A partir desse contexto, e da premissa que o crescimento do uso de biomassa em escala industrial é fundamental para o futuro de uma economia sustentável, esse trabalho se desenvolve em torno das seguintes perguntas:

- Quais desafios enfrentados na implantação de biorrefinarias pioneiras se transformaram em obstáculos que impediram suas operações dentro das condições de projeto? Houve semelhanças entre os principais obstáculos, mesmo frente a diversidade de empresas, biomassas e tecnologias envolvidas nessas biorrefinarias?
- Quais experiências dessas biorrefinarias podem ser levadas em conta para que se obtenha sucesso nos projetos e operação de outras plantas pioneiras (*first-of-a-kind*) nesse ambiente onde a biomassa é a principal fonte de produção?

Como, entre as primeiras biorrefinarias, estão as plantas pioneiras de produção do E2G que, também, enfrentaram obstáculos que inviabilizaram sua produção nas condições de projeto, esse trabalho estuda o Caso das Plantas de Produção do Etanol de Segunda Geração (E2G) para auxiliar na compreensão dos desafios tecnológicos que já foram vencidos e dos que ainda precisam ser enfrentados. Devido a sua alta representatividade e relevância, os aprendizados extraídos do caso poderão ser úteis aos próximos desenvolvimentos de biorrefinarias, que, por sua vez, serão fundamentais para o crescimento e a consolidação da bioeconomia.

O **objetivo geral** dessa tese é, a partir da análise dos desafios enfrentados pelas plantas pioneiras do E2G e suas relações com os processos de inovação, propor reflexões e considerações que auxiliem na compreensão desses desafios e de seus desdobramentos para projetos e construção de outras plantas pioneiras (*first-of-a-kind*).

Para alcançar esse objetivo geral e conduzir o trabalho em torno das questões principais da pesquisa, esse trabalho percorre os seguintes **objetivos específicos** através dos diferentes capítulos da tese:

- Discutir as dinâmicas dos processos de inovação, seus modelos e padrões assim como o papel e a importância de cada um dos atores envolvidos nesses processos;

- Analisar o caso das plantas pioneiras de E2G, incluindo as etapas de implementação das unidades industriais e os principais desafios enfrentados que acabaram por prejudicar sua produtividade, buscando identificar os que já eram os esperados e os que não foram antecipados. A separação dos problemas esperados dos inesperados, busca analisar os processos de inovação vivenciados pelas pioneiras e como esses processos foram capazes de enfrentar os desafios que surgiram na fase de projeto e operação das plantas;
- Discutir os modelos e padrões dos processos de inovação vividos pelas empresas pioneiras do E2G, suas abordagens frente aos desafios encontrados e, como suas experiências podem contribuir para o sucesso operacional de outras plantas industriais pioneiras (*first-of-a-kind*), alimentadas por diferentes tipos de biomassas lignocelulósicas;
- Relacionar ensinamentos e lições que podem ser extraídas do caso das plantas pioneiras do E2G e que podem ser úteis para projeto e operação de outras biorrefinarias e, conseqüentemente, para as próximas etapas de desenvolvimento da bioeconomia.

Para atender aos objetivos e debater as questões da tese, a pesquisa realizou entrevistas com profissionais que participaram dos projetos de construção das plantas pioneiras do E2G, buscando informações, desde as etapas de tomada de decisão para construção de plantas industriais até os problemas operacionais enfrentados pelas plantas construídas. Os resultados das entrevistas foram discutidos à luz de pesquisas bibliográficas sobre processos de inovação e sobre o desenvolvimento dos processos de produção de biocombustíveis lignocelulósicos.

Esta tese está organizada em 7 capítulos incluindo essa introdução. O capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico sobre processos de inovação, discutindo seus modelos e padrões, assim como os papéis dos diversos atores envolvidos nesses processos. Ao final, apresenta um quadro analítico que dará apoio na estruturação da análise dos resultados do estudo de caso.

O capítulo 3 faz uma Revisão Bibliográfica sobre as mudanças de fontes utilizadas na produção de combustíveis – do carvão a biomassa, desenhando a linha do tempo transcorrida desde 1920 até os dias atuais, visando compreender o contexto sobre o qual o Caso das Plantas Pioneiras do E2G, foi construído. Aborda brevemente a substituição do carvão pelo petróleo como principal fonte de geração de energia, e passa pelas diversas

crises do petróleo que revitalizaram os debates sobre o uso de fontes renováveis. Por fim, destaca os impulsos dados pelos incentivos governamentais para o desenvolvimento tecnológico do uso dessas fontes, até os dias atuais, passando pela construção e operação das plantas pioneiras do E2G.

O capítulo 4 descreve a Metodologia utilizada para a realização das entrevistas e para o tratamento dos dados obtidos, assim como a metodologia utilizada em uma pesquisa quantitativa sobre patentes, que foi necessária para complementar informações obtidas nas entrevistas e na revisão bibliográfica.

O capítulo 5 apresenta o Estudo de Caso das Plantas Pioneiras de Produção do E2G, composto pelas entrevistas realizadas com os profissionais envolvidos nesses projetos e o capítulo 6 analisa os resultados das entrevistas e da pesquisa de patentes à luz dos conceitos abordados no Referencial Teórico tendo como pano de fundo o histórico traçado pela linha do tempo descrita no capítulo 3.

O capítulo 7 encerra esse trabalho com reflexões sobre os resultados da pesquisa e as conclusões da tese, além de sugestões para o aprofundamento das discussões sobre o uso de biomassas lignocelulósicas como matéria-prima em escala industrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O Referencial Teórico foi composto a partir de textos clássicos dos principais autores que iniciaram e desenvolveram abordagens sobre a dinâmica dos processos de inovação, como: Mowery e Rosenberg (1978), Pavitt (1984 e 2003), Kline e Rosenberg (1986), Utterback (1987 e 1994), von Hippel (1988) e Rosenberg (1994), adicionando outros textos e autores sempre que necessário para a discussão dos conceitos. Os livros *Oxford Handbook of Innovation* (FAGERBERG, 2009) e *Managing Innovation* (TIDD; BESSANT; PAVITT, 20) também foram utilizados já que fazem uma revisão abrangente da economia e da gestão da inovação, em uma perspectiva coerente com uma visão atual da dinâmica da inovação.

O capítulo está estruturado em torno de temas que possam analisar processos de inovação experimentados por empresas industriais já estabelecidas, que se lançam em projetos tecnológicos pioneiros, e os impactos que os modelos e padrões que elas trazem consigo têm sobre os resultados desses projetos.

Dessa forma, o capítulo se inicia revisitando conceitos fundamentais sobre os processos de inovação, suas diferentes naturezas e graus de novidade, assim como as diferentes dimensões de análise. A segunda seção trata dos modelos de inovação, em suas diferentes gerações: desde os modelos lineares de “impulsionados pela tecnologia” (*technology-push*) e “puxados pelo mercado” (*market-pull*) até os mais complexos e interativos. A terceira seção trata das empresas inovadoras, suas características e sobre a forma como elas definem suas estratégias e encaram transformações tecnológicas para acessar mercado e gerar produtos de mais qualidade e menor custo. A quarta trata dos padrões setoriais de inovação, sua dependência da trajetória tecnológica das empresas, suas diferentes fontes de inovação, seus relacionamentos com fornecedores e a forma que as empresas desses setores desenvolvem os processos de inovação. A quinta seção conclui o capítulo e apresenta um quadro analítico que identifica as dimensões de análise que serão exploradas na discussão dos resultados do estudo de caso a ser apresentado.

2.1 Processos de inovação

A inovação não pode ser vista como um evento objetivo e pontual que acontece em um determinado momento ou local. Deve ser entendida como um processo que compreende uma série de mudanças que ocorrem ao longo do tempo em um sistema complexo envolvendo ambientes do mercado, unidades de produção, conhecimento e

contextos sociais das organizações (KLINE; ROSENBERG, 1986). Inovações podem ocorrer em qualquer setor da economia e da sociedade, incluindo serviços públicos como saúde ou educação, ou mesmo no âmbito social. A inovação pode envolver a abertura de novos mercados, a conquista de novas fontes de abastecimento ou a reorganização de uma indústria. No âmbito das empresas, pode haver inovações em seus métodos de trabalho, nos processos de produção, em produtos ou em seus modelos de negócios (MANUAL DE OSLO, 2004). Como o objetivo desta tese é analisar os impactos dos modelos e padrões setoriais sobre processos de inovação que tratem da projetos de plantas pioneiras, esse trabalho se dedica a tratar apenas das inovações de cunho tecnológico.

Esses processos de inovação tecnológica combinam a exploração de oportunidades geradas por uma nova demanda do mercado com o surgimento de tecnologias que possibilitem a fabricação de um novo produto ou com a introdução de novos processos para a fabricação de um produto já existente. De um lado, fatores como mudanças nos preços ou em condições sociais se combinam gerando oportunidades comerciais. De outro, novos desenvolvimentos tecnológicos e científicos apresentam novas possibilidades para criação de novos produtos ou processos. É a combinação dessas duas forças que possibilita o desenvolvimento das inovações (PAVITT, 2003).

A interação entre tecnologia, mercado e empresas é muito mais complexa e dinâmica do que um processo linear, de forma que as condições necessárias para diferentes tipos de inovação serão também diferentes. As condições necessárias ao desenvolvimento de uma inovação de produto, por exemplo, serão bastante diferentes daquelas exigidas para inovações de processos que visem obter altos níveis de produção e produtividade. Sob demanda por produtos inovadores, a estrutura organizacional das empresas precisa ser flexível, enquanto sob demanda por altos níveis de produção e produtividade, a estrutura organizacional tende a ser padronizada e mais rígida. Dessa forma, os esforços de inovação de uma empresa irão variar de acordo com o tipo de inovação, com seu ambiente competitivo e sua estratégia de crescimento (UTTERBACK, 1987).

Nas décadas de 1930-1940, Joseph Schumpeter, muitas vezes considerado como o “pai” dos conceitos sobre inovação, classificava as inovações de acordo com cinco tipos: novos produtos, novos métodos de produção, novas fontes de abastecimento, exploração de novos mercados e novas formas de organizar negócios (FAGERBERG, 2009). Uma outra abordagem, análoga, tipifica a inovação em quatro categorias: inovação

de produto, inovação de processo, inovação de aplicação – que trata das mudanças nas formas de como o produto ou o serviço é introduzido no mercado e a inovação nos paradigmas – que trata da mudança nos modelos mentais que servem de estrutura para as organizações (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Em qualquer das classificações, a distinção entre inovação de produto (tecnologia de produto) e inovação de processo (tecnologia de produção / métodos de produção) é crítica para a compreensão do fenômeno da inovação (SCHMOOKLER, 1966 apud FAGERBERG, 2009). O primeiro trata do conhecimento sobre como criar produtos novos e o segundo do conhecimento sobre como produzi-los melhor. No primeiro caso, o impacto recai diretamente sobre o mercado com o lançamento de novos produtos ou serviços, enquanto no segundo o impacto está, principalmente, na redução dos custos de produção e no aumento da produtividade (FAGERBERG, 2009).

Citando Freeman e Soete (1997), Fagerberg (2009), sugere outra abordagem, baseada no trabalho de Schumpeter, que classifica as inovações de acordo com o quão radical elas são em comparação com a tecnologia existente. Nesta abordagem, as melhorias contínuas são caracterizadas como inovações “incrementais” ou “marginais”, em oposição a inovações “radicais” ou “revoluções tecnológicas” (constituídas por um aglomerado de inovações que juntas podem ter um impacto de longo alcance).

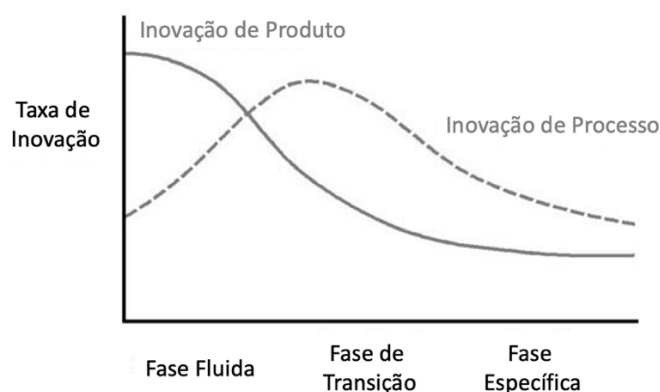
As inovações radicais têm natureza diferente das incrementais, mas ambas são fortemente interligadas, pois inovações radicais geralmente passam por mudanças incrementais, após sua primeira introdução, que podem transformar totalmente sua importância econômica (KLINE; ROSENBERG, 1986). Diversos estudos no campo das plantas químicas, da produção de papel e da montagem de automóveis, para citar apenas alguns exemplos, sugerem que os ganhos cumulativos em eficiência das inovações incrementais, geralmente, são muito maiores ao longo do tempo do que os ganhos obtidos pelas mudanças radicais, originalmente lançadas (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Assim sendo, a efetiva realização dos benefícios econômicos das inovações radicais, na maioria dos casos, vai requerer uma série de inovações incrementais (FAGERBERG, 2009).

A dinâmica envolvendo inovações radicais e incrementais de produto e processo pode ser vista através do modelo desenvolvido por Abernathy e Utterback (1978) e apresentado no Gráfico 1, que segue um padrão sequencial de mudanças entre inovação

de produto, inovação de processo e de estrutura organizacional ao longo do tempo, que é característico de um determinado produto.

Nesse modelo (ver Figura 1), a primeira fase – denominada pelo autor de fase fluida, se caracteriza por um grande volume de mudanças simultâneas em produtos, com resultados ainda incertos, e pouco foco na inovação de processos ou estrutura organizacional. Na fase fluida, a taxa de mudanças de produto geralmente é muito alta, com tecnologias ainda rudimentares, caras e de baixa confiabilidade, enquanto as inovações de processo geralmente assumem um papel secundário. Quando o mercado começa a crescer em aceitação ao novo produto, o setor entra em uma fase transitória quando as inovações de produto e processo começam a ter um vínculo mais estreito. Além da entrada de materiais e equipamentos mais caros e especializados, observa-se também um aumento na ênfase dos controles administrativos e o início da padronização das operações. A última fase, chamada de fase específica, tem esse nome, pois se caracteriza pela fabricação de um produto muito “específico” com alto grau de eficiência e, quando a relação qualidade-custo se torna a base da concorrência. Na fase específica, os vínculos entre produto e processo são muito estreitos e qualquer modificação, tanto no produto como no processo, provavelmente será difícil e cara.

Figura 1 Modelo de dinâmica da inovação



Fonte: Utterback, 1994.

A fase fluida se caracteriza por muita incerteza sobre o sucesso da inovação. Nela, os concorrentes geralmente são pequenas novas empresas ou, algumas empresas já existentes que viram uma janela de oportunidade em novo mercado no qual pode ser possível utilizar suas capacitações tecnológicas. Apesar de muitas vezes grosseira, cara e não confiável, a nova tecnologia preencherá alguma demanda de algum nicho de mercado

com preços e margens de lucro unitárias altas, já que o produto deverá ter um grande valor de aplicação nesse mercado. A fase fluida, normalmente, é baseada no uso de mão-de-obra altamente qualificada e de maquinário e equipamentos de uso genérico (UTTERBACK, 1987). À medida que fabricantes e usuários do produto ganham experiência, a incerteza diminui e a inovação entra em um estado de transição, com a queda da taxa de inovação em produto e aumento da taxa de inovação em processo. Nessa fase de transição, a utilidade do produto é cada vez mais bem compreendida e pode sofrer diferentes adaptações para atender a novos nichos ou novos mercados (UTTERBACK, 1987). Na fase transitória, melhorias e inovações incrementais nos processos produtivos podem incorporar novos atributos ao produto para expandir sua aplicação e melhorar seu desempenho e sua rentabilidade, culminando na criação de um projeto dominante que irá dominar o mercado. No caso da indústria de processos, as mudanças tecnológicas nos métodos de produção irão culminar no desenvolvimento de uma tecnologia capacitadora que irá direcionar seus aperfeiçoamentos incrementais ao longo do tempo (UTTERBACK, 1994). A fase específica vai surgir quando os efeitos da padronização de produtos e processos já estiverem se difundido e afetado a estrutura do setor. Nessa fase, o setor já passa a contar com menos empresas operando em maiores escalas, que mudam seu enfoque de produto inovador para a produção em massa e produtos padronizados (UTTERBACK, 1987). É uma fase que pode ser caracterizada pela mudança nas formas de controle das empresas e por estruturas organizacionais mais rígidas, quando aperfeiçoamentos contínuos e incrementais passam a caracterizar seu dia a dia. A fase específica também se caracteriza pelo uso de mão-de-obra menos especializada e o uso de maquinário e equipamentos altamente sofisticados e exclusivos.

Uma outra forma de visualizar a dinâmica da inovação é apresentada por Pavitt (2003), na qual os processos de inovação são vistos sob a ótica do conhecimento e não sob a ótica do padrão sequencial de desenvolvimento de produto e processo, como proposto por Utterback (1987). Na visão proposta por Pavitt (2003), os processos de inovação ocorrem através de três subprocessos que se sobrepõem: a produção de conhecimento; a transformação do conhecimento em produtos e serviços e a contínua adequação dos produtos ou serviços às necessidades e demandas do mercado.

Um aspecto fundamental nessa visão é que o passo inicial para a inovação não está na pesquisa pura e simples e sim no desenho de seu projeto. É a partir do esboço do projeto da inovação que se inicia a etapa de pesquisa, através da busca no acervo de

conhecimento científico existente (PAVITT, 2003). Na falta de parte de conhecimento necessário, é preciso pesquisar até desenvolver novas bases que venham a suprir a composição necessária para o desenvolvimento da inovação (FAGERBERG, 2009). A evolução do processo de produção do conhecimento segue com a combinação do conhecimento existente – seja em forma explícita ou tácita, com o novo conhecimento obtido durante o desenvolvimento da tecnologia ou da inovação. Uma importante dificuldade no fluxo do conhecimento durante o desenvolvimento da inovação é que esse fluxo tende a refletir a natureza da inovação (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Se está no nível do componente – ou de parte do processo produtivo – os técnicos envolvidos nesse desenvolvimento são os especialistas nessa etapa e a troca de conhecimento entre eles flui adequadamente até a formação da nova base de conhecimento. Entretanto, quando o desenvolvimento demanda troca de conhecimento em diferentes níveis do sistema organizacional ou mesmo entre diferentes etapas do processo produtivo do sistema inovador, nem sempre os canais de troca de conhecimento são apropriados e a organização precisa estar atenta para desenvolver novos canais, de forma que o conhecimento possa fluir adequadamente.

Essa busca pela combinação de diferentes tipos de conhecimento leva a um alto nível de incerteza, já que não se pode antecipar onde se vai chegar e quanto tempo essa busca deverá durar (FAGERBERG, 2009). O grau de incerteza no processo de inovação dependerá da base científica e do conhecimento tecnológico existentes. Quando essa base de conhecimento consegue sustentar o desenvolvimento da inovação através de previsões mais precisas, as inovações podem ser mais rápidas e confiáveis. Quando falta a sustentação do conhecimento básico, pode ser necessário recorrer a processos empíricos que tornarão o desenvolvimento mais lento e incerto (PAVITT, 2003). Apesar disso, muitas vezes, cientistas e engenheiros são excessivamente otimistas quanto aos prazos, custos e benefícios de seus projetos (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005), e tendem iniciar o processo de transformação de conhecimento em produtos mesmo com um grau de incerteza ainda muito alto.

A transformação do conhecimento em produtos geralmente se inicia antes da conclusão das etapas de produção do conhecimento, mas precisa de uma coordenação que integre a geração do conhecimento com a aprendizagem das condições de incerteza (PAVITT, 2003). Essa combinação produz um campo fértil para a inovação, mas também caracteriza ambientes de incerteza e de mudanças que podem fluir de formas diferentes a

dependem das características das estruturas organizacionais e das dinâmicas da empresa inovadora (PAVITT, 2003; TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005; FAGERBERG, 2009).

Grande parte dos processos de inovação se desenvolve dentro de ambientes e condições de contorno conhecidas pelos desenvolvedores. Nessas condições, eles trabalham para fazer o que já sabem e fazê-lo melhor: seja no desenvolvimento de novos produtos, processos, ou acesso ao mercado. Entretanto, algumas vezes essas condições de contorno (tecnologias, mercado e regulamentações) sofrem mudanças que alteram as bases sobre as quais as inovações estão sendo desenvolvidas. São descontinuidades que exigirão dos inovadores um redesenho de suas estratégias e estruturas para dar conta da nova realidade. Da mesma forma que essas novas condições podem perturbar o processo de inovação, elas podem abrir novas oportunidades, desde que haja flexibilidade dos atores envolvidos no processo (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Essas perturbações, entretanto, não são facilmente absorvidas por todas as empresas envolvidas em processos de inovação. Algumas empresas que conseguem construir fortes capacitações em torno de suas trajetórias têm dificuldades de se movimentar em novas direções e, por vezes, decidem interromper o processo inovador, retornando a suas trajetórias originais. Em outros casos, as empresas decidem pela mudança de direção, na perseguição da inovação, mas o fazem de forma lenta e terminam por não ter sucesso no projeto inovador e acabam por responsabilizar a qualidade da inovação por seu insucesso ao invés de sua lentidão (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Para as organizações baseadas em tecnologia o caminho da inovação passa por conseguir desafiar as competências atuais enquanto elas estão funcionando, já que o ambiente de rápidas mudanças onde elas funcionam torna crítico que suas competências tradicionais sejam conscientemente questionadas. Esse movimento cria uma espécie de paradoxo gerencial que pode ser uma poderosa alavanca para a mudança se adequadamente administrado (LEONARD-BARTON, 1992)

São movimentos e ambientes de grandes incertezas, quando muitas decisões relacionadas aos processos de inovação passam a fazer parte de processos políticos de tomada de decisão, envolvendo grupos de interesse, dentro e fora das organizações, e não são apenas baseadas em estimativas equilibradas e avaliações de risco padronizadas (PAVITT, 2003).

No nível das empresas, novos produtos, sejam eles fruto de novas tecnologias ou de novas demandas do mercado, impactam diretamente suas linhas de produção com conseqüente impacto na estrutura das organizações e em sua produtividade. A falta de

visão integrada, envolvendo todos os fatores essenciais, pode fazer com que empresas invistam pesadamente apenas nas linhas de produção ou apenas na aplicação do produto no mercado, o que pode ser insuficiente para garantir a melhoria na produtividade empresarial na produção e entrega dos novos produtos (UTTERBACK, 1987).

Algumas empresas podem ser muito eficazes no desenvolvimento de inovações radicais, que envolvem riscos elevados enquanto outras podem ser mais eficazes nas mudanças incrementais que reduzem custos e trazem melhor adequação do produto ao mercado. Grandes corporações, por exemplo, que têm estruturas rígidas e processos organizacionais bem estabelecidos, podem ter dificuldade em lidar com o radicalmente novo: por sua natureza cada vez mais especializada e profissionalizada no conhecimento em que se baseiam, essas empresas são “dependentes de sua trajetória” e procuram o futuro condicionadas pelo que aprenderam a fazer no passado (PAVITT, 2003). Essa aparente dicotomia entre se organizar para inovações radicais ou para inovações incrementais, entretanto, pode ser ultrapassada por empresas capazes de implementar os dois tipos de inovação: são as chamadas empresas ambidestras (TUSHMAN; O'REILLY, 1996) que, para poderem buscar simultaneamente inovações incrementais e radicais, são capazes de hospedar múltiplas estruturas e diferentes processos além de culturas contraditórias dentro de uma mesma organização. São empresas que buscam estar preparadas para constantes mudanças nas condições de contorno.

Os processos de inovação também serão muito diferentes entre grandes e pequenas empresas. Inovações em grandes empresas envolvem um número maior de pessoas em funções mais especializadas, gerando respostas mais lentas, porém tecnicamente mais aprimoradas. Nas pequenas empresas, por outro lado, as decisões relacionadas ao aproveitamento de novas oportunidades, à alocação de recursos e à coordenação de atividades são mais prováveis de refletir as competências e o comportamento da alta gerência, ao invés de técnicos especializados (PAVITT, 2003). Nesse caso, gerando respostas mais rápidas e flexíveis, porém menos acuradas tecnicamente.

No nível dos mercados, novos produtos impactam na competição entre empresas, entre linhas de produção e em toda a cadeia de suprimentos, envolvendo fabricantes de equipamentos e fornecedores de materiais. Dentro da cadeia produtiva de um setor existe uma hierarquia de unidades produtivas na qual o produto de uma empresa é parte do processo de outra, afetando diretamente tanto sua própria produtividade quanto a

produtividade do setor, já que a produtividade dos elos finais da cadeia é fortemente afetada pela produtividade dos elos iniciais (UTTERBACK, 1987).

Em resumo, processos de inovação são complexos, incertos e muito difíceis de gerir. A tentativa de sua simplificação, restringindo sua compreensão a apenas alguns dos fatores que influenciam ou são influenciados pela inovação, como produto, processo ou mercado, deixando de lado outros como nível de conhecimento, grau de novidade ou nível de incerteza, pode levar a tomadas de decisão equivocadas (PAVITT, 2003). A inovação, para ser bem-sucedida, precisa equilibrar os requisitos do produto com seus processos de fabricação, assim como com as necessidades e as mudanças do mercado e do ambiente, além da capacidade das empresas em adequar suas estruturas para dar suporte a todas essas frentes com flexibilidade e eficácia (KLINE; ROSENBERG, 1986).

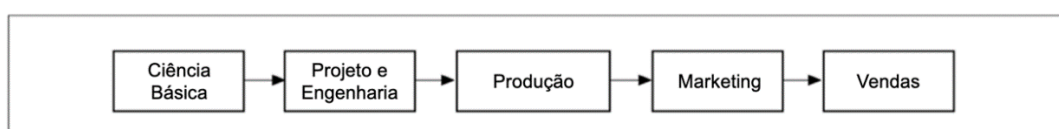
2.2 Modelos de inovação

Em função da grande complexidade e do alto grau de incerteza envolvidos em processos de inovação, uma forma útil e objetiva de encará-los é como um exercício de gerenciamento e redução de incertezas. E, para essa abordagem, o uso de modelos que ajudem na compreensão de quais fatores, padrões ou dimensões podem ser generalizados, pode ser de grande ajuda. Também é importante garantir que os modelos a serem utilizados sejam adequados para os casos em análise, pois o uso de modelos simplistas pode distorcer seriamente a forma de se enfrentar essas questões (KLINE; ROSENBERG, 1986).

Já nas primeiras décadas após a Segunda Grande Guerra, quando as grandes economias cresciam a altas taxas, em grande parte devido à rápida expansão industrial, foi possível observar um primeiro modelo dos processos de inovação. O surgimento de novas indústrias baseadas em novas oportunidades tecnológicas (semicondutores, produtos farmacêuticos, computação etc.) era acompanhado do desenvolvimento tecnológico de indústrias existentes como a têxtil e a siderurgia, assim como o aumento da produtividade da produção agrícola. Esses desenvolvimentos resultaram no aumento da criação de empregos associado a um boom de consumo que, muitas vezes, excediam a capacidade de produção instalada (KLINE; ROSENBERG, 1986; FAGERBERG, 2009; ROTHWELL, 1994). Durante esse período, a sociedade em geral era favorável ao avanço científico e à inovação industrial, vendo a ciência e a tecnologia como tendo potencial para resolver seus principais problemas (ROTHWELL, 1994). Essa visão se refletiu nas

políticas públicas de estímulo ao avanço científico em universidades e laboratórios governamentais e na oferta de mão de obra qualificada. Nas indústrias, a principal ênfase se deu nas atividades de P&D, na criação de novos produtos, e no desenvolvimento de sua produção para satisfazer a crescente demanda. Nessas condições, parece natural que essa primeira geração dos processos de inovação industrial tenha sido percebida como um modelo linear partindo da descoberta científica, através do desenvolvimento tecnológico nas empresas, para o mercado (Figura 2). Esse modelo de “impulsionado pela tecnologia” (*technology-push*), dava foco ao desenvolvimento de novos produtos e pouca atenção a seus próprios processos de produção ou mesmo ao papel do mercado (ROTHWELL, 1994).

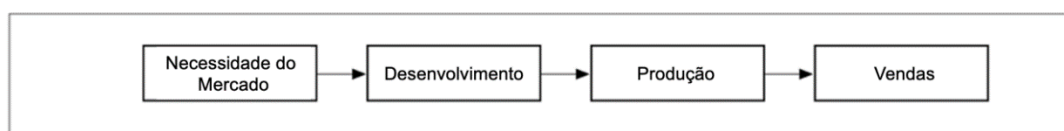
Figura 2 Primeira geração dos processos de inovação: Impulsionado pela tecnologia



Fonte: Rothwell, 1994.

Ao longo da década de 1960, os níveis gerais de prosperidade permaneciam altos nos países mais desenvolvidos. Apesar da produção industrial e do nível de emprego continuarem crescendo, a taxa de crescimento do emprego não acompanhava a taxa de crescimento da produção, pois essa também se dava pelo aumento da produtividade industrial. As empresas tinham foco em seu crescimento (orgânico ou adquirido) e na diversificação de produção. Houve aumento na concentração industrial enquanto novos produtos ainda continuavam sendo introduzidos no mercado com base em tecnologias existentes (ROTHWELL, 1994). Durante esse período, o maior volume de investimentos migrou dos novos produtos para as mudanças tecnológicas expansionistas e com foco na racionalização de custos. Esse movimento foi acompanhado por uma crescente ênfase em marketing, que passaria a ser o diferencial das empresas, para aumentar sua participação em um mercado altamente competitivo. As percepções dos processos de inovação começaram a mudar no sentido de um modelo de inovação “puxado pelo mercado” (*market-pull* ou *need-pull*) que atendesse as necessidades do mercado (Figura 3). Nessa segunda geração, o mercado é a fonte de ideias que direciona as atividades de P&D, as quais teriam um papel reativo no processo (ROTHWELL, 1994).

Figura 3 Segunda geração dos processos de inovação: Puxado pelo mercado



Fonte: Rothwell, 1994.

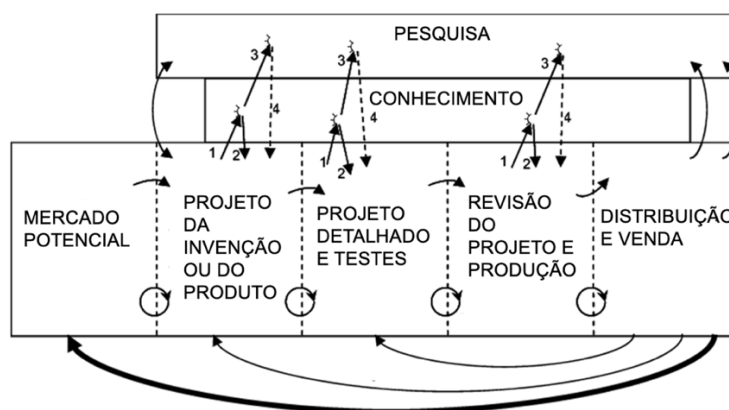
Esses dois modelos de inovação lineares e de fluxos aparentemente opostos, levantaram diversos debates e pesquisas sobre a determinação, o desencadeamento e os padrões de atividades inovadoras. De acordo com Schmookler (1966) apud Fagerberg (2009) os processos de inovação “puxados pelo mercado” teriam uma influência mais forte do que os processos “impulsionados pela tecnologia” nos padrões de atividade inovadora, tanto na indústria quanto ao longo do tempo. Segundo Nelson (1966), a pesquisa de Schmookler (1966) encontrou uma associação estatística mais forte entre o volume de atividade inovadora em bens de capital (medido por patentes) e o volume de atividade de investimento em indústrias consumidoras (mercado), do que entre o volume de atividade inovadora e de produção nas indústrias fornecedoras, apesar de não ter sido possível encontrar nenhum caso específico que tivesse comprovado essa teoria. Por outro lado, quando confrontado com o modelo “impulsionado pela tecnologia”, o modelo “puxado pelo mercado”, levantava argumentos sobre perigos inerentes a ele que poderiam levar as empresas a negligenciarem programas de P&D de longo prazo. Como consequência, as empresas poderiam ficar presas a um regime de inovações incrementais, com foco a adaptações de produtos para atender às mudanças nos requisitos dos usuários. Nesse caminho, as empresas ficariam expostas ao risco de perder a capacidade de se adaptar a mudanças radicais do mercado ou de novos desenvolvimentos tecnológicos (HAYES; ABERNATHY, 1980).

A década de 1970, com duas grandes crises do petróleo, foi um período marcado por altas taxas de inflação, com a capacidade de oferta, em geral, superando a demanda e um crescente desemprego estrutural. Nesse período de grande restrição de recursos foi necessário compreender qual seria a base da inovação bem-sucedida para se estruturar políticas de incentivo que reduzissem a incidência de falhas consideradas desnecessárias. Esse movimento permitiu que o “processo de inovação bem-sucedido” pudesse ser modelado com base em um portfólio de estudos abrangentes e sistemáticos cobrindo muitos setores e diversos países. Os resultados empíricos desses estudos indicaram que os modelos de inovação de “impulsionado pela tecnologia” e o “puxado pelo mercado”

eram exemplos extremos e atípicos de um processo mais amplo e integrado (PAVITT, 1984; MOWERY; ROSENBERG, 1978; ROTHWELL, 1994). Sob essa visão de complementaridade, argumentos a respeito da importância relativa de qualquer um dos dois modelos em relação ao outro parecem perder o sentido, pois cada necessidade do mercado quando entra no ciclo da inovação, leva a um novo projeto, assim como cada novo projeto leva a novas condições de mercado. Uma novidade tecnológica somente trará retorno se houver um mercado para ela, da mesma forma que uma necessidade percebida no mercado somente poderá ser preenchida se as questões técnicas envolvidas puderem ser solucionadas (KLINE; ROSENBERG, 1986). Essa combinação complementar das duas primeiras gerações de processos de inovação foi caracterizada por Rothwell (1994) como uma terceira geração dos processos de inovação.

Para Kline e Rosenberg (1986), o passo inicial para uma inovação não está na ciência ou nas pesquisas, mas no projeto de soluções que possam atender um mercado potencial. Esse projeto inicial pode conter tanto uma invenção quanto um estudo analítico com novas combinações de equipamentos ou novos arranjos de processos dentro do ‘estado da arte’ existente. A partir desse projeto inicial e com base na busca por conhecimentos científicos e tecnológicos a inovação se desenvolve. A Figura 4. mostra, de forma esquemática, os elementos do modelo encadeado (*chain-linked model*) de Kline e Rosenberg (1986) e as relações entre pesquisa, invenção, inovação e produção durante o desenvolvimento de um processo de inovação.

Figura 4 Modelo encadeado (*chain-linked*) dos processos de inovação



Fonte: Kline e Rosenberg, 1986.

Uma inovação bem-sucedida precisa equilibrar os requisitos de um novo produto com seus processos de fabricação, com as necessidades do mercado e com a capacidade

da organização para suportar continuamente todas essas atividades. No modelo encadeado (*chain-linked model*) proposto por Kline e Rosenberg (1986), a ciência funciona como um depósito do conhecimento básico (química, física e ciências naturais) que fica à disposição do processo de inovação. As pesquisas, por sua vez, são necessárias quando os recursos disponíveis não atendem as necessidades da inovação: ou no estágio inicial, se confundindo com a ciência básica e contribuindo para o depósito de conhecimento, ou ao longo do processo inovador, já não mais como ciência, mas contribuindo de maneira fundamental para o sucesso das demais etapas do projeto. Nesse modelo não existe apenas um encadeamento simples no desenvolvimento da inovação (onde a pesquisa alimenta a ciência, que alimenta a engenharia, que usa o conhecimento), mas um encadeamento interativo envolvendo:

- diversos feedbacks entre pesquisa, produção e marketing;
- contatos paralelos com pesquisa e ciência ao longo de todo o processo inovador;
- pesquisas genéricas de longo alcance para backup de inovações;
- desenvolvimento de processos totalmente novos e
- suporte da ciência para os produtos inovadores.

O grau de incerteza nos processos de inovação vai depender da base científica, do conhecimento tecnológico disponíveis e do salto tecnológico requerido pela inovação: quando essa base de conhecimento permite previsões mais precisas, o processo inovador pode ser mais rápido e confiável. Quando não, pode ser necessário recorrer a testes ou processos empíricos mais lentos e incertos (KLINE; ROSENBERG, 1986). Todo esse processo interativo, entretanto, irá depender de como as empresas constroem e mantêm o seu conhecimento; de como elas estruturam internamente ou em conjunto com outras organizações e de como elas estabelecem incentivos internos para garantir que a inovação prossiga rapidamente e na direção certa (PAVITT, 2003).

2.3 A Empresa inovadora

Empresas são entidades constituídas juridicamente que visam transformar recursos produtivos em bens e serviços que os clientes desejam, a preços que eles podem pagar. Para que essa transformação seja feita de maneira produtiva, as empresas precisam se engajar não apenas nas atividades de transformação, mas também em algumas outras atividades como estratégia, organização e financiamento (LAZONICK, 2006). As escolhas sobre produtos e mercados em que se pretende competir, assim como sobre as

tecnologias a serem utilizadas, dependem de suas estratégias. Sua organização também deverá ser fruto das estratégias escolhidas e precisa definir a forma de combinar recursos para transformá-los em produtos ou serviços rentáveis. E para que tudo isso possa acontecer, as empresas precisam se financiar para ter acesso a tecnologias e conquistar mercados que só irão gerar receitas em algum momento no futuro (LAZONICK, 2006).

Criar estratégias, organizar e financiar, não significa inovar. As empresas podem definir estratégias, se organizar e se financiar na busca de maximizar seus lucros a partir de capacitações tecnológicas e mercados existentes. Isso é diferente de inovar: a depender de seu objeto, a inovação requer estratégias que busquem por transformações que gerem novos produtos ou melhorem a qualidade e reduzam custos de produtos existentes visando aumentar sua parcela de mercado, melhorar sua rentabilidade ou acessar novos mercados (LAZONICK, 2006).

A empresa inovadora precisa se conhecer e se organizar com base em habilidades que estimulem o desenvolvimento da inovação (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Para von Hippel (1988), as empresas organizam suas atividades relacionadas à inovação com base em seus próprios pressupostos sobre as fontes de inovação: se acreditam que sua fonte de inovação é interna, estruturam e fortalecem seus próprios departamentos de engenharia e de P&D; se veem seus fornecedores como fontes de inovação, se concentram e fortalecem as atividades de operação e controle; se têm nos usuários finais suas fontes de inovação, fortalecem suas estruturas de marketing e de relações com o cliente. A empresa inovadora é uma organização que se conhece e se organiza de modo a mobilizar e gerenciar conhecimento, pois inovar é parte de um ciclo de aprendizado que envolve diversos processos intermediários, como: experimentação, experiência, reflexão e consolidação (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Nesse ciclo, a empresa gerencia sistematicamente o processo de criação do conhecimento através de uma longa espiral capaz de converter o conhecimento tácito, criado no nível individual, em conhecimento explícito, decodificado e estruturado dentro dos limites das organizações (NONAKA; TAKEUCHI, 1995), ou ultrapassando esses limites, como sugere o conceito de inovação aberta proposto por Chesbrough e Crowther (2006).

Para Chesbrough e Crowther (2006) e Chesbrough e Boger (2014), o uso de entradas e saídas intencionais de conhecimento pode acelerar a inovação interna e expandir os mercados para uso externo da inovação. O conceito de inovação aberta muda

a premissa de que uma empresa sozinha pode ter os melhores gestores e os melhores recursos e que pode executar os melhores serviços ou encontrar as melhores soluções para um problema, sem depender de mais ninguém. Para Chesbrough e Boger (2014) a inovação aberta é um processo de inovação distribuída que envolve fluxos de conhecimento gerenciados intencionalmente através das fronteiras organizacionais. Nesse conceito, o desenvolvimento básico é feito em conjunto com outras organizações interessadas em seu desenvolvimento até que cada empresa agregue, dentro de suas fronteiras, seus diferenciais competitivos.

Para que seja possível operar no curto prazo e conseguir consolidar sua base de conhecimento para gerir seus processos de inovação tecnológica no médio e no longo prazo, a empresa inovadora precisa de financiamentos consistentes e sustentados no longo prazo (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005 e LAZONICK, 2006).

A forma de propriedade da empresa não é uma questão crítica para se entender se a empresa é ou não inovadora. Não é crítico saber se os tomadores de decisão são proprietários da empresa ou funcionários de empresa de capital aberto ou mesmo funcionários do Estado. Críticas são as habilidades e incentivos dos gestores que exercem o controle estratégico e sua capacidade para alocar recursos e financiamento de longo prazo ao processo de inovação (LAZONICK, 2006).

2.4 Padrões setoriais de inovação

Apesar das características tidas como comuns em empresas inovadoras, como as descritas na seção anterior, serem muitas vezes identificadas em empresas inovadoras de sucesso (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005), isso não significa que haja um padrão geral para o desenvolvimento de inovações que seja comum a todas as empresas. As empresas com especializações em diferentes produtos e/ou tecnologias tendem a apresentar diferentes características em seus processos de inovação, dadas as diferentes naturezas dos setores onde operam. Assim, para as empresas automobilísticas, o feedback eficaz entre o projeto do produto e sua fabricação é mais importante do que o feedback entre o projeto do produto e a pesquisa universitária. Para uma empresa farmacêutica, é provável que aconteça o inverso, dada a maior utilidade direta da pesquisa universitária sobre os resultados de seus produtos. Já, para pequenas empresas inovadoras que produzem principalmente bens de produção, os usuários, provavelmente, serão uma importante

fonte de inovações, enquanto para grandes empresas que estão vendendo para usuários sem fortes capacidades tecnológicas, esse não será o caso (PAVITT, 2003).

As empresas das indústrias de processo tendem a se concentrar em produzir de forma cada vez mais eficiente. Independentemente do foco estratégico, no entanto, um processo de produção eficiente precisa garantir um contínuo aprimoramento, seja através de melhorias incrementais ou através de saltos tecnológicos maiores (LAGER; FRISHAMMAR, 2010). Com ênfase na inovação de processos, essas empresas tendem a ser muito receptivas a aperfeiçoamentos, proporcionando uma grande abertura para que os fabricantes de equipamentos participem dos processos de inovação (UTTERBACK, 1994). Em alguns setores das industriais, os fabricantes de equipamentos são considerados como uma importante fonte de inovação e desempenham um papel cada vez mais importante no aprimoramento das tecnologias existentes e no aprimoramento da confiabilidade e das capacidades dos equipamentos (VON HIPPEL, 1988; HUTCHESON, 1995 apud LAGER; FRISHAMMAR, 2010). A colaboração bem-sucedida depende de uma gestão adequada dos fluxos de informação e do compartilhamento de conhecimento entre os envolvidos. No contexto específico da colaboração entre fabricantes de equipamentos e empresas de processo no desenvolvimento de inovações ou na resolução de problemas, é importante uma detalhada troca de informações. Por outro lado, também é importante entender que o compartilhamento indesejado ou o vazamento de informações precisam ser evitados (VON HIPPEL, 1988; LAGER, 2010).

Para Pavitt (1984), a maior parte do conhecimento gerado no desenvolvimento de inovações acaba sendo específico para a empresa desenvolvedora e de aplicação apenas dentro dos próprios setores. Nos setores de química e de eletrônica, por exemplo, as empresas inovadoras são relativamente grandes e desenvolvem inovações em produtos específicos dentro de seu setor, mas relativamente pouco fora dela. Nos setores de engenharia mecânica e de instrumentos, as empresas são menores e mais especializadas e trabalham em conjunto com grandes empresas de setores intensivos em escala, como metalurgia e montagem de veículos. Em outros setores como têxtil e papel & celulose, a maioria das inovações de processo vem dos fornecedores de equipamentos e de tecnologia (PAVITT, 1984; CASTELLACCI, 2008).

Considerando que os padrões de inovação são cumulativos, Pavitt (1984) argumenta que as trajetórias tecnológicas das empresas inovadoras são determinadas por

suas capacitações e atividades principais que, por sua vez, foram construídas a partir dos rendimentos crescentes de seus ativos específicos. Dessa forma, diferentes capacitações e atividades geram diferentes trajetórias tecnológicas. Para Pavitt (1984), essas trajetórias podem ser agrupadas em três categorias que são determinadas pelas fontes de inovação, pelos tipos de usuários e pelos meios de apropriação de seus benefícios. São elas: “dominados pelos fornecedores”, “intensivas em produção” e “baseados em ciência”. Posteriormente, considerando as trajetórias tecnológicas de novos setores como: ciência da computação, telecomunicações e equipamentos de alta precisão, entre outros, Pavitt (1990) sugere uma taxonomia com duas novas categorias: “fornecedores especializados” e “intensivos em informação”. Como este trabalho se concentra nos processos de inovação desenvolvidos nos setores mais tradicionais de processos químicos e similares, serão detalhadas e analisadas apenas as três categorias originais.

2.4.1 Empresas com trajetórias tecnológicas “dominadas pelos fornecedores”

Empresas com trajetórias tecnológicas dominadas pelos fornecedores são, normalmente, encontradas em setores tradicionais de manufatura como: agricultura, alimentos & bebidas, têxtil e papel & celulose (PAVITT, 1984; CASTELLACI, 2008).

Nas empresas dominadas pelos fornecedores, as capacitações em P&D e engenharia são, em geral, fracas e com poucos profissionais alocados. Essas empresas se apropriam da inovação com base em suas habilidades profissionais e não a partir das vantagens tecnológicas e suas trajetórias tecnológicas são definidas em termos de corte de custos (PAVITT, 1984).

Nos setores com empresas de trajetórias tecnológicas dominadas pelos fornecedores, as fontes funcionais de inovação estão nos fornecedores (VON HIPPEL, 1988), pois as empresas dominadas por fornecedores quase não contribuem para melhoria de suas tecnologias de produção ou de produto, deixando essa tarefa para seus fornecedores especializados através do fornecimento de novos equipamentos ou novos materiais. Ou seja, são as inovações desenvolvidas nos setores de seus fornecedores que proporcionam suas melhorias de produção ou de produtividade (PAVITT, 1984).

2.4.2 Empresas com trajetórias tecnológicas “intensivas em escala”

Empresas intensivas em escala se caracterizam por um elevado contingente de mão de obra, pelo foco na otimização das atividades de produção e pela obsessão por

redução de custos, sempre visando alcançar grandes fatias dos mercados onde atuam (PAVITT, 1984). Suas trajetórias foram formadas por atividades de transporte de materiais bastante otimizadas, pela comercialização em grandes volumes tanto de insumos quanto de produtos, e pela grande concentração industrial com plantas industriais de processos contínuos produzindo em larga escala. Nessas empresas, existe um foco muito forte em corte de custos através da otimização das operações e da padronização de materiais. Essas empresas são encontradas na montagem de veículos e de bens de consumo duráveis e na produção de materiais padronizados, como o aço e o vidro. Esses setores também ficaram caracterizados pela fabricação e montagem de máquinas capazes de realizar tarefas progressivamente mais complexas e exigentes de forma confiável, como resultado de melhorias na qualidade dos metais e na precisão e complexidade da conformação e corte de metais, nas fontes de energia e nos sistemas de controle. Em processos contínuos, o aumento da escala e as altas temperaturas e pressões resultaram de melhorias nos materiais, instrumentos de controle e fontes de energia (PAVITT, 1984).

As empresas com trajetórias intensivas em escala atuam em condições de operação rigorosas, em sistemas de produção tão complexos e interdependentes que são muito difíceis de operar a plena capacidade onde mesmo falhas externas na cadeia produtiva podem ser vitais para seus resultados técnicos ou financeiros (PAVITT, 1984). Nessas unidades de produção, as demandas por inovação emergem de “sinais emitidos pelos próprios processos produtivos, indicando suas restrições” (ROSENBERG, 1994). Esses sinais são decodificados por equipes próprias de engenharia de produção e engenharia de processo treinadas e especializadas na busca de solução de problemas e eliminação de gargalos que, uma vez corrigidos, possibilitam grandes saltos na produtividade. (PAVITT, 1984). Como, de forma geral, essas empresas atuam sob constante pressão para aumento de produtividade, as equipes de soluções de problemas, confrontadas com a gama existente de ativos produtivos, acabam por tomá-los como um ponto de partida inevitável. As equipes são naturalmente guiadas para buscar a fronteira tecnológica dentro desse universo, visando atacar o gargalo mais restritivo (ROSENBERG, 1994). O autor ressalta, que quando suficientemente complexos e interdependentes, esses processos envolvem formulações consecutivas de problemas capazes de capturar grande parte do tempo e da energia daqueles que estão engajados nas buscas por soluções. Essa busca sequencial faz com que aperfeiçoamentos em determinado equipamento ou sistema, criem novos gargalos, nos sistemas seguintes,

gerando um processo de inovações incrementais “compulsivo” que pode ser capaz de impedir a adoção de uma inovação radical (ROSENBERG, 1994).

A outra fonte importante de inovações em empresas de produção intensiva são as empresas relativamente pequenas e especializadas que lhes fornecem equipamentos e instrumentos de controle, com as quais mantêm um relacionamento próximo e complementar (PAVITT, 1984). As grandes empresas usuárias fornecem experiência operacional, instalações de teste e até mesmo recursos de projeto e desenvolvimento para fornecedores de equipamentos especializados. Esses fornecedores, por sua vez, fornecem a seus grandes clientes conhecimento e experiência especializados como resultado do projeto e da construção de equipamentos para uma variedade de usuários, muitas vezes espalhados por vários setores. (ROSENBERG, 1976 apud PAVITT, 1984).

As empresas com trajetórias intensivas em escala se apropriam da vantagem tecnológica de formas diferentes: para os grandes produtores, as invenções particulares em geral não têm grande importância. A liderança tecnológica se dá por sua capacidade de projetar, construir e operar processos contínuos integrar linhas de montagem em grande escala. As lideranças tecnológicas são mantidas por meio de know-how e sigilo em torno de inovações, bem como por meio de proteção de patentes. Para os fornecedores especializados, o sucesso competitivo depende de habilidades específicas da empresa que são refletidas em melhorias contínuas no projeto e na confiabilidade do equipamento, assim como na capacidade de responder com adequação e rapidez às necessidades dos usuários ((PAVITT, 1984).

2.4.3 Empresas com trajetórias tecnológicas “baseadas em ciência”

Na categoria de empresas baseadas em ciência estão, principalmente, as pertencentes aos setores: químico, farmacêutico e eletroeletrônico. Nelas, as principais fontes de tecnologia estão na ciência básica produzida por universidades e instituições de pesquisa. Ou seja, desenvolvimentos sucessivos de produtos, feitos por suas equipes internas de P&D, dependem de um desenvolvimento inicial na esfera da ciência básica: no caso da indústria química, seus desenvolvimentos foram consequências de descobertas nos campos da síntese química e bioquímica; da mesma forma que os desenvolvimentos de produtos do setor eletroeletrônico foram feitos a partir das descobertas do eletromagnetismo, das ondas de rádio e da física do estado sólido. (PAVITT, 1984).

Essa enorme difusão ditou as trajetórias tecnológicas das empresas nos setores de base científica. A rica gama de aplicações baseadas na ciência básica fez com que as empresas inovadoras e bem-sucedidas crescessem rapidamente sem grandes estímulos para procurar oportunidades em outros setores. Por outro lado, dado o alto nível de conhecimento científico e de sofisticação tecnológica, além da necessidade de recursos para operar em grandes escalas, é muito difícil que empresas de fora consigam entrar nesses setores (PAVITT, 1984). As aplicações generalizadas de seus produtos também trouxeram uma grande ênfase no desenvolvimento de diferentes tecnologias de processo em cada um desses setores, que justificam as grandes variações na relação custo-desempenho de diversos produtos: desde bens de consumo até aplicações especializadas, passando por materiais especiais e produtos intermediários. Entre as empresas baseadas em ciência, as grandes corporações possuem uma forte estrutura interna para desenvolvimento de inovações se apropriam das inovações através de depósitos de patentes ou do sigilo industrial (VON HIPPEL, 1988). Essas grandes corporações, atuam de forma diversificada e têm uma contribuição maior no desenvolvimento de inovações do que as empresas pequenas, como as empresas de engenharia ou de fabricação de equipamentos (PAVITT, 1984).

2.4.4 Interrelações entre tecnologias e trajetórias

Segundo Pavitt (1984), as empresas de diferentes categorias se relacionam através de alguns fluxos principais: empresas dominadas por fornecedores recebem grande parte da tecnologia que utilizam de empresas intensivas em produção ou baseadas em ciência que, por sua vez, também transferem tecnologia para empresas intensivas em produção. Por outro lado, tanto as empresas baseadas em ciência quanto as intensivas em produção, recebem tecnologia de fornecedores especializados. Essas transferências de tecnologia vão além da compra de bens ou serviços. Elas incluem transferência de informação, conhecimento e diversificação tecnológica (PAVITT, 1984).

Outros autores analisaram as características setoriais de inovação a partir da taxonomia de Pavitt (1984), incluindo outras dimensões: quase 20 anos depois, Malerba (2002) propôs o conceito de sistema setorial de inovação com uma visão mais integrada e dinâmica dos setores, onde cada sistema possui um conjunto de produtos, tecnologias e insumos específicos que se transforma com o tempo e é função também dos limites geográficos. Para o autor, as dinâmicas de mudança são diferentes entre os diversos

sistemas setoriais. Mudanças que não significam apenas um crescimento quantitativo, mas também de transformação e evolução nos regimes tecnológicos, alterando os próprios padrões de inovação. No mesmo ano, Marsili e Verspagen (2002) utilizaram o conceito de regimes tecnológicos para analisar as relações entre inovação e estrutura / dinâmica industrial na Holanda. Nesse modelo, além das características setoriais, o autor considerou o tipo e o porte das empresas, suas diferentes produtividades, as mudanças no mercado e a taxa de entrada e saída de empresas nos setores. Analisando a indústria de embalagens plásticas no Brasil, Alves (2002, 2006) busca verificar diferentes padrões de inovação em empresas pertencentes a uma mesma trajetória tecnológica – dominados pelos fornecedores, a partir de diferentes aspectos organizacionais e competências internas. Também analisando a indústria brasileira, Campos e Ruiz (2009) sugerem que não se deve negligenciar a diversidade intersetorial, quando se pretende entender o comportamento inovativo da indústria a partir do estudo de *clusters*. Ao investigar, empiricamente, a forma como a proximidade geográfica e a relação tecnológica se refletem na produção inovadora de um setor, Buerger e Cantner (2011), analisaram duas empresas baseadas em ciência e duas consideradas como fornecedores especializados. Nessa investigação, o autor concluiu que tanto as empresas baseadas em ciência quanto os fornecedores especializados se beneficiavam da exploração regional da relação tecnológica existente entre eles, mesmo que em graus diferentes.

Além disso, diferentes perspectivas podem classificar empresas de um determinado setor em diferentes trajetórias tecnológicas. Para Campos e Ruiz (2009), analisando o Brasil, a agricultura não deveria mais ser considerado como tendo uma trajetória dominada pelos fornecedores, conforme definido na taxonomia de Pavitt (1984). Segundo o autor, novas tecnologias desenvolvidas em setores agro-alimentícios como, p.ex., processos de catálise desenvolvidos para a produção de etanol e biodiesel, deveriam levar o setor a ser classificado como baseado em ciência. Já Peixoto Rosário, Peixoto Santa Rita e Pradines de Albuquerque (2013), consideram que as fábricas do setor sucroalcooleiro, no Brasil, são dominadas pelo desenvolvimento tecnológico de seus fornecedores.

Já neste século, Castellaci (2008) sugere uma nova taxonomia, que se assemelha à de Pavitt (1990), com novas categorias, a partir de novos setores como: ciência da computação, telecomunicações, redes de comunicação sem fio e equipamentos de alta precisão, entre outros. Essa abordagem mantém a categoria baseada em ciência como

proposto por Pavitt (1984), e divide a categoria de empresas dominadas por fornecedores em bens e serviços, além de acrescentar duas categorias de “fornecedores de conhecimento avançado”. Uma delas trata do que Pavitt chamou de fornecedores especializados e Castellaci (2008) chamou de serviços intensivos em conhecimento, onde foram incluídos os serviços relacionados à ciência e tecnologia da computação. Por fim, Castellaci (2008) inclui duas outras categorias chamadas de “infraestrutura de apoio”. Uma que, além de telecomunicações, inclui serviços financeiros, seguros, fundos de pensão e outra que trata da infraestrutura física incluindo terra, água e atividades de transporte. Em nota, o autor destacou que uma limitação dessa análise empírica é que ela se concentra no nível setorial e, portanto, é incapaz de investigar a extensão da heterogeneidade no nível das empresas dentro de cada setor. Além disso, essa análise não aborda setores emergentes, ainda em construção, nem trata dos casos de transição em que há uma grande interseção setorial.

Toda a complexidade envolvida na classificação de padrões setoriais de inovação, não permite determinar limites claros entre as trajetórias que são específicas das empresas e aquelas características dos setores ou mesmo de sistemas setoriais. Várias dimensões precisam ainda ser consideradas como as capacitações internas, regiões, complementaridades, e o fator tempo, além de estreitas relações entre as inovações, seus potenciais usuários e o ambiente que elas irão afetar.

2.5 Quadro analítico

A grande variedade das dimensões de observação, das características e etapas, assim como dos atores que constroem e participam dos processos de inovação, torna a análise dos processos vividos por empresas envolvidas na implementação de plantas pioneiras (*first-of-a-kind*) bastante complexa.

Essa complexidade pode dificultar que analistas, pesquisadores ou gestores de empresas, não familiarizados nos conceitos ligados aos processos de inovação, consigam compreender quais parâmetros são importantes para seus projetos específicos e como é possível atuar sobre eles ou mesmo se beneficiar deles. A falta de compreensão conceitual sobre problemas vividos na prática pode fazer com esses problemas nem sequer sejam vistos, tornando muito mais difícil seu enfrentamento. Uma ferramenta que consiga fornecer uma visão geral sobre todo o arcabouço teórico envolvido nos processos de inovação e sobre quais podem influenciar ou ser influenciados por suas estratégias de

atuação, pode apoiar decisores e gestores na definição de estratégias a serem seguidas, no caminho do sucesso de seus projetos.

No sentido de ligar o conceito à prática, foi montado o Quadro Analítico dos Processos de Inovação (Quadro 1). Esse quadro não se propõe a simplificar os diversos fatores ligados aos processos de inovação, mas apenas facilitar a compreensão do leitor sobre as diversas variáveis que podem impactar seus projetos envolvidos em desenvolvimentos tecnológicos inovadores. A partir daí, mesmo analistas, pesquisadores e gestores não familiarizados com esses conceitos, poderão identificar que fatores e autores pesquisar para melhor balizar suas estratégias e suas decisões.

Quadro 1 Quadro analítico – Processos de inovação

Arcabouço Teórico / Dimensões (autores, ano de publicação)		Unidade de Análise	Características / Classificações / Fases		
Processos de Inovação (UTTERBACK, 1987, 1994)	Natureza	Produto / Processo	Inovação em Produto	Inovação em Processo	Outras Naturezas
	Graus de Novidade		Inovação Radical		Inovação Incremental
	Fases		Fase Fluida	Fase Transitória	Fase Específica
	Conhecimento (PAVITT, 2003)		Produção do Conhecimento		Transformação do Conhecimento em Produto ou Serviço
	Adequação contínua do conhecimento				
Empresa Inovadora (LAZONICK, 2006)		Empresa	Estratégia		
			Organização		
			Financiamento		
Fontes de Inovação (VON HIPPEL, 1988)		Setor	Interna	Fornecedor	Usuário
Modelos (PAVITT, 1984; KLINE; ROSENBERG, 1986)			Impulsionado pela Tecnologia		Puxado pelo Mercado
			Modelo Encadeado (<i>chain-linked</i>)		
			Dominados pelos Fornecedores		
			Intensivos em Escala		
Padrões Setoriais (PAVITT, 1984)			Baseados em Ciência		
Condições de Contorno (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005)		Sistemas	Tecnologia		
			Mercado		
			Regulação		

Fonte: Elaboração própria

Esse quadro analítico inclui as diversas dimensões de análise dos processos de inovação revisitadas nesse referencial teórico, em um formato esquemático, que permite visualizar em uma única tabela quais características, classificações ou fases podem influenciar no desenvolvimento de inovações. Desde o desenvolvimento dos processos de inovação com sua natureza, graus e fases, passando por modelos e padrões setoriais até as influências potenciais que mudanças nas condições de contorno podem causar sobre projetos inovadores em andamento ou em fase de planejamento. O quadro também

apresenta os autores envolvidos nesses processos, ano da publicação do conceito pesquisado e as diversas unidades de análise.

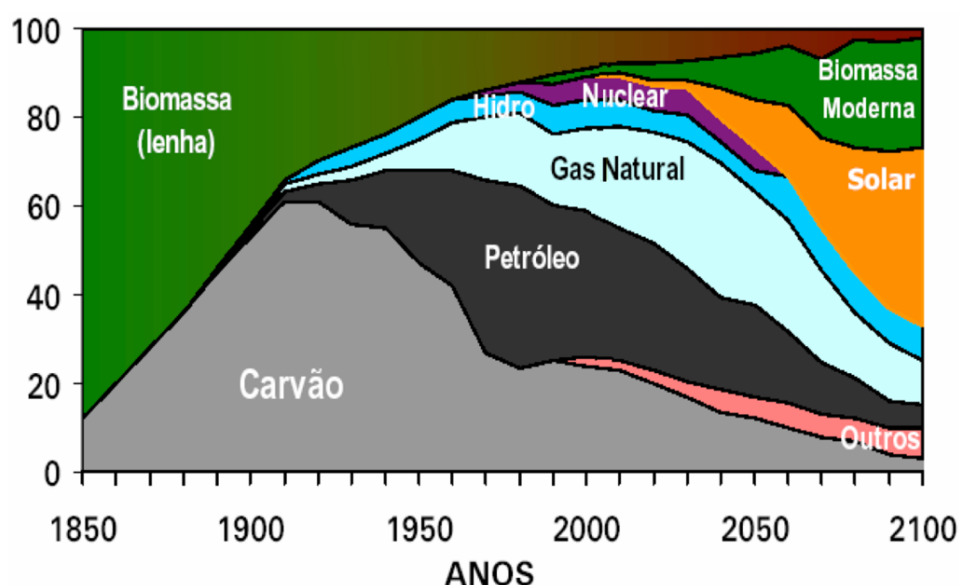
O objetivo do uso deste quadro no desenvolvimento dessa tese é, ao final do capítulo 5 (de Análise dos Resultados¹), identificar os fatores e dimensões que mais afetaram os processos de inovação vividos pelas plantas pioneiras do E2G de modo a que lições possam ser aprendidas e utilizadas em futuros projetos que envolvam a implementação de plantas pioneiras (*first-of-a-kind*), no contexto da Bioeconomia.

¹ O questionário elaborado para a condução das entrevistas não teve como base esse Referencial Teórico, que foi utilizado apenas para analisar os resultados obtidos.

3 A TRAJETÓRIA DO ETANOL – Linha do tempo

Em 1850, a biomassa era praticamente a única fonte usada pelo homem para geração de energia, além da força dos ventos para navegação, do uso de animais domesticados na agricultura e pequenas quantidades de carvão para aquecimento residencial. Com a Revolução Industrial, a importância do carvão cresceu rapidamente já no final do século XIX. A Figura 6 mostra a participação das fontes de energia primária entre 1850 e os anos 1900 com um cenário previsto para 2100, indicando a importância crescente das fontes renováveis e o declínio da contribuição das fontes fósseis (GOLDENBERG, 2009).

Figura 5 Transição energética - Participação das fontes de energia primária.

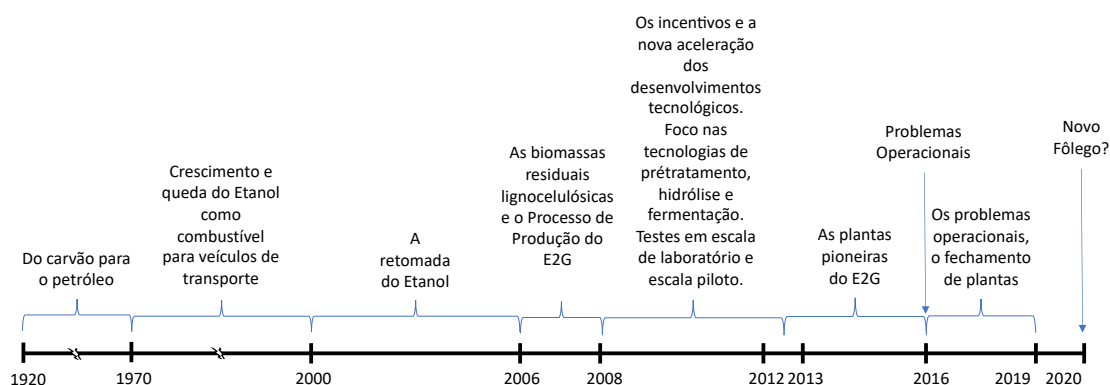


Fonte: Goldenberg, 2009

Para se conhecer o contexto no qual o Caso das Plantas do E2G foi construído, este capítulo desenha a Linha do Tempo transcorrida desde o crescimento do petróleo como principal fonte de produção de combustíveis, passando pelo aumento da produção global de etanol como potencial alternativa aos derivados do petróleo, até os recentes desenvolvimentos tecnológicos que tornaram viável a construção de plantas pioneiras de produção de E2G. O capítulo visita brevemente a origem da transição do uso do carvão para o petróleo como principal fonte de produção de combustíveis, dos anos 1920 a 1970, transita pelas crises do petróleo entre 1970 e 2008 que também estimularam a busca por combustíveis alternativos, passa pelos desenvolvimentos tecnológicos de uso de biomassas lignocelulósicas como fonte de produção de combustível, seu período de maior impulso, e o salto das etapas desenvolvimento para as plantas em escala comercial, entre

2008 e 2012. O Figura 7 apresenta, de forma resumida, os períodos que serão abordados no capítulo.

Figura 6 Etanol de segunda geração – Linha do tempo



Fonte: Elaboração própria

Por fim, o capítulo trata da brusca mudança de expectativas do mercado quanto ao sucesso comercial do E2G, dos problemas operacionais vividos pelas plantas, entre 2013 e 2019 e da retomada potencial do etanol como fonte alternativa concreta para substituição aos derivados de petróleo na produção de combustíveis a partir de 2020.

3.1 A transição do carvão para o petróleo – 1920 a 1970

Voltando ao início do século XX, não é simples indicar apenas um motivo para o enorme crescimento da indústria petroquímica nos EUA naquele período. Não parece ter sido apenas a descoberta de fontes abundantes e baratas de óleo, já que havia suprimento suficiente de parafinas para produção de químicos no mercado. Nem parece ter sido devido a um grande aumento de demanda por produtos que poderiam ser fabricados de forma mais econômica a partir do petróleo, já que, em função da grande depressão econômica, a demanda por produtos era pequena e não havia falta desses produtos no mercado (SPITZ, 1988). Para Spitz (1988), o principal fator que alavancou o crescimento da indústria petroquímica nos EUA foi o desenvolvimento tecnológico inovador de William Burton que criou o processo de craqueamento térmico que leva seu nome, e que envolve a quebra de moléculas orgânicas complexas em moléculas mais simples, especificamente gasolina, diesel e outros combustíveis. Antes disso, o principal problema da produção de químicos a partir de derivados de petróleo era a grande produção de parafinas, até então considerado como material não-reativo.

O entendimento de que o petróleo seria uma matéria-prima melhor que o carvão na produção de químicos já parecia claro, considerando que, além de abundante, o petróleo é formado por hidrocarbonetos já nos estados líquido e gasoso enquanto o carvão é sólido e precisa ser convertido em líquido ou gás para que seus componentes possam ser processados quimicamente. Com a descoberta de Burton em 1912, e seu posterior desenvolvimento a partir da década de 1920, as frações pesadas de óleo puderam ser “craqueadas” obtendo altos índices de gasolina e outras frações leves. Entre 1921 e 1939, a produção de químicos orgânicos não oriundos do carvão cresceu de 9.500 para 13.600.000 toneladas, tendo seu preço médio reduzido a 1/3, no mesmo período (SPITZ, 1988). O processo de Burton mudou o cenário “para sempre”, dando partida à transição de fontes de produção de energia que levou o petróleo a deslocar o carvão como principal fonte de produção de combustíveis e produtos químicos, de forma incontestável, pelos 50 anos que se seguiram (SPITZ, 1988; BENNETT, 2009; CALDERON; ARANTES, 2019).

No início dos anos 1920, nos EUA, a transição de produtos químicos à base de carvão para produtos sintéticos à base de petróleo foi uma mudança tecnológica alavancada pela produção em massa de automóveis no início do século XX (BENNETT; PEARSON, 2009). O rápido crescimento da demanda por gasolina para veículos automotores nos Estados Unidos, junto com uma oferta grande e barata de olefinas, fez com que, no final da segunda grande guerra, a indústria química dos EUA mudasse em grande escala para matérias-primas à base de petróleo. Na Alemanha, essa transição foi adiada por algumas décadas em função de práticas, cultura e atitudes desenvolvidas sob um regime industrial baseado no carvão (RUTTAN, 1997 apud BENNETT; PEARSON, 2009). No Reino Unido, a alta demanda por gasolina, também gerada no início da década, iniciou o aumento gradual do consumo de derivados de petróleo até que entre 1950 e 1970, quase todos os produtos químicos já eram fabricados a partir do óleo (BENNETT, 2009; BENNETT; PEARSON, 2009). Na França, o percentual de carvão consumido caiu de 70% para 18% nas décadas de 1960 e 1970. Na Holanda, onde o gás natural era explorado desde a década de 1960, a porcentagem de carvão caiu de 73% em 1955 para níveis inexistentes na década de 1970. Na Itália e na Suécia, a segunda grande guerra marcou a mudança para o petróleo, enquanto na Espanha o consumo de petróleo tornou-se predominante apenas no final da década de 1960 (BENNETT, 2009; BENNETT; PEARSON, 2009).

A transição energética nos EUA e Europa apresentou uma sequência muito clara: até 1910, o carvão como matéria-prima para geração de energia havia avançado até dominar todos os sistemas energéticos, incluindo urbano, industrial e de transporte. A partir daí, o petróleo, começou a ganhar terreno de forma constante, assumindo o papel de maior fonte de geração de energia e deslocando o carvão para a segunda posição. Esse padrão se repetiu na África onde a participação do carvão na geração de energia entre 1920 e 1970 caiu de 91% para 55%. O mesmo ocorreu na Ásia com queda de 92% para 28%, na Oceania com queda de 92% para 48% e na União Soviética de 83% para 53%. A América Latina, entretanto, não seguiu um caminho de transição energética semelhante (RUBIO, 2012).

Em países da América Latina, a transição energética variou em maior grau do que nos EUA e Europa, e ocorreu mais cedo e mais rapidamente. Na primeira metade do século XX, a maioria desses países eram importadores de carvão e derivados de petróleo, principalmente de Reino Unido, Estados Unidos e Alemanha. A transição de matéria-prima para geração de energia no Brasil e na Argentina aconteceu de forma relativamente suave à semelhança do ocorrido nos EUA e na Europa, mas, mesmo assim, com muito mais rapidez: enquanto nesses países, o consumo de petróleo superou o carvão a partir de 1950, nos países latino-americanos, a supremacia do petróleo já ocorre entre as décadas de 1920 e 1940. No caso da Argentina e da maioria dos países da região, o carvão caiu de um nível de consumo de mais de 90 % para aproximadamente 10,8% em 28 anos enquanto nos EUA, essa mesma transformação levou mais de 70 anos. O Brasil, foi um dos últimos países da América Latina a trocar majoritariamente o carvão pelo petróleo, o que ocorreu em 1940.² (RUBIO, 2012).

3.2 O etanol como combustível alternativo – 1970 a 2000.

A utilização de etanol como combustível para veículos de transporte terrestre não é um tema recente. Estudos nessa direção já eram desenvolvidos desde o surgimento dos primeiros automóveis, entre as décadas de 1910 e 1930. O Modelo T da Ford, por exemplo, em suas primeiras versões, já previa ajustes para que fosse abastecido tanto com

² Levantar e debater as razões que levaram a esse comportamento particular na transição do carvão para o petróleo nos países da América Latina não está entre os objetivos desta tese e nem foram exploradas por Rubio (2012), que se preocupou em revelar os dados e a evolução da transição de combustíveis fósseis em países onde não havia informações anteriores disponíveis na literatura. Seus resultados, entretanto, despertam o interesse para que, novos estudos, possam trazer contribuições para as novas transições de fontes renováveis que se avizinham.

gasolina quanto com etanol. Entretanto, o crescimento da indústria do petróleo, o desenvolvimento tecnológico e o aumento das escalas de produção da gasolina e do óleo diesel, fizeram com que os derivados do petróleo dominassem o mercado de forma incontestável nas décadas seguintes (SPERLING, 1990).

Essa posição de liderança se manteve por quase 50 anos até sofrer seu primeiro abalo, em 1973, com o embargo comandado pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP, que provocou grandes aumentos nos preços do barril de petróleo. Seis anos depois, a crise política no Irã e a posterior guerra Irã-Iraque – dois países integrantes da OPEP, promoveram um novo salto nos preços do barril de petróleo, gerando uma segunda crise no abastecimento de seus derivados, o que despertou um novo interesse global pela busca de fontes alternativas para geração de energia, principalmente em países que dependiam da importação de petróleo (ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016; CALDERON; ARANTES, 2019).

O início da década de 1970, registrou um forte aumento nos preços do de petróleo que trouxe sérias consequências econômicas globais, como queda na competitividade industrial e aumento acentuado da inflação. Brasil e EUA, altamente dependentes das importações de derivados de petróleo, passaram, então, a incentivar o aumento da produção de etanol como substituto à gasolina, de forma a reduzir sua dependência energética. Através de fortes ações governamentais, os dois países conseguiram dar um enorme impulso a diversas iniciativas públicas e privadas que transformariam o etanol no biocombustível mais consumido no mundo (SOARES, 2016).

Nos EUA, onde o milho foi sempre a principal matéria-prima para produção de etanol, os incentivos à sua produção, se davam, até então, pela baixa do preço do milho no mercado de commodities. Porém, a partir da primeira crise do petróleo, já era possível observar os resultados das ações do governo. Os primeiros avanços vieram com diversos estados reduzindo impostos sobre o consumo de uma mistura entre gasolina e etanol. O grande salto, entretanto, aconteceu em 1978 com o *Energy Tax Act*, uma lei federal que reduziu o imposto federal sobre o E10 (mistura com 90% de gasolina e 10% de etanol) e tinha o objetivo de reduzir o consumo de gasolina em 10% até 1990, substituindo-a pelo etanol. Além dos benefícios fiscais, o governo federal multiplicou por dez o volume de investimento em P&D e em desenvolvimento de tecnologias de produção de etanol, entre 1977 e 1980. Ainda através do mesmo *Energy Tax Act* foram liberados US\$1,2 bilhões para o financiamento de novas unidades de produção de etanol e outros biocombustíveis

(DOE, 1979; SPERLING, 1990). Até o final da década de 1970, graças às ações do governo, já havia mais de 2.000 postos de combustível com bombas específicas para o E10 (SPERLING, 1990). Na década seguinte, o *Energy Tax Act* foi atualizado mais duas vezes, reduzindo ainda mais os impostos sobre a mistura. Foram ações que, somadas ao baixo custo de capital para construção de plantas de produção de etanol e à facilidade em lidar com as tecnologias de conversão do milho em etanol, estimularam o surgimento de mais de 300 projetos para construção de plantas de produção do biocombustível. Entre os interessados na construção das unidades industriais estavam também grandes petrolíferas, como Amoco, Texaco e Chevron (SPERLING, 1990).

Nessa corrida pelo uso do etanol combustível, o Brasil partiu na frente, tendo a cana-de-açúcar como matéria-prima. Nos anos 1930, já havia sido criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) – autarquia federal que tinha como objetivo regular a produção e a comercialização de açúcar e etanol, e já se praticava no país uma mistura obrigatória de 5% de etanol na gasolina, estipulada por um decreto do governo federal (NOGUEIRA et al, 2021). O decreto tinha por objetivo reduzir a demanda por petróleo importado e tomava por base os resultados de testes realizados por universidades e centros de pesquisas, que revelaram que a mistura do etanol à gasolina, em certos limites, não danificava os motores dos automóveis que circulavam no país. Esse percentual de etanol na mistura com a gasolina chegou a 42% durante a Segunda Guerra Mundial, mas se manteve, em média, em 7,5% até o início dos anos 1970. (NOGUEIRA et al, 2008). Como resposta à primeira crise do petróleo, outro decreto federal criou, em 1975, o Programa Nacional do Alcool (Proálcool). O programa demorou para deslançar em função da participação descoordenada de vários órgãos estatais, cooperativas de produtores e outros interessados, mas depois passou a ser considerado como um dos maiores sucessos na promoção de biocombustíveis no mundo (SOARES, 2016). Um novo decreto criou a Comissão Nacional do Alcool (CNA) para ser o órgão responsável pela gestão do programa e pela determinação das metas nacionais de produção. Havia controle dos preços do etanol e da gasolina de modo a manter o etanol atrativo tanto para o produtor quanto para os consumidores. Com a chegada da segunda crise do petróleo, em 1979, o Proálcool foi reforçado e foi estipulada a meta de se desenvolver motores que consumissem o E100 ou Etanol Hidratado (100% de etanol sem necessidade de mistura de gasolina). O governo liberou a subvenção US\$ 5 bilhões para a construção da infraestrutura necessária a suportar o aumento de produção e a distribuição do E100

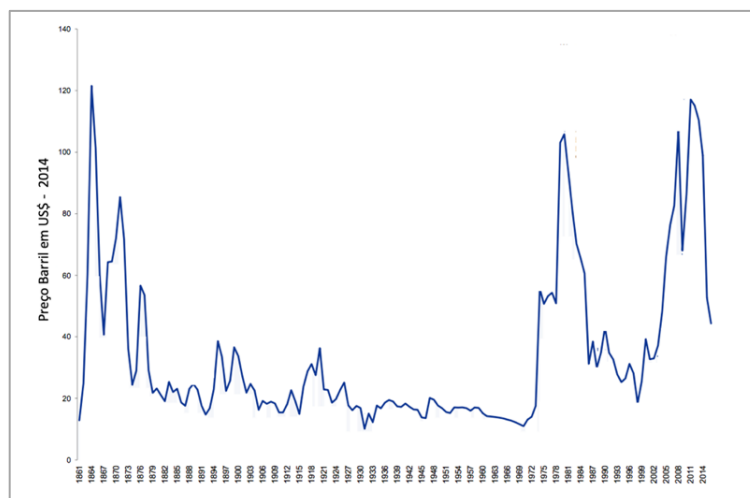
(SPERLING, 1990).

As montadoras de automóvel no Brasil passaram a produzir carros capazes de utilizar o E100, a partir de estímulos do governo federal para elevar produção nacional de etanol, mantendo garantias de preços competitivos, e ainda determinou uma série de novos estímulos ao consumo de carros movidos 100% a etanol. A introdução dos carros movidos a E100 foi bem-sucedida e, já no início dos anos 1980 suas vendas representavam cerca de 95% das vendas de veículos novos (SPERLING, 1990). Apesar do sucesso desta nova etapa do programa, essa década marca o início do declínio do Proálcool: tanto por fatores internos ao país (mudança de regime de governo com o término da ditadura militar e inflação alta) quanto por fatores externos (queda do preço do petróleo, alta do preço do açúcar no mercado internacional). A partir daí, os subsídios à produção de etanol foram suspensos e sua produção ficou estagnada no país até o início dos anos 2000 (SPERLING, 1990; SOARES, 2016).

3.3 A retomada do etanol – 2000 a 2006.

O ataque de 2001 às Torres Gêmeas (*World Trade Center*), em Nova York, seguido da ocupação militar do Iraque liderada pelos Estados Unidos em 2003, e por uma nova onda de aumentos nos preços do petróleo (Figura 8), renovou o interesse global por fontes alternativas de energia.

Figura 7 Evolução dos preços internacionais do barril de petróleo



Fonte: World Economic Forum, Dec 2016

<https://www.weforum.org/agenda/2016/12/155-years-of-oil-prices-in-one-chart/>

Só que dessa vez, além da crise gerada pela alta de preços do óleo, a crescente evidência das ligações entre as mudanças climáticas e as emissões de gases de efeito

estufa (GEE) deu ênfase a se desenvolver fontes de energia renováveis que reduzissem a dependência do petróleo e que também reduzissem as emissões de GEE. Essa perspectiva incluía a substituição da gasolina e do diesel por combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis. (ANDERS, 2016; CALDERON; ARANTES, 2019).

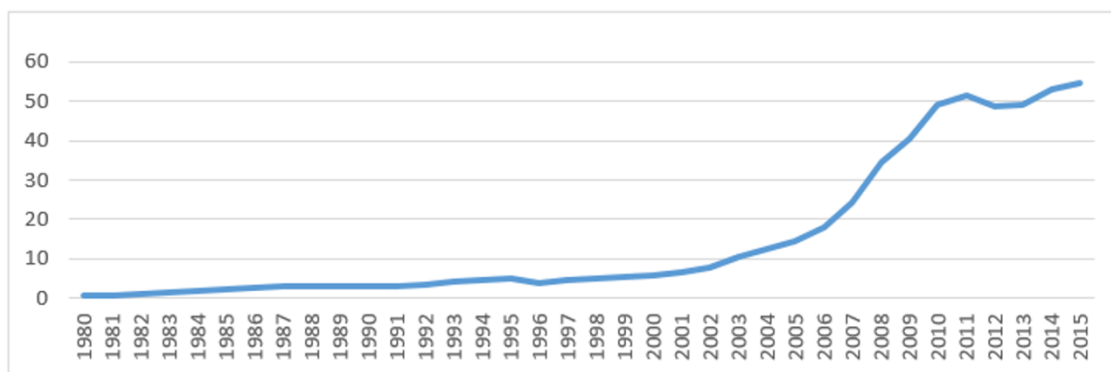
Soluções que reduzam a dependência econômica global do petróleo e, ao mesmo tempo, mitiguem os impactos sobre o meio ambiente, exigem um esforço conjunto de diversos setores da sociedade. Seus impactos não recaem apenas nos processos de produção de combustíveis, mas também em hábitos de consumo, mudanças tecnológicas na produção de veículos e na expansão no transporte público (CHERUBINI, 2010). Uma combinação de esforços que exige, mais uma vez, a participação e o estímulo do Estado.

Nos EUA, o principal estímulo à indústria do etanol que dava uma resposta tanto às pressões impostas pelos preços do petróleo quanto às crescentes pressões ambientais se iniciou em 2005 com a aprovação do *Renewable Fuel Standard* (RFS) – um programa, criado por meio do *Energy Policy Act* de 2005, que estipula uma meta anual de consumo, de biocombustíveis, em sua maioria de etanol, entre 2006 e 2012. Demonstrando uma clara prioridade às crescentes questões ambientais, o RFS teve suas diretrizes e sua regulamentação geridas pela EPA (*Environmental Protection Agency*) e não por agências ligadas a setores industriais ou de geração de energia. Também em 2005, na Europa, o *Europe's Emissions Trading System* (ETS) foi lançado para encorajar o desenvolvimento de tecnologias que substituíssem os combustíveis fósseis. No Brasil, em 2005, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), criou o Plano Nacional de Agroenergia (PNA) 2006-2010. O PNA tinha como um dos seus objetivos “organizar e desenvolver propostas de pesquisa, desenvolvimento, inovação e transferência de tecnologia para garantir sustentabilidade e competitividade às cadeias de agroenergia”. A segunda ação de grande relevância para os biocombustíveis no Brasil, foi a criação, pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), do Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação (PACTI) 2007-2010 (NYKO et al, 2010).

Indústrias e investidores responderam rapidamente a essa combinação de preços altos de derivados de petróleo com incentivos para a produção de combustíveis alternativos, fazendo com que a produção de etanol à base de grãos quase quadruplicasse em 10 anos nos EUA (Figura 9), mesmo com a queda nos preços e na demanda por

combustíveis que ocorreram por conta da crise financeira global de 2008 (NYKO et al, 2010; SOARES, 2016). Em 2007, nos USA, o *Energy Independence and Security Act* (EISA), também conhecido como RFS 2, aumentou as metas de utilização dos biocombustíveis para 136 bilhões de litros em 2022 contra os 34 bilhões de litros projetados para 2008, além de estimular o uso crescente de biocombustíveis avançados, com menores níveis de emissões (NYKO et al, 2010; DOE, 2016).

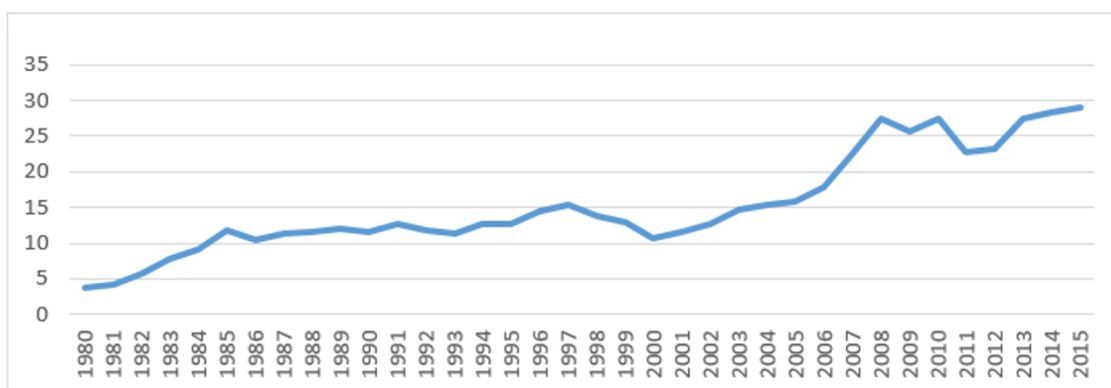
Figura 8 Produção de etanol nos EUA (em bilhões de litros)



Fonte: SOARES, 2016; RFS, 2016.

Já no Brasil, o início dos anos 2000 reverteu a tendência de estagnação da produção de etanol (Figura 10) a partir de incentivos governamentais: a criação da CIDE (Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico) – imposto federal que incidiu sobre a importação de combustíveis (2001); a chamada Lei do Álcool que determinou maior tributação da CIDE sobre a gasolina em relação ao etanol (2002) e a determinação do aumento do percentual de etanol na mistura com gasolina para 20% posteriormente elevado para 25%).

Figura 9 Produção de etanol no Brasil (em bilhões de litros)



Fonte: UNICADATA, 2016; NOVACANA, 2016; SOARES, 2016.

Outro fator determinante para o aumento na produção de etanol foi a introdução dos carros *flex* no Brasil a partir de 2003, os quais podem usar qualquer proporção de etanol e gasolina. Em 2005, as vendas de carros *flex* no Brasil já estavam acima de 80% do total de veículos novos comercializados, até alcançar 88% do total das vendas em 2015 (ANFAVEA, 2016).

Os crescentes aumentos nos volumes de produção de etanol, em resposta às pressões sociais pela redução das emissões dos GEE e ao conjunto dos incentivos governamentais, trouxeram consigo, questões sobre o uso da terra, da água e de fertilizantes agroquímicos necessários à sua produção e quais seriam seus impactos sobre a produção de alimentos e sobre toda a cadeia agrícola. Houve uma preocupação especial recaindo sobre o risco de falhas no abastecimento de alimentos (ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016). Entretanto, tanto as pressões ambientais quanto os incentivos governamentais que estimularam o aumento na produção do etanol a partir do milho e da cana-de-açúcar (nos casos dos EUA e Brasil, respectivamente), também estimularam o desenvolvimento de tecnologias para sua produção a partir de matérias-primas alternativas. Entre as diversas matérias-primas estudadas, a biomassa residual era a única com potencial para abastecer não apenas a demanda crescente de produção de biocombustíveis, mas também a indústria de geração de energia elétrica, através de processos de alta eficiência (SOCCOL et al., 2016).

Diferentes tipos de biomassa já eram estudados para a produção de biocombustíveis com destaque para os materiais lignocelulósicos residuais, além de algas e microalgas. Com a entrada desses materiais alternativos na pauta de produção de combustíveis, o etanol produzido diretamente a partir de plantas que contém amido ou açúcar (milho ou cana-de-açúcar, respectivamente) ficou conhecido como etanol de primeira-geração (E1G) e o produzido a partir de materiais lignocelulósicos, como os resíduos agroflorestais e agrícolas, chamado de etanol celulósico ou etanol de segunda-geração (E2G). O etanol produzido a partir de algas ou microalgas é chamado de etanol de terceira-geração (SOCCOL et al., 2016).

3.4 As biomassas lignocelulósicas e a produção do E2G – 2006 a 2008.

Considerando apenas suas estruturas físico-químicas, qualquer biomassa vegetal poderia ser utilizada para a produção do E2G. Mas para que ela possa atender às demandas socioambientais, é necessário que, além de sua alta disponibilidade e baixo

custo, elas também não causem impactos na produção de alimentos (commodities), e que seu processamento resulte em um balanço energético positivo. Dessa forma, esse amplo universo se restringe a uma variedade menor, sendo que os tipos mais estudados e utilizados têm sido: a palha do milho, palha do trigo e palha e/ou bagaço de cana (SOARES, 2016).

Cada um desses tipos de biomassa possui suas especificidades, mas são, basicamente, formados por celulose (um polímero de unidades de glicose ligadas com uma estrutura cristalina), hemicelulose (um polímero composto por diferentes frações de unidades de glicose, galactose, manose, xilose e arabinose apresentadas na forma amorfa) e lignina, que fornece proteção contra degradação química e biológica (DOS SANTOS et al, 2016). Um dos principais desafios esperados para a produção de biocombustíveis a partir desse tipo de biomassa, e que demandou inúmeras frentes de pesquisa, foi sua recalcitrância, que dificultaria a obtenção dos açúcares de seus componentes principais devido às estruturas complexas e rígidas das paredes celulares das plantas (DOS SANTOS et al, 2016, SOLOMON et al, 2017).

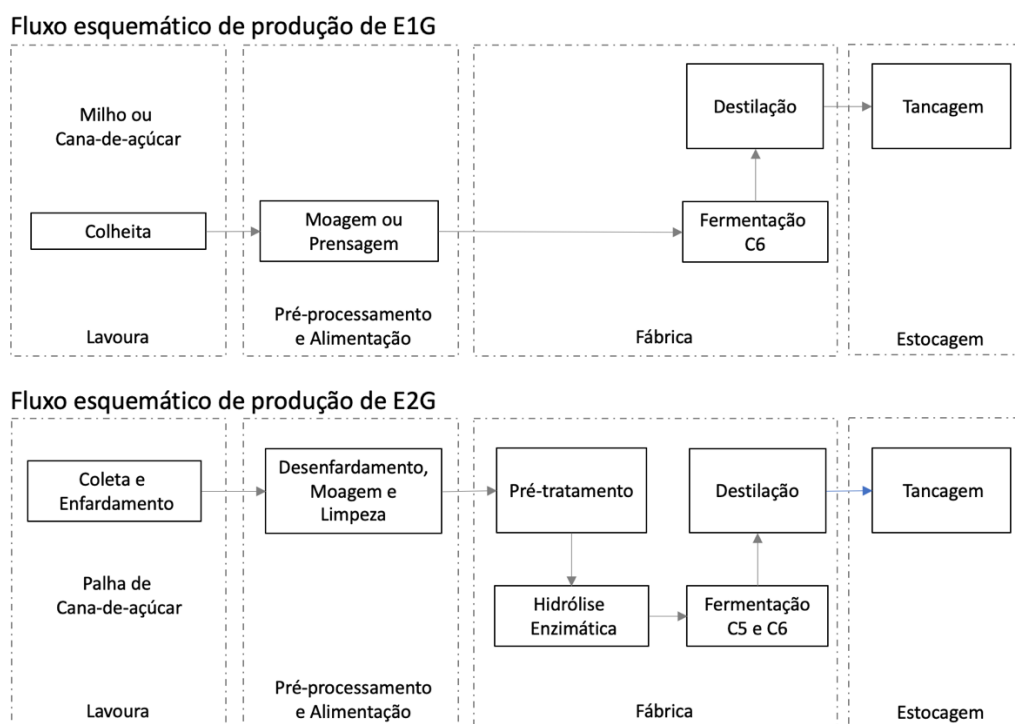
Entretanto, além das dificuldades de sua conversão, a biomassa lignocelulósica tem características peculiares que demandam uma atenção específica: é um material complexo, em geral, fibroso e de baixa densidade, o que torna seu transporte e manuseio ineficientes. O teor variável de umidade no momento da colheita, além de poder torná-la passível de degradação, pode dificultar tanto as operações de transporte e manuseio quanto de armazenamento e pré-processamento (WYMAN, 1999 e SOCCOL et al, 2016).

As duas principais tecnologias utilizadas para produzir etanol combustível de primeira geração (E1G) já eram completamente dominadas e tinham como matéria-prima o milho e a cana-de-açúcar. A primeira delas, amplamente utilizada nos EUA e já em produção também no Brasil, consiste na conversão da parte amilácea do milho em etanol por meio das etapas de: moagem, liquefação, sacarificação, fermentação, destilação e desidratação (SOLOMON et al, 2007). Quando a cana-de-açúcar é utilizada (como na maioria das usinas no Brasil), as etapas necessárias são: moagem, prensagem, fermentação e destilação, além da desidratação no caso da produção de etanol anidro a ser misturado na gasolina (SOLOMON et al., 2007).

Para a produção do E2G, o material lignocelulósico a ser utilizado como matéria-prima pode ser extraído da palha (cana-de-açúcar ou milho) ou de outras partes residuais como: talo e espiga, no caso do milho, e bagaço, no caso da cana-de-açúcar. No caso de

uso de palha como matéria-prima, a produção do E2G começa com a coleta da matéria-prima residual lignocelulósica e seu transporte para o local da planta através de fardos. Na entrada da unidade industrial, a matéria-prima é desenfundada e submetida a uma etapa de pré-processamento (por exemplo, trituração, moagem e remoção de impurezas) que irá depender do tipo de biomassa e do tamanho e formato das fibras. A partir daí, a biomassa pré-processada segue por diversos tipos de transportadores até alimentar o reator de pré-tratamento: uma etapa de processo que quebra a resistência da lignina e torna a celulose e a hemicelulose acessíveis ao processo de hidrólise enzimática que irá cortar os polissacarídeos em açúcares mais simples (CALDERON; ARANTES, 2019). A corrente resultante dessas etapas, além dos açúcares, contém também diferentes subprodutos, a depender da matéria-prima e do tipo de pré-tratamento, que podem também agir como inibidores ou se apresentarem como componentes tóxicos para a etapa de fermentação, que vem a seguir (NOGUÉ, 2014). A última etapa, de destilação, se assemelha aos processos de produção do E1G (Figura 11).

Figura 10 Comparação dos fluxos esquemáticos de produção para E1G e E2G



Fonte: Elaboração própria

Os principais fatores técnicos que tornam desafiadora a conversão de biomassas lignocelulósicas em etanol são: a natureza resistente da lignina à degradação e a quebra ineficiente de celulose e hemicelulose com uma grande variedade de açúcares liberados

dos polímeros de carboidratos. Essa quebra ineficiente pode ocorrer devido à complexidade da hemicelulose e ao grande número de enzimas necessárias para hidrolisá-la. Múltiplos compostos formados ou liberados durante as etapas de pré-tratamento e hidrólise podem inibir a própria hidrólise ou a etapa de fermentação (CALDERON; ARANTES, 2019). Desde o início dos anos 2000, as principais barreiras técnicas enfrentadas para produção de bicompostíveis a partir de material lignocelulósico estavam nas etapas de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação (KARIMI, 2015). Essas três etapas de processamento se tornaram os focos de desenvolvimento tecnológico para pesquisadores e desenvolvedores (CALDERON; ARANTES, 2019).

A etapa de pré-tratamento³ é vital para a viabilidade econômica da produção do E2G. Variáveis como: rendimento (kg de açúcares por kg de biomassa seca não tratada); concentração (kg de açúcares por litro da solução de hidrolisado); taxa de produção de açúcares (por litro de hidrolisado por hora) e carga de enzima (por kg de biomassa seca não tratada), são fundamentais na escolha da rota de pré-tratamento a ser utilizada para cada tipo de matéria-prima e terão uma forte relação com a etapa de hidrólise enzimática. (DALE; ONG, 2012). Um pré-tratamento eficaz e econômico deve produzir fibras celulósicas reativas ao ataque enzimático, minimizar a demanda de energia e evitar tanto a destruição de componentes celulósicos e hemicelulósicos quanto a formação de possíveis inibidores. Diversos métodos já foram utilizados com esses fins sendo que os principais são classificados principalmente em: pré-tratamento físico, pré-tratamento químico, pré-tratamento físico-químico e pré-tratamento biológico (AKHTAR, 2015). Em cada um desses métodos, várias tecnologias foram desenvolvidas, ou ainda estão em desenvolvimento, a depender do tipo de matéria-prima a ser utilizado, do coquetel enzimático e dos processos de fermentação.

Entre os tipos de pré-tratamentos físicos, pode-se citar: cominuição (moagem) mecânica; irradiação; extrusão; pirólise e campo elétrico pulsado. Entre os pré-tratamento químicos pode-se citar: tratamento ácido; hidrólise alcalina; organosolv, oxidação ou líquidos iônicos. Entre os tratamentos físico-químicos, pode-se citar: explosão a vapor ou auto-hidrólise; pré-tratamento por amônia; por fluido supercrítico; pré-tratamento

³ Os desafios enfrentados no desenvolvimento dos processos de conversão da biomassa lignocelulósica em etanol de segunda geração – pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação, foram apresentados apenas resumidamente nessa seção, já que não são objeto dessa pesquisa. As referências apresentadas podem ser consideradas uma fonte inicial para o aprofundamento dessas questões.

térmico; ultrassom ou por micro-ondas. Por fim, entre os pré-tratamento biológicos, pode-se utilizar: fungos ou bactérias. Além desses, também são estudados tipos combinados de pré-tratamento como: pré-tratamento térmico combinado com ácido ou com uso de SO₂; explosão a vapor combinado com SO₂ ou com oxidação úmida, ou com peróxido alcalino ou ainda com moagem ultrafina; organosolv combinado com ácido diluído; entre alguns outros (GARCIA, 2014; AKHTAR, 2015).

A hidrólise enzimática também sempre é considerada chave em todo o processo de bioconversão da matéria-prima lignocelulósica em etanol, pois é uma etapa que consome tempo e energia sendo, assim, fundamental na produtividade e na composição dos custos globais do processo. A composição de coquetéis de enzimáticos combina celulases, hemicelulases e outras enzimas acessórias, para catalisar a hidrólise dos componentes celulósicos e hemicelulósicos da biomassa. Esse processo que transforma celulose e hemicelulose em açúcares pode ser considerada uma das partes essenciais dessa tecnologia. Vale destacar que em função da natureza recalcitrante das fibras da biomassa o processo pode exigir altas cargas enzimáticas, sendo fundamental na rentabilidade da produção do E2G (GUSAKOV, 2013; ECKARD, 2015; E4TECH; RE-CORD; WUR, 2015; SINGHANIA, 2015).

Vários fatores interferem na hidrólise enzimática. Desde a composição da biomassa utilizada e o tipo pré-tratamento até as diversas características do coquetel enzimático utilizado e de variáveis do processo como: a termo estabilidade de enzimas, a concentração e adsorção de enzimas no substrato, a concentração de substrato, tempo de residência e o pH no meio, bem como temperatura e taxa de agitação (BEZERRA et al, 2020). Para converter a celulose e a hemicelulose em açúcares C6 e C5 é necessário o uso de coquetéis que combinam uma ampla gama de atividades e propriedades, como celulases, hemicelulases e b-glicosidases. A maioria das enzimas usadas na conversão em açúcares são de origem microbiana, mas ligadas a outros hospedeiros que não o seu nativo, ou seja, são manipuladas (VALDIVIA, 2016). O custo unitário de contribuição do coquetel enzimático sobre o custo total de produção do E2G é considerado elevado e muito esforço foi dedicado ao melhoramento do desempenho desses coquetéis. Esses esforços incluem: redução da carga enzimática, melhorando a atividade enzimática através da engenharia genética; redução do custo da proteína através de melhores metodologias de produção e aumento do rendimento global de hidrólise, adaptando o desempenho do coquetel de enzimas às condições do processo (VALDIVIA, 2016).

Os impactos dessa etapa do processo de produção de E2G seguem à montante da cadeia de produção das enzimas, já que impactam também desenvolvimentos de novos fungos produtores de enzimas (GUSAKOV, 2013). Desde a década de 1970, o *Trichoderma reesei* tem sido considerado o mais poderoso destruidor de celulose entre os micróbios degradadores de biomassa. As preparações comerciais desse fungo são produzidas há muito tempo por muitas empresas em diferentes países. Mais recentemente, outros fungos têm apresentado desempenhos comparáveis com o *T. reesei*, como as celulases das espécies *Penicillium* ou *Acremonium* ou o *Myceliophthora thermophila* CI (GUSAKOV, 2013), apesar de, atualmente, a preparação comercial de enzimas disponíveis para a hidrólise da biomassa lignocelulósica ainda ser produzida por meio da fermentação de cepas geneticamente modificadas de *Trichoderma reesei* (BEZERRA et al, 2020).

Embora coquetéis enzimáticos capazes de hidrolisar a celulose e a hemicelulose já estejam disponíveis para ser utilizada na conversão de biomassa lignocelulósica em escala industrial, seus custos ainda precisam ser otimizados para garantir uma produção mais competitiva do E2G. Novos extratos enzimáticos obtidos de diferentes cepas continuaram sendo estudados, com o objetivo principal de reduzir os custos do processo. No entanto, a hidrólise enzimática em escala industrial ainda apresenta muitos desafios que precisam ser superados em termos de eficiência, custos, dosagem, tempo de residência e configuração do processo. Portanto, tempos de residência, altas concentrações de sólidos e dosagens de enzimas devem ser melhorados para alcançar maiores rendimentos que contribuam, cada vez mais para a viabilidade econômica da produção do E2G (BEZERRA et al, 2020).

A etapa de fermentação também carrega uma complexidade destacada entre as pesquisas de produção do E2G. Diferentes açúcares podem ser gerados nas etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática, com destaque para a xilose, que não faz parte dos processos de E1G, e cuja fermentação aumenta significativamente o rendimento total do processo. A fermentação dos açúcares pode acontecer após a hidrólise, em uma configuração conhecida como SHF (hidrólise e fermentação separadas) ou simultaneamente, em uma outra configuração chamada de SSF (sacarificação e fermentação simultâneas). Ou ainda em configurações mistas. As múltiplas combinações de escolha de matéria-prima, configurações de processo e pré-tratamento geram uma

diversidade de composições de hidrolisado que incluem também subprodutos que podem funcionar como inibidores para o próprio processo de fermentação (NOGUÉ, 2014; KARIMI, 2015; E4TECH; RE-CORD; WUR, 2015).

As principais questões que precisam ser otimizadas na etapa de fermentação para a produção do E2G são: a robustez da levedura geneticamente modificada, a taxa de consumo de xilose, a tolerância do inibidor, o custo do meio de cultura e a configuração do processo. Para que esse processo seja bem-sucedido, é essencial uma combinação de uma cepa de levedura robusta com uma configuração de processo de fermentação bem projetada. Devido à estreita relação entre hidrólise e fermentação, essas etapas do processo de produção precisam ser projetadas em conjunto, pois além de se definir as configurações dos processos (SSF ou SHF, entre outros), é preciso avaliar os sólidos totais gerados no processo de hidrólise (DOS SANTOS et al, 2016). O material hidrolisado contém sólidos insolúveis (lignina e açúcares insolúveis) que podem ser separados do processo produtivo antes ou depois da fermentação ou ainda após a etapa final de destilação. Essa definição é outro importante fator que define a configuração do processo. Tanto na definição do processo de fermentação, em si, quanto na produtividade total da conversão de biomassa em E2G, já que a manutenção de açúcares insolúveis até a etapa de destilação pode evitar perda de açúcares fermentescíveis que poderiam ser convertidos a etanol (DOS SANTOS et al, 2016).

Conforme dito anteriormente, os principais componentes das matérias-primas lignocelulósicas são celulose, hemicelulose e lignina, e sua composição relativa em cada matéria-prima varia. Nas matérias-primas mais comumente usadas, o glucano é o principal polissacarídeo constituindo 33-51% da matéria seca, sendo a fração de xilana a que tem uma maior variação, dependendo do tipo de matéria-prima (NOGUÉ, 2014). Assim sendo, a fermentação da fração de xilana hidrolisada pode ser responsável pelo aumento significativo do rendimento total de etanol. Na fermentação, a complexidade do substrato desempenha um papel importante no desempenho geral do processo e, no caso da xilose, a taxa de fermentação ainda permanece menor do que para a glicose. Apesar de vários anos de desenvolvimento, experimentos com hidrolisados lignocelulósicos ainda geram resultados inesperados devido à presença de inibidores, uma vez que variam muito em composição.

Dessa forma, o desenvolvimento de linhagens de leveduras capazes de fermentar todos os açúcares hexose e pentose em ambientes altamente inibitórios tão eficientemente quanto a glicose, mantém o processo de fermentação como um dos grandes desafios para o desenvolvimento de processos de produção do E2G, junto com a evolução das etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática.

Apesar dos desenvolvimentos realizados nessas etapas de conversão até o final da primeira década dos anos 2000, terem avançado a ponto de apontar para uma queda significativa nos custos de enzimas, a maioria das tecnologias para produção de biocombustíveis de 2ª geração ainda estava começando a sair das escalas de laboratório, em um estágio pré-comercial, e abrindo perspectivas para entrar no mercado nas décadas seguintes, se os investimentos correspondentes (P&D, infraestrutura) viessem a ser realizados (CHERUBINI, 2010; E4TECH; RE-CORD; WUR, 2015). Ainda era necessário levar as tecnologias da escala de laboratório para escalas piloto e de demonstração, visando simular condições que seriam encontradas quando viessem a ser utilizadas em plantas industriais (SOLOMON et al, 2007).

3.5 Os incentivos para produção do E2G – 2008 a 2012.

Em fevereiro de 2008, o Departamento de Energia (DOE) dos EUA, aumentou o estímulo ao desenvolvimento de pesquisas para produção de biocombustíveis celulósicos ao tornar pública a criação de três Centros de Pesquisa sobre Bioenergia com o objetivo de enfrentar os desafios tecnológicos impostos pelo seu desenvolvimento (DOE, 2008). Além da etapa de extração de biomassa, com a busca da identificação de sequências de DNA, de novos genes e caminhos de aumento da produtividade e facilidade de degradação das culturas, as etapas de processo que iriam concentrar os esforços de pesquisa e desenvolvimento dos três centros eram: pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação além de estudos sobre a integração de processos entre essas três etapas.

Em minha opinião, os biocombustíveis avançados oferecem uma promessa tremenda de ajudar nossa nação a trazer um futuro de energia limpa, segura, confiável e acessível... O estabelecimento de três Centros de Pesquisa de Bioenergia no Departamento de Energia ... visa cumprir a meta de tornar o etanol celulósico competitivo em termos de custo com as fontes tradicionais de energia até 2012... O importante trabalho que está sendo realizado nesses centros - tornando a produção de biocombustíveis mais eficiente, menos custosa e comercialmente viável - pode mudar a maneira como pensamos sobre a biotecnologia e transformar a forma como impulsionamos esta nação. (Samuel Bodman – Secretário do Departamento de Energia dos EUA – DOE, 2008, p. 3, tradução nossa).

Seguindo na mesma linha dos EUA, em 2009 a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) reforçou a direção na busca do desenvolvimento de combustíveis celulósicos ao publicar o relatório *The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy*, com um conteúdo que incluiu a “produção de biocombustíveis de alta densidade energética a partir da cana-de-açúcar e de fontes celulósicas de biomassa”, entre as tecnologias com alta probabilidade de chegar ao mercado até 2030 e que deveriam ser suportadas por políticas públicas (OCDE, 2009).

Impulsionadas pela necessidade de substituir parcialmente os combustíveis fósseis, aproximadamente 50 empresas se engajaram nos desenvolvimentos de tecnologias para a produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas lignocelulósicas. Em 2010, a IEA *Bioenergy Task 33* (BACOVSKY et al, 2010) produziu uma listagem com 150 projetos em 15 países, dos quais 66 projetos estavam em fase de execução considerando a utilização de diversos tipos de matérias-primas. A maioria deles nos Estados Unidos e na Europa e previam instalações em escala piloto e de demonstração (BALAN; CHIARAMONTI; KUMAR, 2013). Dos 66 projetos, 37 foram classificados como utilizando rota bioquímica, 23 pela via termoquímica e 6 utilizavam algum tipo de combinação destas (tecnologia híbrida). Diversos tipos de matérias-primas foram utilizados nesses 37 projetos, incluindo resíduos agrícolas, madeira e resíduos de madeira da silvicultura e produtos florestais, culturas energéticas dedicadas e resíduos sólidos urbanos. A maioria das tecnologias em desenvolvimento incluía pré-tratamento por explosão de vapor ou por tratamento ácido, seguido de hidrólise enzimática e fermentação. As enzimas geralmente eram fornecidas pela Novozymes, além de empresas como a Iogen e a Mascoma que também produziam suas próprias enzimas. O projeto da POET integrava a produção de etanol a partir de espigas de milho em uma usina existente utilizando parte da biomassa coletada para produção de energia. O projeto da Abengoa também combinava a produção de etanol com cogeração de biomassa (BACOVSKY et al, 2010).

No Brasil, em 2011, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), ligado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ligada ao Ministério de Ciência e Tecnologia lançaram, o Plano de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS). Com oferta de financiamento a baixo custo e

de recursos não reembolsáveis. O plano buscava fomentar iniciativas empresariais de P&D em temas relacionados à conversão da biomassa da cana-de-açúcar em E2G e outros produtos. Outra iniciativa que buscava organizar o apoio técnico e financeiro à atividades de P&D foi o Programa de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). O BIOEN visava estimular e articular atividades de P&D no país para promover o avanço do conhecimento e sua aplicação em áreas relacionadas à produção de bioenergia no Brasil (MILANEZ et al, 2015).

O PAISS, visava fomentar as atividades de inovação com foco comercial, desenvolvidas por empresas enquanto o BIOEN, apoiava as atividades com viés majoritariamente acadêmico, apesar de haver a possibilidade de pesquisa cooperativa entre a academia e o setor privado. Ambos os casos, tratava de políticas de inovação voltadas à oferta (MILANEZ et al, 2015).

Dois anos depois, em 2012, havia 15 plantas piloto e 6 em escala de demonstração já operando e diversas outras em construção com prazos de conclusão para os anos seguintes. Entre elas, pode-se destacar as plantas piloto e demonstração de Abengoa e Clariant, que já estavam operando e que seriam a base para a construção de suas plantas de produção de E2G em escala comercial.

Testes conduzidos em plantas de demonstração são fundamentais para especificar as condições de processo adequadas. São etapas que contribuem para explorar tecnologias emergentes em condições do “mundo real” e facilitam a implantação das tecnologias em escala industrial (HEDELER, 2020).

As etapas de desenvolvimento de novas rotas tecnológicas em plantas piloto e de demonstração representam pontes entre a geração de conhecimento básico e suas aplicações em escala industrial (FRISHAMMAR et al, 2015). Uma planta piloto pode ser definida como uma instalação não integrada, que opera de forma descontínua e demonstra parcialmente a viabilidade de uma tecnologia. Uma planta de demonstração é definida como uma planta que pode ser operada continuamente por um longo período e que integra todo o processo de produção. Essas plantas geralmente se equilibram entre a verificação de tecnologias e a viabilização de sua utilização em escala comercial. As atividades de desenvolvimento que ocorrem em plantas piloto e de demonstração abordam não apenas desafios puramente técnicos, mas também reduzem os riscos e incertezas organizacionais,

de mercado e institucionais que os principais interessados enfrentam no avanço de novas tecnologias (HELLSMARK et al, 2016).

A planta piloto atua na verificação dos desenvolvimentos feitos em escala laboratorial para testar, avaliar e caracterizar uma tecnologia para uma aplicação específica, reduzindo o risco técnico e criando conhecimentos científicos e práticos que podem ser aplicados em uma escala maior. A planta de demonstração cria conhecimentos através de uma planta de referência em escala grande, mas não necessariamente ótima e verifica a aplicação da tecnologia para seu uso em escala industrial. Os testes em escala de demonstração visam melhorar o desempenho e reduzir custos acumulando experiência operacional, estimulando a inovação incremental e aumentando a eficiência ao longo das diversas etapas do processo. É importante para reduzir os riscos técnicos e, também, riscos de mercado e organizacionais (HELLSMARK et al, 2016).

Passar do laboratório para o estágio de piloto é fundamental para melhorar a compreensão do processo. Essa etapa de *scale-up* demanda o uso de equipamentos totalmente diferentes do laboratório, com materiais que podem suportar pressões e temperaturas altas, bem como testando o uso de bombas, compressores, tubulações e recipientes de grande escala. (ROSENBERG; STEINMULLER 2013). Os testes em escalas maiores, principalmente escala de demonstração, são geralmente muito mais caros do que as atividades de laboratório e piloto, mas são muito mais confiáveis. A maioria dos projetos de desenvolvimento não deveria contornar essa etapa, porque ela pode ser a única opção para testar o processo completo como um sistema fechado (LAGER 2000 apud FRISHAMMAR et al, 2015). Principalmente em casos de tecnologias emergentes como nas biorrefinarias (HEDELER, 2020). É através da evolução das etapas laboratório, piloto e demonstração que se pode avaliar o quanto a tecnologia está madura.

O TRL – *Technology Readness Level* (Nível de Maturidade Tecnológica) é um sistema métrico que suporta tanto avaliações da maturidade de uma tecnologia específica quanto a comparação consistente de maturidade entre diferentes tipos de tecnologia. É um conceito introduzido na década de 1970 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration* dos EUA), que permite uma avaliação mais eficaz sobre o nível de maturidade de novas tecnologias, independente da disciplina a ser analisada (MANKINS, 2009). Apesar de a escala TRL ter sido elaborada originalmente para avaliação de tecnologias aeroespaciais, ela tem sido utilizada em diversos outros setores como defesa, energia, óleo & gás, e biomedicina para citar apenas alguns, de acordo com as

características e particularidades de cada área. Em 2017, na elaboração de seu Modelo de Inovação e Negócios, a Embrapa adaptou o modelo de avaliação de escala TRL à sua área de atuação dentro dos seguintes eixos: biomassas para fins industriais; biotecnologia industrial, química de renováveis e materiais renováveis (CAPDEVILLE; ALVES; BRASIL, 2017). O Quadro 11 apresenta as descrições gerais de cada nível da escala TRL a serem aplicados no eixo Biotecnologia Industrial:

Quadro 2 Níveis de maturidade tecnológica – TRL (EMBRAPA)

Escala TRL	Escala / Fase	Fidelidade / Configuração do Objeto	Ambiente	Descrição: Biotecnologia Industrial Ex.: Produção de ácido Succínico
1	Conceitual	Descrição	Teórico	Formulação de hipótese: Ex.: É possível produzir ácido Succínico a partir de xilose utilizando leveduras geneticamente modificadas.
2	Conceitual	Descrição	Teórico	Construção do projeto/ Plano de trabalho detalhado.
3	Laboratório / Pré-melhoramento	Componentes físicos isolados	Simulado	Início da experimentação: Identificação de sequências genéticas, síntese e transformação em levedura. Demonstração experimental em escala laboratorial da produção de ácido Succínico.
4	Laboratório / Melhoramento	Componentes físicos isolados	Simulado	Desenvolvimento: Otimização do processo de produção, por meio de melhorias em: i) meio de cultura; ii) condições de fermentação; iii) genética da linhagem.
5	Laboratorial / Melhoramento	Similar (Configuração corresponde à aplicação final em quase todos os aspectos.)	Relevante (Ambiente de teste que utiliza os aspectos fundamentais do ambiente operacional.)	Desenvolvimento: Otimização do processo de produção utilizando todos os reagentes/ insumos industriais (Exemplo: hidrolisado de bagaço de cana) realizado em biorreator em pequena escala.
6	Piloto /Melhoramento	Similar (Configuração corresponde à aplicação final em	Relevante (Ambiente de teste que utiliza	<i>Scale-up</i> : Otimização do processo de produção utilizando todos os reagentes/ insumos

		quase todos os aspectos. Aproximadamente 1/10 da escala final, mas pode ser menor dependendo da aplicação.)	os aspectos fundamentais do ambiente operacional.)	industriais (Exemplo: hidrolisado de bagaço de cana) realizado em escala piloto.
7	Final / Pós-melhoramento	Similar (Configuração corresponde à aplicação final em quase todos os aspectos)	Operacional (Ambiente que aborda todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto)	Demonstração: Demonstração em escala final com matérias-primas e reagentes industriais. Obtenção de aprovações regulatórias, testes para avaliação do potencial impacto ambiental e certificações.
8	Final / Pós-melhoramento	Idêntico (Corresponde à aplicação final em todos os aspectos)	Operacional (Ambiente que aborda todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto)	Operação: Produção em escala final com condições ótimas de processos.
9	Final / Pós-melhoramento	Idêntico (Corresponde à aplicação final em todos os aspectos)	Operacional (Ambiente que aborda todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto)	Comercialização: Produto no mercado

Fonte: Capdeville, Alves e Brasil, 2017

Entre os 50 principais depositantes de patentes sobre tecnologias de produção de biocombustíveis, se encontravam universidades de diversas partes do mundo como a *University of California* (EUA), a *Tsinghua University* (China), e o *Institute Francais du Petrole* (França). Entre eles também estavam de empresas dos mais diversos portes e dos mais diversos setores, como: BP, Chevron, Shell, Exxon e Petrobras, do setor de produção de petróleo; a Toyota do setor automobilístico; BASF, Celanese, Dow, DuPont e Mitsui do setor químico, e DSM, Gevo, Novozymes e Xyleco da indústria de biotecnologia, entre tantos outros (ANDERS, 2016). Indicando que, antes que a primeira planta de produção de E2G fosse anunciada, havia uma grande variedade de interessados nessa nova indústria, vindos de diversos setores tradicionais.

3.6 As plantas pioneiras do E2G – 2013 a 2016.

Em 2013, a Beta Renewables (Itália), subsidiária da Chemtex (EUA), e do Grupo M&G (Itália), anunciou ter completado a construção da primeira planta comercial de produção de E2G: foi instalada em Crescentino na Itália e projetada para produzir 75 milhões de litros de etanol por ano a partir de palha de arroz, palha de trigo e Arundo donax. A Chemtex e o Grupo M&G investiram no desenvolvimento da tecnologia PROESA para as etapas de pré-tratamento e hidrólise que utilizava um coquetel enzimático fornecido pela Novozymes (Dinamarca). A etapa de fermentação permitia a conversão dos açúcares C6 e C5 (oriundos da hidrólise das moléculas de celulose e de hemicelulose) em etanol. Logo no ano seguinte, a segunda planta foi anunciada: em setembro de 2014, a POET-DSM Advanced Biofuels, uma *joint venture* entre Royal DSM (Holanda) e POET, LLC (EUA), iniciou a operação de sua planta de E2G, associada a uma planta tradicional de etanol de milho em Emmetsburg, Iowa, EUA. O chamado *Project Liberty*, tinha uma capacidade projetada para produzir 94,5 milhões de litros de etanol por ano à base de palha de milho, com tecnologia própria e, a intenção de expandir seu consumo de biomassa para sabugo e pontas, folhas e cascas oriundos dos resíduos de milho. A primeira planta de produção de E2G no hemisfério sul foi a da GranBio, chamada de Bioflex 1, projetada para produzir 82 milhões de litros de etanol por ano a partir da palha de cana-de-açúcar, que também entrou em operação em setembro de 2014, em São Miguel dos Campos, Alagoas, Brasil, com a tecnologia adquirida da Beta Renewables. A unidade foi instalada junto à Usina Caeté, que produz E1G. As duas plantas, construíram, em conjunto, um sistema de cogeração de vapor e energia elétrica alimentado por subprodutos das plantas E1G e E2G (bagaço de cana e lignina). Em outubro do mesmo ano, foi a vez da fábrica da Abengoa (Sevilha, Espanha), projetada para produzir 95 milhões de litros de etanol por ano utilizando resíduos de palha de milho que começou a operar em Hugoton, KS, EUA. Ela usava resíduos de palha de milho e tecnologias próprias para converter biomassa em etanol, incluindo os processos de pré-tratamento e hidrólise enzimática. A Raízen (São Paulo, Brasil), uma *joint venture* entre a Royal Dutch Shell (Haia, Países Baixos) e a empresa brasileira Cosan (São Paulo), inaugurou em 2015 uma planta para produzir 40 milhões de litros de etanol por ano em Piracicaba, São Paulo. A usina está localizada ao lado da Usina Costa Pinto (E1G) e usa a tecnologia da Iogen Energy testada nas instalações de demonstração da Iogen em Ottawa, Canadá. A unidade Raízen, que é a segunda usina de etanol celulósico no

hemisfério sul, foi projetada para o uso de bagaço de cana e palha como matéria-prima e enzimas fornecidas pela Novozymes. Em outubro de 2015, a DuPont inaugurou a maior planta de etanol celulósico do mundo em Iowa, Nevada com uma capacidade de quase 120 milhões de litros de etanol por ano a partir da palha e de outros resíduos de milho (DOS SANTOS et al, 2016; VALDIVIA, 2016 e CALDERON; ARANTES, 2019, NOVACANA, 2016; PENALVA SANTOS, 2023).

As plantas da POET-DSM, Abengoa, Raízen e DuPont optaram por tecnologia de pré-tratamento químico sendo as três primeiras com ácido diluído e a DuPont com tratamento alcalino. Beta Renewables e GranBio se definiram por um pré-tratamento termoquímico por *steam explosion*. Os principais fornecedores dos equipamentos e tecnologia para o pré-tratamento foram a Andritz e a Valmet, oriundos do setor de papel & celulose, já habituados a trabalhar com biomassa (cavaco de madeira). A Novozymes forneceu o coquetel enzimático para a etapa de hidrólise nas plantas da Beta, GranBio e Raízen enquanto Abengoa utilizou enzimas da Dyatic. DuPont e DSM se utilizaram de insumos de sua própria tecnologia para a etapa de hidrólise enzimática. Para a etapa de fermentação, a DSM forneceu as leveduras utilizadas em sua planta de parceria com a POET e, também, para a planta da GranBio. A Beta utilizou leveduras da Leaf Technologies enquanto DuPont e Abengoa se utilizaram de tecnologias próprias para essa etapa, conforme Quadro 2:

Quadro 3 Principais fornecedores das plantas de etanol celulósico

	Raízen	GranBio	Poet/DSM	Beta	DuPont	Abengoa
Pré-tratamento	Iogen	Beta	Andritz	Beta	DuPont	Abengoa
	Ácido diluído	Explosão a vapor	Ácido diluído	Explosão a vapor	Alcalino	Ácido diluído
Enzimas	Novozymes	Novozymes	DSM	Novozymes	DuPont Danisco	Dyalic
Leveduras	Iogen	DSM	DSM	Leaf Technologies	DuPont	Abengoa
Matéria-prima	Bagaço de cana	Palha de cana	Palha de milho	Palha de trigo	Palha de milho	Palha de milho

Fonte: NovaCana, 2016

3.7 Os problemas operacionais nas biorrefinarias – 2016 a 2019

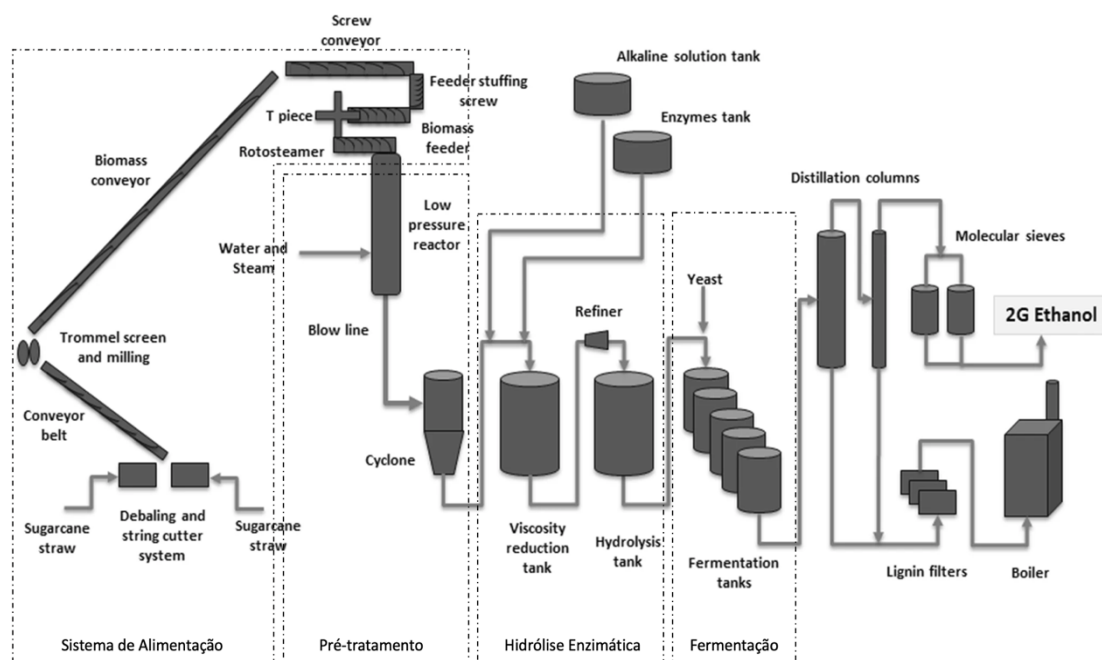
3.7.1 Os desafio operacionais e o fechamento de plantas do E2G

Após aproximadamente um ano de operação, nenhuma das plantas pioneiras havia

conseguido alcançar e estabilizar sua produção nas condições de projeto.

Por se tratar de plantas *first-of-a-kind*, era esperado que alguns desafios ainda pudessem surgir nas etapas de conversão da biomassa, quando operadas em larga escala: tanto na eficiência do pré-tratamento quanto no custo operacional das enzimas, na hidrólise e na capacidade das leveduras em converter açúcares C5 e C6, na fermentação (VISWANATHAN, 2015; GUSTAFSSON, 2015; AKHTAR, 2016 e DOS SANTOS et al, 2016). Entretanto, enquanto alguns problemas eram esperados, outros parecem não ter sido previstos: as dificuldades de manuseio e armazenamento de biomassa celulósica, por exemplo, parecem ter sido subestimadas. A maioria dos equipamentos dos sistemas de alimentação do pré-tratamento das unidades (Figura 12) operou muito abaixo da capacidade projetada e sem continuidade, devido a entupimentos, incrustações e acúmulo de material, além de problemas de erosão e corrosão nos equipamentos (DALE, 2017; CNPEM, 2018).

Figura 11 Esquema de produção de E2G a partir da palha de cana



Fonte: Bezerra et al, 2020

Os problemas envolvendo tecnologias e equipamentos utilizados nas plantas pioneiras e sua falta de capacidade de operar nas condições de projeto saíram do âmbito industrial e chegaram aos tribunais em casos como: o da Andritz, fabricante de equipamentos do setor de papel & celulose contra a Biochemtex por suposta cópia de projetos (ANDRITZ, 2016), da POET contra a mesma Andritz alegando que os equipamentos fornecidos não atingiam as capacidades de projeto (POET, 2018) e da

GranBio contra a Biochemtex e o Grupo M&G alegando que a tecnologia de pré-tratamento não atingiu a capacidade projetada (VALOR ECONÔMICO, 2018).

Ainda em 2016, depois de experimentar dificuldades financeiras, a Abengoa declarou falência e encerrou as operações de sua planta de bioetanol. Também em 2016, a GranBio suspendeu as operações de sua planta devido a dificuldades técnicas na etapa de pré-tratamento que causaram um colapso no sistema. Em 2018, a Clariant anunciou o uso do sistema de pré-tratamento BioTrac da Valmet (empresa finlandesa fornecedora de tecnologias e equipamentos para as indústrias de papel & celulose) em sua tecnologia de produção do E2G a ser utilizado em uma planta a ser construída na Romênia, enquanto a DuPont chegou a um acordo para vender sua planta de Nevada à subsidiária americana da alemã Verbio Vereinigte BioEnergie AG, junto com uma parte de seu estoque de palha de milho (DUPONT, 2018; CALDERON; ARANTES, 2019). No ano seguinte, foi a vez da planta de Crescentino, operada pela Beta Renewables, ser vendida para quitar dívidas do Grupo M&G (CALDERON; ARANTES, 2019). Em 2019, a POET-DSM anunciou o encerramento das operações industriais de sua unidade, a ser transformada em uma instalação de P&D, em função da redução dos incentivos fiscais por parte do governo dos EUA, além de questões de mercado (POET-DSM, 2019), enquanto a Raízen anunciava redução em seus investimentos em etanol celulósico, devido aos baixos preços da gasolina (CALDERON; ARANTES, 2019).

3.7.2 Dificuldades operacionais em outras biorrefinarias

Problemas de estabilização em plantas industriais pioneiras com uso de biomassa não se restringiram aos casos do E2G. Outras biorrefinarias também enfrentavam dificuldades semelhantes para operar. Essas questões foram bem debatidas em outubro de 2016, no *Biorefinery Optimization Workshop*, promovido pelo DOE.

Esse workshop reuniu mais de 100 especialistas envolvidos na produção/geração de bioenergia, e levantou importantes discussões a respeito das barreiras encontradas por diversas biorrefinarias que resultaram tanto em complicações para suas operações quanto para os estágios subsequentes de seu desenvolvimento tecnológico (DOE, 2016). Entre os aspectos técnicos mais discutidos se destacava a necessidade de uma compreensão profunda da matéria-prima e caracterização de materiais sólidos.

Para os debatedores, as soluções para desafios relacionados às instalações de transporte e armazenamento dentro das biorrefinarias precisam envolver a caracterização

adequada da matéria-prima e projetos de equipamentos com base nessas características. Entre as principais barreiras técnicas envolvendo as matérias-primas se destacaram (DOE, 2016):

- Sua complexidade e variabilidade;
- A recalcitrância dos materiais lignocelulósicos para sua conversão eficiente em produtos;
- As dificuldades operacionais encontrada com o manuseio e a fluidez de sólidos nos sistemas de produção e
- As dificuldades em traduzir os aprendizados das escalas de bancada e piloto para escalas de demonstração ou para plantas comerciais.

Também em 2016, o relatório revisado pelo *National Renewable Energy Laboratory* dos EUA, que analisava o efeito dos investimentos no crescimento da indústria de biocombustíveis, reconheceu a importância da caracterização adequada dos materiais sólidos utilizados como matérias-primas quando passou a adotar como premissa que as tecnologias de conversão de biomassas precisariam considerar as especificações da matéria-prima que realmente será utilizada, para “evitar custos excessivos”. Foi um movimento que revisava a premissa anterior, de 2013, que dizia que o tipo de biomassa não influenciaria no valor do investimento. Ou seja, 3 anos depois, foi reconhecida a importância da correta caracterização da biomassa na avaliação dos investimentos, a partir de um “crescente consenso a esse respeito, entre os especialistas” (VIMMERSTEDT, L.J.; BUSH, B.W., 2016).

De forma geral, plantas industriais em escala comercial são construídas quando os ciclos de P&D e de testes de *scale-up* já identificaram e solucionaram os problemas inerentes a cada etapa dos processos produtivos. Dessa forma, espera-se que os problemas operacionais próprios das escalas maiores sejam resolvidos durante os primeiros meses de produção e que a estabilidade operacional possibilite inovações incrementais que irão otimizar sua rentabilidade. Entretanto, o caso das primeiras biorrefinarias parece trazer uma situação nova. Elas têm se mostrado como plantas comerciais que ainda apresentam algum caráter experimental. Se essa vier a ser a realidade bioeconomia, isso trará implicações para as empresas inovadoras e, potencialmente para toda essa nova indústria. Esta perspectiva trará também impactos em formuladores de políticas e agências de desenvolvimento sobre como considerar necessidades de P&D que emergem do estágio comercial inicial (SANTOS; BOMTEMPO; SOARES, 2021).

Apesar das expectativas iniciais para o desenvolvimento de biorrefinarias terem sido positivas, sua realidade operacional se mostrou mais complexa, reforçando o papel da incerteza no processo de inovação. Tanto mudanças nos aspectos macroeconômicos quanto no desenvolvimento tecnológico reforçam que será necessárias uma visão de longo prazo combinada com políticas consistentes, também de longo prazo, para lidar com períodos de progressos lentos (FURTADO; HEKKERT; NEGRO, 2020).

3.8 Um novo fôlego para o E2G – a partir de 2020.

Os anos 2020 assistem as questões climáticas ganharem um novo peso, tendo como pontos de destaque o Acordo de Paris em 2015, os movimentos sociais e a agenda ESG, entre outros. Esses movimentos, somados, impuseram uma forte retomada às agendas anteriores que visavam a substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas, que faziam parte da base que estimulou os desenvolvimentos do E2G entre outros bioprodutos. Com esse movimento vieram as buscas pela produção do hidrogênio verde, pela descarbonização das produções que utilizam fontes fósseis, pela produção de biogás com ou sem extração do biometano e também a retomada (ainda que tímida) das iniciativas de produção do E2G (BOMTEMPO, 2022).

A GranBio voltou a realizar investimentos em P&D para resolver os problemas enfrentados no início de suas operações (CNPEM, 2018; CALDERON; ARANTES, 2019) e a italiana Versalis anunciou que havia adquirido a planta de E2G de Crescentino (ETHANOL PRODUCER MAGAZINE, 2020). A Clariant anunciou a assinatura de um contrato de licenciamento de sua tecnologia *Sunliquid*, com o grupo chinês Anhui Guozhen e outro com a Eta Bio da Bulgária (CLARIANT, 2020). Em 2021, as notícias ainda pareciam promissoras para os biocombustíveis: em maio, a Seaboard Energy anunciou planos para concluir a construção de uma planta de produção de biodiesel até dezembro de 2021, no antigo site da Abengoa Bioenergy SA em Hugoton (DNT, 2021); a Cosan – controladora da Raízen – anunciou que a companhia irá investir em uma nova usina de E2G (NOVACANA, 2021) e a Clariant, volta às manchetes dessa indústria em formação, anunciando a conclusão oficial de sua planta de etanol celulósico em Podari, Romênia (CLARIANT, 2021).

Considerando dados otimistas de agências especializadas com anúncios empresas sobre vários projetos em construção e assumindo a garantia de fortes investimentos públicos com os preços do barril de petróleo voltando a subir, desenha-se um cenário que

pode voltar a ser favorável ao aumento da produção de biocombustíveis e E2G no Brasil e no mundo (PENALVA SANTOS, 2023).

3.9 Considerações finais

A Linha do Tempo começa nos anos 1920, mas a janela de tempo para a busca das informações a respeito do E2G, considerou os anos de publicação dos textos entre 2008 e 2020. O ano de 2008 foi definido como o início da pesquisa bibliográfica por ter sido identificado como um ano em que, mesmo com a queda dos preços do petróleo, houve um grande impulso no desenvolvimento de pesquisas pela produção de combustíveis (CHERUBINI, 2010 e CALDERON; ARANTES, 2019). O desenvolvimento dessa pesquisa identificou o ano de 2016 como um marco entre o otimismo que esperava pelo sucesso operacional das plantas pioneiras e a frustração de expectativas causada pelo surgimento dos problemas, que limitaram as plantas a níveis baixo de ocupação de suas capacidades produtivas. Até 2016, quase a totalidade dos artigos lidos discutia, de forma bastante aprofundada, diversas questões tecnológicas ligadas aos processos de conversão da biomassa em açúcares (pré-tratamento, hidrólise e fermentação) necessários à produção do E2G. A partir de então, temas que tratavam de dificuldades operacionais envolvendo o manuseio e a alimentação de biomassas lignocelulósicas e de dificuldades em traduzir os aprendizados das escalas de bancada e piloto para plantas de escala comercial, passaram a ser alvo de debates entre especialistas ligados ao desenvolvimento de biorrefinarias (DOE, 2016; VIMMERSTEDT, BUSH, 2016).

A partir desse contexto, este trabalho realizou entrevistas com profissionais que participaram do desenvolvimento dos projetos do E2G, na busca por informações sobre experiências e lições aprendidas. O objetivo foi a construção de um estudo de casos que fosse representativo para discutir desafios a serem enfrentados para a construção e operação de plantas inovadoras (*first-of-a-kind*) que se utilizem de diferentes tipos de biomassa como matéria-prima, na produção de biocombustíveis e bioprodutos,

4 METODOLOGIA

Para investigar os Desafios da Utilização de Biomassas Lignocelulósicas em Plantas Industriais Pioneiras, optou-se por uma pesquisa qualitativa através de um **Estudo de Caso**.

Estudos de caso são estratégias indicadas quando o foco da pesquisa é a ocorrência de um estudo contemporâneo dentro de um contexto real e para responder a questões explicativas que tratam de relações operacionais que ocorrem ao longo do tempo mais do que frequências ou incidências (YIN, 1994). Ainda de acordo com Yin (1994), a preferência pelo uso do estudo de caso deve ser dada em situações em que os comportamentos relevantes não podem ser manipulados, mas quando é possível se fazer observações diretas e entrevistas sistemáticas, como no caso das Plantas Pioneiras de Produção do E2G. Estudos de caso se caracterizam pela "capacidade de lidar com uma completa variedade de evidências - documentos, artefatos, entrevistas e observações" (YIN, 1994).

A **unidade de análise** será a **indústria⁴ de produção de E2G**, durante o período de 2008 a 2019 que inclui: o lançamento das políticas de incentivos para o desenvolvimento de combustíveis a partir de fontes renováveis; a tomada de decisão das empresas para sua entrada no mercado de produção de E2G; a escolha das tecnologias; os projetos das unidades; os tipos de biomassas a serem utilizados nas plantas; a construção das plantas de produção pioneiras; os problemas enfrentados no início das operações de produção e, a forma como esses problemas foram encarados pelas empresas envolvidas. O Estudo de Casos trata da indústria como um todo, sem individualizar empresas e nem fornecer informações específicas de nenhum dos envolvidos.

É um estudo de caso descritivo, que se propõe a descrever desafios que se apresentaram aos atores envolvidos no caso e as formas sobre como esses desafios foram enfrentados. O caso se propõe também a descrever e analisar os impactos que a mudança da base de produção para biomassas lignocelulósicas pode trazer para os processos de inovação nas empresas envolvidas, assim como possíveis consequências que padrões setoriais de inovação já estabelecidos e práticas já consolidadas nas empresas possam

⁴ O conceito de indústria utilizado neste trabalho segue definição de Porter (1979): “grupo de competidores produzindo substitutos similares o suficiente para fazer com que o comportamento de uma empresa afete cada uma das demais, direta ou indiretamente”.

trazer para o sucesso de processos de inovação que envolvam projetos de plantas pioneiras. É, também, exploratório, pois trata de problemas recentes e pouco conhecidos, além de apresentar proposições para futuras pesquisas.

4.1 Pesquisas bibliográficas

Foram realizadas duas pesquisas bibliográficas principais já apresentadas nos capítulos anteriores: uma sobre a dinâmica dos processos de inovação, apresentada no capítulo 2, que serve como Referencial Teórico para as análises dos processos de inovação experimentados em casos que envolvam projeto, construção e operação de plantas pioneiras. E outra que serviu de base para uma Linha do Tempo construída desde o crescimento do petróleo como principal base para a geração global de energias até a transição energética que se desenha atualmente e que pode levar a biomassa a se transformar na principal fonte de produção de combustíveis líquidos em substituição aos derivados do petróleo.

Conforme descrito no capítulo 2, a estruturação do Referencial Teórico foi feita a partir de textos clássicos de alguns dos principais autores que iniciaram e desenvolveram abordagens sobre a dinâmica dos processos de inovação e outros autores e textos mais recentes, que abordassem tanto os fundamentos e a natureza dos processos de inovação, quanto seus diferentes modelos e padrões. O objetivo foi analisar, em diferentes dimensões, os impactos desses modelos e padrões nos processos de inovação de empresas envolvidas em projetos de plantas pioneiras.

Para a construção da Linha do Tempo, que apresenta as mudanças de fontes de geração de energia desde o crescimento do petróleo até a construção das plantas de E2G, a pesquisa fez diversas buscas em artigos publicados em revistas especializadas, relatórios de congressos e seminários (*workshops*) e outros recursos on-line, disponíveis no “Portal Periódicos CAPES” através do acesso da UFRJ, entre 2019 e 2021 assim como no Google Scholar. As buscas foram guiadas pelos “Títulos” das publicações que continham as palavras-chave “*cellulosic ethanol*” ou 2EG ou “*second generation ethanol*”, desde que também contivessem no campo “Assunto” a palavra-chave “*biomass lignocellulosic*”. Os textos utilizados para fundamentação da pesquisa foram selecionados entre os 50 primeiros classificados pelo critério de relevância nos locais pesquisados e o critério de seleção se baseava no conteúdo dos textos: textos com conteúdo sobre as tecnologias de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação a partir do uso de biomassas

lignocelulósicas eram selecionados, assim como textos que tratavam de biorrefinarias e produção industrial de E2G. Ao final, foram considerados na pesquisa 95 textos, acrescidos dos livros já citados anteriormente e de outros textos adicionais que se mostraram necessários para a discussão. Buscas semelhantes com as mesmas palavras-chave em português e inglês, foram feitas no Google para encontrar matérias publicadas pela mídia a respeito dos desenvolvimentos tecnológicos e a construção das plantas pioneiras do E2G no período analisado.

A Linha do Tempo no capítulo 3 teve como objetivo conhecer a evolução, no tempo, dos principais temas publicados a respeito das tecnologias desenvolvidas para produção do E2G e das etapas de construção e início de produção das plantas pioneiras, para servir de contexto para o estudo de caso.

4.2 Entrevistas e visitas

Para orientar as entrevistas que iriam servir como fonte para as informações estratégicas não encontradas nas fontes secundárias, foi elaborado um questionário semiestruturado com questões que buscaram conhecer as estratégias de inovação das empresas envolvidas nessa indústria em formação. Desde seus processos de tomada de decisão, passando pelas etapas de escolha da tecnologia, de desenvolvimento do projeto e de construção das plantas pioneiras do E2G, confrontando suas expectativas com os desafios efetivamente enfrentados. Esse questionário foi utilizado como base para as entrevistas presenciais realizadas junto aos profissionais convidados. Todos os convidados a participar das entrevistas tinham nível de diretoria ou alta gerência, e tiveram contato e/ou participação tanto no processo de tomada de decisão da construção da planta quanto nas buscas de solução para os problemas técnicos decorrentes.

O questionário foi composto por 14 questões no total, abordando temas sobre o processo de tomada de decisão para construir a planta industrial; a tecnologia escolhida; os riscos e os problemas identificados na fase de tomada de decisão; o projeto de construção; a equipe técnica; a operação da planta e os problemas enfrentados e o mercado, conforme Quadro 3 abaixo:

Quadro 4 Questionário de referência usado nas entrevistas

Temas	Perguntas orientadoras
-------	------------------------

Processo de Tomada de decisão	Quando (ano) foi tomada a decisão de investir na produção de E2G? Qual foram o(s) fator(es) determinante(s) para a decisão?
Tecnologia	Por que essa tecnologia foi a escolhida? Por tecnologia entenda-se todas as etapas tecnológicas desenvolvidas, ou adquiridas, que viabilizassem a conversão da biomassa em E2G
	Quando da tomada de decisão, qual era o estágio de desenvolvimento/maturidade da tecnologia escolhida na avaliação dos tomadores de decisão?
	Após a entrada em operação da planta comercial/demonstração, o estágio de desenvolvimento/maturidade da tecnologia avaliado na questão anterior se confirmou?
	Qual das classificações abaixo melhor caracterizaria o que seria a nova planta na avaliação de tomadores de decisão/equipe técnica, no momento da tomada de decisão citado na questão 3? a – A nova planta seria igual ou bastante similar a outras existentes no mundo, mas fora de seu principal setor de atividade; Ex.: Empresa atua no setor petroquímico e decide construir uma planta bem conhecida (ou parcialmente conhecida) no setor de biocombustíveis b – A nova planta seria de um tipo “ <i>first-of-a-kind</i> ” (processo ou inovação de produto) dentro de um setor bem conhecido: Ex.: Empresa já atua na produção de Etanol (com matéria-prima conhecida), e decide construir uma planta de Etanol 2G: c – Planta “ <i>first-of-a-kind</i> ” na bioeconomia, onde tudo é novo, incluindo o manuseio da matéria-prima; d – Outro (descrever)
Riscos e Problemas Identificados	Quais os 3 principais riscos identificados na época da tomada de decisão, ligados à tecnologia/operação da planta em ordem de importância? Quais foram as estratégias adotadas para mitigá-los?
	Quais os 3 principais problemas enfrentados (tecnologia/operação) após a entrada em operação da unidade? Comprovaram os riscos identificados no início? Se não foram, quais as situações imprevistas mais impactantes?
Projeto	Os projetos mudaram muito ao longo das etapas de construção? Onde ocorreram as principais mudanças? Quais foram os principais motivos técnicos/operacionais para essas mudanças?
Operação / Solução de Problemas	Se aplicável: Por que a planta não operou nas condições de projeto dentro do cronograma esperado? Ainda não opera nas condições de projeto? Pelos mesmos motivos iniciais? Se já opera, quais as principais alterações realizadas?
	Houve troca de informações sobre os problemas enfrentados com os demais players do setor visando acelerar a solução dos problemas? Se sim, os problemas eram semelhantes? Quais foram os problemas que sua empresa enfrentou diferente dos demais players?
Equipe técnica (projeto, construção e operação)	Como foram escolhidos os profissionais técnicos a serem envolvidos no projeto (projeto/construção/operação)? Quais as principais competências procuradas? Eles tinham experiência anterior em plantas que operavam com

	matérias-primas renováveis? Essa experiência foi fator decisivo na fase de recrutamento e contratação desses profissionais?
	Como foi o desempenho dessas equipes? As competências definidas foram adequadas para a solução dos problemas enfrentados? Foi necessário contratar novos profissionais com competências complementares não previstas no início? Pode citar algumas dessas competências complementares?
Mercado	Qual o papel de sua empresa nesse setor? <ul style="list-style-type: none"> a. Desenvolver tecnologia (venda de tecnologia / insumos / equipamentos) b. Aplicar tecnologia (produção de E2G) c. Desenvolver e aplicar tecnologia
	A empresa se mantém no mercado de E2G/Biocombustíveis? Por que a empresa decidiu sair (ou ficar) do mercado?

Foram convidados 16 executivos (em nível de diretoria e alta gerência), sendo: 1 representante de cada uma das 6 operadoras das plantas pioneiras; 3 representando empresas que iniciaram estudos para produção de E2G, mas desistiram dos projetos antes de construir suas plantas; 4 representando fornecedores – entre aqueles que fornecem tecnologia, equipamentos e insumos para a produção de E2G, além de 3 executivos que haviam participado dos projetos, mas já haviam deixado as empresas (ver Quadro 4). O objetivo de ouvir profissionais que já não mais faziam parte de nenhuma das empresas envolvidas nos projetos, foi o de colher impressões já sem algum eventual viés estratégico da empresa. Fazer parte, ou não, das empresas na época das entrevistas pode influenciar nas respostas, e essa variável deve ser considerada nas análises e interpretação dos dados.

Quadro 5 Participantes das entrevistas por perfil de empresa

Perfil das Empresas	Profissionais Convidados	Participaram
Operadoras E2G em escala comercial	6	3
Empresas que desenvolveram projetos, mas não construíram plantas comerciais	3	1
Profissionais que participaram dos projetos, mas não estão mais nas empresas	3	3
Fornecedores de Tecnologia e/ou Equipamentos	4	0
Total	16	7

Além das 6 operadoras das plantas pioneiras, a quantidade dos demais participantes não foi definida por nenhum critério estatístico e sim em função dos contatos conseguidos pela rede de relacionamento acionada pelos pesquisadores. Entre os 16 profissionais contatados, 7 concordaram e participaram das entrevistas, sendo que um deles não respondeu o questionário, aceitando apenas ser entrevistado.

Os questionários foram enviados por e-mail no final de janeiro de 2019, para que os profissionais tivessem conhecimento prévio de seu conteúdo. Foi informado o motivo acadêmico do trabalho (elaboração de uma tese de doutorado) sob o título preliminar de “Implantação de Projetos Industriais de Plantas Pioneiras - O Caso da Indústria do Etanol 2G” e garantido anonimato aos participantes: tanto com relação as empresas quanto a seus nomes. Foi informado, também, que o trabalho abordaria o novo setor de produção de E2G e não empresas individualmente. Por se tratar de um setor ainda recente, cujo caso estava (e ainda está) em andamento, essa abordagem foi fundamental para dar segurança aos entrevistados que as informações que iriam ser disponibilizadas não iriam revelar estratégias ou dificuldades de nenhuma empresa em específico.

Das 7 entrevistas presenciais e/ou online agendadas, apenas 6 foram realizadas, todas com duração variando entre 2 e 3 horas cada. Em função de dificuldades de agenda, o sétimo profissional apenas respondeu ao questionário e o devolveu por e-mail, sem que pudesse ser entrevistado. Durante as entrevistas, as questões foram balizadoras dos temas abordados, deixando cada entrevistado livre para tecer quaisquer comentários que achasse relevante para o trabalho. Dos 6 entrevistados, 3 enviaram o questionário-base preenchido com suas próprias palavras. Para os outros 3, as respostas/comentários feitos verbalmente eram escritos pelos entrevistadores sendo que ao final, as anotações eram lidas para que os entrevistados concordassem com o conteúdo. Todas as entrevistas foram realizadas ao longo do primeiro semestre de 2019, sendo a última no final do mês julho.

Importante destacar que as entrevistas foram realizadas logo no início do desenvolvimento dessa tese e que isso aconteceu em função das notícias que vinham sendo veiculadas na mídia sobre desmobilização das unidades e mudança nas equipes das empresas envolvidas nos projetos de E2G. Uma demora maior na realização das entrevistas poderia acarretar perda de alguns contatos, prejudicando seus resultados.

Além das entrevistas, outras atividades adicionais foram realizadas visando consolidar informações a respeito dos processos de produção do E2G e formar

conhecimento que pudesse contextualizar os dados formais obtidos das entrevistas, conforme abaixo:

- Visitas a 3 plantas de produção do E2G ainda enquanto operavam, incluindo conversas com profissionais técnicos ligados a engenharia, manutenção e operação;
- Visitas 2 plantas de produção do E1G visando comparações entre os dois fluxos de processo de produção;
- Visitas a dois tipos de lavoura de onde eram retiradas biomassas para uso como matéria-prima na produção do E2G;
- Visitas a pátio de estocagem de fardos de biomassa para conhecer sistemas de enfardamento e transporte;
- Visitas a 2 fábricas de equipamentos de movimentação de sólidos, de dois fabricantes diferentes. Um dos fabricantes atua no setor de produção de E1G e o outro no setor de papel & celulose (P&P). Um fornecedor era brasileiro, que se utilizava de tecnologia própria e ou outro de origem multinacional. Ambos com equipamentos fornecidos para as plantas do E2G. Nessas visitas foi possível identificar grandes semelhanças entre os equipamentos já utilizados nos setores de E1G e P&P e os fornecidos para as plantas pioneiras do E2G⁵;
- Visita a uma planta de produção do setor de P&P que utilizava equipamentos e tecnologia de um mesmo fabricante que também forneceu equipamentos para as pioneiras do E2G;
- Participação em congressos e workshops relacionados à produção de etanol (E1G e E2G).

Nenhum conteúdo obtido nas visitas serviu de informação primária para esse trabalho. Todas essas informações e impressões serviram para compor uma base de conhecimento que permitisse analisar as respostas das entrevistas com coerência e pertinência técnicas.

⁵ Essas visitas foram importantes para a compreensão do papel desempenhado por fornecedores de equipamentos de movimentação de sólidos nos projetos das plantas do E2G e, de certa forma, compensaram a ausência de representantes de fornecedores de equipamentos nas entrevistas.

4.2.1 Perguntas e respostas – Tratamento e análise dos dados

Pelos tipos de questão apresentadas nas entrevistas e, por ser um questionário semiestruturado, as respostas foram compostas por um conjunto de fatos objetivos somados a impressões, opiniões e considerações subjetivas dos entrevistados. Os dados obtidos foram tratados no capítulo 5 por uma análise de perguntas e respostas, através de uma análise preliminar do material, seguida de exploração detalhada de seu conteúdo e posterior análise e interpretações dos resultados, de acordo com método proposto por Bardin (1977).

Na análise preliminar, foi feita uma primeira leitura de todo o material coletado. Trata-se do primeiro contato analítico com essas informações, quando se começa a conhecer o conteúdo das entrevistas e dos demais comentários feitos pelos entrevistados (SILVA; FOSSÁ, 2015). Essa leitura gera um resumo descritivo com interpretações sobre o conteúdo das respostas dadas pelos entrevistados.

A exploração do conteúdo acontece na seção 5.3, em conjunto com as análises e interpretações dos resultados. Nessa etapa são apresentadas todas as respostas e comentários feitos pelos entrevistados, separados por temas. Tanto para captar os conteúdos manifestos, quanto os latentes contidos nas respostas e nos comentários feitos pelos entrevistados (SILVA; FOSSÁ, 2015). Também nessa etapa, o conteúdo exposto pelos entrevistados é analisado e interpretado à luz dos conceitos apresentados no Referencial Teórico. O objetivo é entender os processos vividos pelas empresas durante o período que compreendeu as tomadas de decisão e estratégias adotadas com relação às plantas industriais pioneiras. Desde sua construção até seu fechamento (ou continuação para o caso das empresas que permanecem operando).

As análises foram feitas de modo a identificar as diferentes fases e características dos processos da inovação apresentados no Quadro Analítico do capítulo 2 e entender seus efeitos no caso das plantas pioneiras: quais as estratégias e motivos que embasaram as tomadas de decisão para construção das plantas industriais e para a escolha das tecnologias, assim como qual era a visão de mercado dos tomadores de decisão para a planta que seria construída. O capítulo 5 também compara o estágio de maturidade da tecnologia na visão dos operadores das plantas antes e depois da partida da planta. Compara também os riscos potenciais identificados na época da tomada de decisão com os problemas efetivamente encontrados durante a operação das unidades, além de uma

análise sobre o projeto desenvolvido e a formação da equipe técnica que coordenou o projeto.

Para isso, a seção de exploração do conteúdo é dividida em 6 subseções que correspondem a cada tema abordado nas entrevistas. As perguntas referentes aos temas são apresentadas em um quadro ao lado das respostas e dos comentários feitos pelos entrevistados. As perguntas mantêm as numerações do questionário usados nas entrevistas e as respostas foram identificadas por letras de “A” a “G”, conforme modelo apresentado no Quadro 5 a seguir:

Quadro 6 Entrevistas – perguntas e respostas (Modelo)

Pergunta orientadora	
1. Quando ...?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	Nossos ...
B	A planta piloto ...
C	A tecnologia
D	Operamos em todas ...
E	Havia sido testada em uma escala ...
F	Isso foi ...
G	A planta piloto estava ...

É importante esclarecer que as letras indicativas das respostas não seguem nenhum vínculo com nenhuma empresa. Ou seja, se a resposta de um entrevistado aparece na letra A da pergunta 2, por exemplo, a resposta desse mesmo entrevistado pode aparecer na letra A em outra pergunta. Essa estratégia teve por objetivo garantir o anonimato e o sigilo sobre informações internas de cada empresa. Apesar das perguntas estarem numeradas na mesma sequência do questionário, algumas podem aparecer fora dessa ordem para facilitar as análises. Os tempos dos verbos encontrados nas respostas correspondem ao período da realização das entrevistas. Ou seja, se um entrevistado fazia parte de uma empresa na qual a planta pioneira ainda operava e, depois foi fechada, a resposta permanece como se a planta ainda operasse, mantendo o verbo no tempo da realização das entrevistas.

Em algumas subseções, as análises são comparativas entre o esperado na época da tomada de decisão e o acontecido depois da operação das plantas. Nesses casos, cada quadro conterà duas perguntas e conjunto com todas as suas respostas, conforme o próximo modelo, representado no Quadro 6, a seguir:

Quadro 7 Entrevistas – perguntas e respostas (Modelo2)

Pergunta orientadora	
3. Quando da tomada de decisão...? 4. Após a entrada em operação...	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	Nossos ... Entretanto...
B	A planta piloto ... No resultado ...
C	A tecnologia Mas o que ocorreu...
D	Operamos em todas ... Confirmando ...
E	Havia sido testada em uma escala ... Isso confirmou...
F	Isso foi ... Mas o contrário ...
G	A planta piloto estava ... Na planta comercial ...

4.3 Pesquisa de patentes

Durante a compilação dos resultados das entrevistas, várias respostas apontaram para a ocorrência de problemas não antecipados envolvendo o manuseio de biomassa. O que pareceu ter sido uma questão comum a todas as empresas. Visando, então, verificar se a não identificação prévia desses problemas foi restrita à indústria do E2G, se decidiu pela realização de um estudo de prospecção tecnológica para se identificar o nível de maturidade, naquele momento, das tecnologias sobre manuseio de biomassas lignocelulósicas. O objetivo foi sondar se o tema de manuseio dos materiais lignocelulósicos já era uma preocupação e objeto de invenções entre fabricantes ou

usuários de equipamentos industriais, mesmo fora do universo das plantas pioneiras do E2G.

A primeira pesquisa foi realizada em janeiro de 2021, sem nenhuma restrição de janela de tempo, de modo a colher informações sobre todas as patentes já depositadas, até aquela data, a respeito do tema pesquisado. As buscas foram feitas em documentos de patentes depositados em escritórios de mais de 95 países através do *Business Software Questel Orbit Intelligence*, utilizando o banco de dados FAMPAT – uma base mundial de patentes agrupadas por famílias que cobre mais de 54 milhões de patentes (QUESTEL, 2019).

Foram utilizadas as palavras-chave: “biomass”, “stover”, “straw”, “bagasse”, “corn”, “wheat”, “cane”, “arundo”, “fuel*”, “biofuel*”, “energ*”, “bioenerg*”, “ethanol”, “bioethanol”, “hand*”, “transport*”, “screw*”, “convey*”, “mill*”, “grind*”, “crush*” e “siev*” em uma sequência pré-definida de modo a guiar a ferramenta de busca na direção esperada pela pesquisa. Além das palavras-chave, os resultados da pesquisa foram submetidos aos filtros de IPC⁶ e Domínio Tecnológico⁷, seguido uma análise qualitativa em cada uma das patentes que tenha sido selecionada para esta última etapa.

O IPC – *International Patent Classification*, classifica as patentes. Por sessões, classes, subclasses, grupos e subgrupos. As 8 sessões se referem a: (A) necessidades humanas; (B) operações e transporte; (C) química e metalurgia; (D) papel e têxtil; (E) construções fixas; (F) engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos; (G) física e (H) eletricidade.

As buscas foram feitas a partir da palavra-chave “*biomass*” para identificar quantas patentes foram depositadas em todos os continentes tendo a biomassa como objeto. Vários filtros foram aplicados a partir da busca inicial para selecionar apenas as patentes que relacionam “biomassas residuais lignocelulósicas” com “produção de

⁶ Visualização baseada nos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) contidos em um conjunto de patentes em análise. Os códigos IPC são agrupados em 35 campos de tecnologia para identificar a diversidade ou a especificidade do portfólio de patentes de um requerente. Uma mesma patente individual pode ser incluída em mais de um domínio de tecnológico (Questel, 2019-2020).

⁷ O Domínio Tecnológico de uma patente identifica a diversidade ou a especificidade do portfólio de patentes de um depositante e permite aos pesquisadores identificar o *core business* do tema em estudo (Questel, 2019-2020).

combustíveis” e “equipamentos de movimentação de sólidos”. Os filtros tiveram o objetivo de concentrar as buscas em depósitos de patentes ligados a temas afins da pesquisa, excluindo patentes ligadas a outros tipos de biomassa (tabaco, grãos, madeira etc.) que já possuem domínio tecnológico para seu manuseio. A participação dessas matérias primas no, computo final, poderia passar a falsa impressão de domínio tecnológico sobre o tema. Os resultados dessa primeira pesquisa fazem parte do artigo “*Biomass feeding in cellulosic ethanol projects: An underestimated issue?* (em anexo), publicado pelo *Alexandria Engineering Journal* em março de 2022, (CORREA et. al, 2022).

A segunda pesquisa, cujos resultados são apresentados nesse trabalho, foi realizada em abril de 2021, com as mesmas bases e a mesma metodologia da pesquisa anterior, mas com uma janela de tempo restringindo as buscas ao período de 1970 a 2020. Essa janela de tempo se justifica considerando que o desenvolvimento tecnológico para viabilizar a produção de combustíveis a partir de fontes renováveis, se intensificou após a primeira crise do petróleo (CALDERON; ARANTES, 2019). Mais detalhes sobre a metodologia utilizada nessa pesquisa são apresentados no Anexo I.

4.4 Análise e interpretação dos resultados

O capítulo 5 se encerra com análises e interpretações dos resultados da pesquisa, feitas a partir do confronto das informações coletadas nas entrevistas, com conceitos extraídos do Referencial Teórico.

Esse confronto entre conceitos teóricos e experiências práticas visa discutir os modelos e padrões, dos processos de inovação, vividos pelas empresas pioneiras do E2G, assim como suas abordagens frente aos desafios encontrados. Os resultados dessas análises tratam das possíveis consequências (positivas ou negativas) que padrões setoriais de inovação das empresas já estabelecidos em outros setores, podem trazer para o sucesso do uso industrial desses novos tipos de matérias-primas no âmbito da bioeconomia. Os resultados também discutem alguns desafios que a mudança da base de produção – de derivados de petróleo para biomassa residual, pode trazer para os processos de inovação na indústria química e indústrias relacionadas, como aconteceu no caso das plantas de produção do E2G.

O final do capítulo apresenta o Quadro Analítico dos Processos de Inovação do E2G, que consegue resumir, de forma esquemática, as diversas dimensões de análise e características dos processos de inovação experimentados pelas pioneiras do E2G, relacionando lições e ensinamentos extraídas do caso e que podem ser úteis para projeto e operação de outras biorrefinarias e, conseqüentemente, para as próximas etapas de desenvolvimento da bioeconomia.

Por fim, o capítulo 6, apresenta as conclusões desse trabalho que discutem as questões centrais levantadas pela tese e identificam os principais desafios enfrentados pelas plantas pioneiras do E2G que podem ser úteis para projeto e operação de outras biorrefinarias e, conseqüentemente, contribuir para o sucesso operacional de outras plantas industriais pioneiras (*first-of-a-kind*), alimentadas por diferentes tipos de biomassas lignocelulósicas.

5 O CASO DAS PLANTAS PIONEIRAS DE PRODUÇÃO DO E2G

Esse estudo de caso tem foco nas plantas pioneiras de produção do etanol de segunda geração que foram implantadas entre 2013 e 2016. Seu objetivo é apresentar e debater informações sobre os processos de decisão e estratégias de atuação das empresas que viveram a implantação dessas unidades industriais. As informações, conforme explicado no capítulo anterior, foram obtidas através de entrevistas realizadas com profissionais que participaram ativamente das iniciativas e atividades das empresas durante todo o processo de implantação das unidades.

O capítulo está dividido em 3 seções: a primeira descreve, resumidamente, o caso a ser apresentado, destacando sua relevância; a segunda trata de uma análise preliminar feita a partir de uma leitura geral das respostas dadas pelos entrevistados que gera um resumo descritivo que serve de base para a exploração completa do material; a terceira seção explora o conteúdo das entrevistas e os resultados da pesquisa de patentes, além de apresentar os resultados detalhados de cada tema abordado – incluindo tanto a transcrição de respostas dadas às perguntas quanto comentários feitos livremente pelos entrevistados.

5.1 Descrição do caso

Através do conteúdo apresentado no capítulo 3, foi possível observar que a partir de 2008 houve um grande esforço global para a retomada do uso de fontes alternativas ao petróleo na produção de combustíveis. Estes esforços foram fortemente alavancados pelos incentivos financeiros e tributários lançados principalmente por governos dos EUA, Europa, e Brasil em resposta às enormes flutuações nos preços do barril de petróleo, assim como pelo grande apelo social global para a diminuição nas emissões de CO₂ para a atmosfera (DOE, 2008; OCED, 2009; NYKO et al, 2010, MILANEZ ET AL, 2015; ANDERS, 2016).

A bibliografia pesquisada e discutida no capítulo 2 aborda razões e forma para o lançamento dos incentivos governamentais, os esforços feitos por comunidades científicas para o desenvolvimento de tecnologias para a produção de combustíveis a partir de fontes alternativas e, também, os avanços tecnológicos alcançados por diferentes tecnologias (DALE; ONG, 2012; GUSAKOV, 2013; GARCIA, 2014; NOGUÉ, 2014; AKHTAR, 2015; DOS SANTOS et al, 2016 e VALDIVIA, 2016). Entretanto, não aborda os passos dados pelas empresas que culminaram no lançamento, quase simultâneo de seis plantas industriais pioneiras para a produção do etanol de segunda geração. Na busca por

preencher essa lacuna, esta pesquisa foi a campo colher informações primárias a respeito das motivações e estratégias das empresas para entrar nesse mercado, assim como os passos dados nessa direção.

A bibliografia disponível até a data do desenvolvimento dessa tese também não trazia clareza sobre as principais razões para que 5 das 6 plantas instaladas tivessem sua produção interrompida já a partir de 2016. Essa lacuna foi coberta pelas entrevistas.

Dessa forma, o **Caso das Plantas Pioneiras de Produção do E2G**, apresentado nesse capítulo combina as informações disponíveis na literatura com as obtidas através das entrevistas à luz dos conceitos descritos no Referencial Teórico. O objetivo é buscar compreender os processos de inovação vividos por essas empresas entre sua tomada de decisão para construir as plantas comerciais e o período posterior ao surgimento dos problemas que impediram as plantas de operarem dentro das condições de projeto. Entendendo os limites para sua extrapolação, já que considera apenas os casos estudados, esta tese tem o potencial de contribuir com a produção de mais conhecimento que possa apoiar no desenvolvimento de futuros projetos inovadores envolvendo plantas pioneiras a partir do uso de biomassa como matéria-prima.

5.1.1 Resultado das entrevistas – Análise preliminar

O primeiro contato analítico com as informações obtidas nas entrevistas foi através de uma leitura preliminar de todo o material coletado. Como resultado dessa primeira leitura foram selecionadas as principais palavras-chave encontradas em cada resposta, de modo a identificar os fatores que foram citados pelos entrevistados como determinantes, em cada tema. Esses fatores foram relacionados a cada questão indicando a frequência de sua citação pelos entrevistados. O resultado desta compilação está apresentado no Quadro 7 e serve de base para o Resumo Descritivo apresentado a seguir, já com as primeiras análises e interpretações.

Quadro 8 Compilação das respostas obtidas nas entrevistas

TEMAS	PERGUNTAS	FATORES	HISTOGRAMA	TX. FREQ.
TOMADA DE DECISÃO	1-Tomando por base a empresa que você conhece, quando (ano) foi tomada da decisão de investir na produção de E2G? Qual foram o(s) fator(es) determinante(s) para a decisão?	Preço do petróleo	■ ■ ■	3
		Subsídios governamentais	■ ■	2
		Aumento do consumo de etanol	■ ■ ■ ■	4
		Rendimento da tecnologia (resultado/lucro)	■	1
		Novo mercado	■ ■	2
		Novas tecnologias	■	1
TECNOLOGIA	2-Por que essa tecnologia foi a escolhida?	Maior rendimento,	■ ■ ■	3
		Comprovação em piloto/laboratório	■ ■	2
		Tecnologia integrada	■	1
		Menor CAPEX/OPEX	■ ■ ■	3
		Scale-up	■	1
	3-Quando da tomada de decisão, qual era o estágio de desenvolvimento/maturidade da tecnologia escolhida na avaliação dos tomadores de decisão?	Laboratório	■ ■ ■	2
		Piloto	■ ■ ■ ■ ■	5
		Demo	■	1
		Comercial		0
	4-Depois a entrada em operação da planta comercial/demonstração, o estágio de desenvolvimento/maturidade da tecnologia avaliado na questão anterior se confirmou?	Sim	■	1
		Não: Scale-up	■	1
		Não: Equipamentos	■ ■ ■	3
Não chegou a operar em escala comercial		■ ■	2	
5-Qual das classificações a seguir melhor caracterizaria o que seria a nova planta?	Nova planta inovadora (<i>first-of-a-kind</i>),	■ ■ ■ ■ ■	5	
	Semelhante às anteriores	■ ■	2	
RISCOS	6-Quais os 3 principais riscos identificados na época da tomada de decisão, ligados à tecnologia/operação	Suprimento de biomassa	■ ■ ■	2
		Falta de planta de demonstração,	■	1

	da planta em ordem de importância? Quais foram as estratégias adotadas para mitigá-los?	Pré-tratamento,						1
		Enzimas,						3
		Custo de construção,						1
		Comportamento da biomassa,						2
		Integração de processo,						1
		Condições de mercado,						1
		Nova tecnologia,						1
		Projeto,						1
		Custo de produção,						1
		Fermentação						1
	7-Quais os 3 principais problemas enfrentados (tecnologia/operação) após a entrada em operação da unidade? Comprovaram os riscos identificados no início? Se não foram, quais as situações imprevistas mais impactantes?	Manuseio da biomassa,						2
		Enzimas (rendimento/custo),						2
		Leveduras						1
		Tratamento de águas,						1
		Erosão/corrosão de equipamentos,						1
		Estabilidade do processo,						2
		Preço do petróleo caiu,						2
		Execução do projeto						1
	Queda dos incentivos						1	
PROJETO	8-Os projetos mudaram muito ao longo das etapas de construção? Onde ocorreram as principais mudanças? Quais foram os principais motivos técnicos/operacionais para essas mudanças?	Poucas mudanças (não significativo),						1
		Poucas mudanças - houve atraso na construção						1
		Grandes mudanças - biomassa,						2
		Grandes mudanças - equipamentos						2
		Grandes mudanças- Pré-tratamento não definido						1
		Grandes mudanças - mudança de conceito						1

5.1.2 Resumo descritivo

A análise preliminar feita com suporte da tabulação dos principais fatores citados pelos entrevistados, leva às seguintes interpretações:

- Os estímulos para o desenvolvimento e a produção de grandes volumes de combustíveis alternativos ao petróleo, atraiu empresas de diferentes portes e origens. Entretanto, as etapas finais, que culminaram na construção de plantas pioneiras para produção do E2G ficaram restritas à grandes empresas vindas de setores ligados aos ramos da química e da energia: Shell (óleo & gás), Dupont e M&G (química & petroquímica), DSM (nutrição/saúde) e Abengoa (energia). Todas pertencentes a grupos com aparente robustez financeira suficiente para realizar grandes investimentos de capital: o Grupo M&G, o menor entre eles, havia declarado faturamento de US\$ 3 bilhões em 2012 (M&G, 2012); Abengoa e DSM, haviam faturado 5,6 e 8,2 bilhões de Euros respectivamente, também em 2010 (ABENGOA, 2010; DSM, 2010); além dos gigantes DuPont com faturamento de US\$ 31,5 bilhões (DUPONT, 2010) e Shell com seus US\$ 368 bilhões (SHELL, 2010), todos em 2010. Todas essas empresas possuíam corpos técnicos bastantes qualificados e estruturas internas de engenharia e de P&D. Em alguns casos essas gigantes formaram joint ventures (JV) com empresas locais que já produziam E1G como a Cosan no Brasil, (em JV com a Shell) e a Poet nos EUA (em JV com a DSM). A exceção coube à GranBio, uma startup brasileira (RYDLEWSKI, 2015) nascida em 2011 com faturamento anual previsto de no máximo US\$ 100 milhões, mas que recebeu aporte financeiro do BNDESPar e foi formada, em parte, por profissionais experientes vindos da petroquímica brasileira Braskem, que tem um perfil técnico semelhante ao das demais pioneiras apesar da diferença de porte em relação a elas.
- Segundo os entrevistados, os principais fatores que influenciaram as empresas para que decidissem pela construção de uma planta comercial foram: a expectativa de que o preço de petróleo permanecesse perto dos US\$ 100 / barril, ao mesmo tempo em que cresceriam os estímulos pelo consumo de combustíveis com baixas emissões de CO₂. Haveria um grande aumento na demanda global pelo etanol combustível e sua produção a partir de biomassas residuais poderia se dar sem grandes aumentos nas áreas plantadas nem de milho nem de cana-de-açúcar, na maioria dos casos. Ou seja, os principais fatores que influenciaram a decisão de

investir em um novo tipo de produção que demandava o uso de novas tecnologias com um novo tipo de matéria-prima, foram externos – preços do petróleo, políticas públicas, mercado de etanol combustível).

- A maioria dos entrevistados reconheceu que as novas plantas seriam pioneiras (*first-of-a-kind*) e que a tecnologia havia sido desenvolvida apenas até a escala piloto. E mesmo sem que nenhuma das tecnologias utilizadas tivesse sido comprovada em escala comercial, as escolhas de suas tecnologias foram baseadas em baixo custo e menor complexidade. Seus critérios de escolha pareciam supor que não havia barreiras técnicas significativas para atingir o nível de maturidade necessário para operar as plantas.
- A grande dispersão nos fatores indicados como riscos identificados naquela fase reforça a suposição de que as empresas sabiam que estariam expostas a diversos risco de cunho tecnológico, pois na grande maioria dos casos, os riscos previamente identificados tinham essa origem. O alto custo de enzimas e o comportamento da biomassa foram os mais citados. Em comentários feitos durante as entrevistas, ficou claro que os estágios de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação sempre estavam presentes ao se falar sobre tecnologia. As empresas pareciam aceitar os riscos característicos daquele nível de maturidade tecnológica visando aproveitar a janela de oportunidade que o mercado parecia oferecer. A pressão pelo pioneirismo pode ter acelerado o processo de tomada de decisão de construção das plantas, pois segundo alguns entrevistados, havia a expectativa de que as plantas pioneiras poderiam se sair vencedoras em uma futura corrida pela venda de tecnologia para as próximas empresas que entrassem nesse mercado. É importante observar que a maioria das empresas se colocavam na posição de vendedores de tecnologia. Apenas duas delas, se declararam apenas como operadores das plantas.
- O reflexo dessa busca pelo pioneirismo parece começar a aparecer já na etapa de projeto das plantas. A maioria das citações sobre essa etapa, considerou que houve grandes mudanças nos projetos ou devido a alterações na biomassa, ou nos processos de conversão ou em mudanças de conceito ou ainda em projetos de equipamentos. Ou seja, mudanças oriundas das etapas de projeto conceitual ou básico causaram atrasos na etapa de construção.
- As empresas montaram equipes de projeto a partir de seus quadros internos com profissionais experientes capazes de desenvolver e coordenar os projetos de

implantação das unidades industriais, seja aplicando as tecnologias desenvolvidas internamente, seja adequando os projetos das plantas às tecnologias adquiridas. Para os entrevistados, a qualidade das equipes de projeto mostrou-se adequada, com exceção de sua participação nos projetos de manuseio de sólidos.

- Após a entrada em operação das plantas, problemas técnicos relacionados às etapas de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação e a alguns problemas de projeto não chegaram a ser o centro das atenções para que a planta pudesse operar continuamente, pois apesar de citados, os processos de hidrólise (enzimas) e de fermentação (leveduras) não se transformaram em barreiras para a continuidade operacional das plantas. Os principais problemas encontrados, até então não esperados, foram: manuseio da biomassa, problemas de erosão, corrosão e entupimentos em equipamentos. Fatores externos às questões tecnológicas também foram citados, como: queda do preço do petróleo e redução de apoios e incentivos nas políticas públicas (principalmente nos EUA). Se comparados aos riscos esperados no início do processo, apenas os problemas ligados às questões de mercado (preço do petróleo e queda de incentivos) e ao manuseio de biomassa se confirmaram no início da operação das plantas. Ou seja, apenas poucos dos riscos avaliados se transformaram em grandes problemas. Os demais riscos que tratavam dos processos de produção não se transformaram nos principais problemas, enquanto outros problemas técnicos se colocaram no centro das atenções das empresas.
- Para os entrevistados, a biomassa, os equipamentos de movimentação/manuseio (de biomassa) e fornecedores de equipamentos (de movimentação de biomassa) foram os principais motivos para o baixo desempenho operacional das plantas. Ou seja, ao invés de problemas com as etapas de conversão, a movimentação de biomassa foi o maior desafio técnico encontrado, desafio que não estava entre os riscos avaliados. Tanto que uma das poucas críticas às equipes de projeto tratava da falta de conhecimento técnico em equipamentos.
- Após a entrada em operação das plantas, o estágio esperado de desenvolvimento tecnológico não se confirmou. Para os entrevistados, os principais desvios estavam nos equipamentos de manuseio de biomassa e em problemas de *scale-up*.

5.1.3 Contexto geral

Entre as empresas que operaram as primeiras plantas de produção do E2G havia tanto empresas com experiência na operação de plantas inovadoras quanto empresas iniciantes nesse tipo de desafio. Quase todas pareciam contar com corpos técnicos experientes e equipes de pesquisa e desenvolvimento altamente capacitadas. A maioria era de grandes corporações de diferentes setores industriais e com diferentes trajetórias; cada uma trazendo suas próprias histórias de sucesso e seus processos de inovação. E mesmo com essa diversidade, não foi possível evitar o relativo insucesso operacional experimentado pelas plantas, já que nenhuma delas conseguiu operar dentro das capacidades projetadas.

Com exceção da COSAN e da POET que já produziam o E1G, as demais empresas que participaram da construção e operação dessas plantas tinham em comum a falta de experiência com o uso de materiais sólidos lignocelulósicos como matéria-prima para a operação de plantas de processos contínuos. Durante toda a era do crescimento do petróleo como fonte de produção para os setores óleo & gás, química & petroquímica e para a geração de energia, sempre foram as matérias-primas fluidas (líquidas ou gasosas) oriundas do petróleo e do gás natural que alimentaram as plantas de processamento contínuo. E mesmo as empresas oriundas da indústria de produção de E1G, já habituadas a trabalhar com cana-de-açúcar e milho, não tinham experiência com o manuseio de materiais lignocelulósicos. Ou seja, nenhuma das operadoras pioneiras do E2G havia utilizado materiais lignocelulósicos residuais como matéria-prima para alimentação contínua de unidades de processo.

A mudança da base de produção, saindo do petróleo e seus derivados para um novo tipo de matéria-prima sólida, parece ter trazido um grau de complexidade ainda mais desafiador aos processos de inovação envolvendo o uso de novos tipos de biomassa lignocelulósica residual em grande escala, e pode ter sido um dos fatores a influenciar os problemas vividos pelos pioneiros do E2G. Vários desafios técnicos ainda desconhecidos precisaram ser enfrentados. Ao contrário do petróleo que, de forma geral, já tem suas características conhecidas, as biomassas residuais podem ser oriundas de diversas fontes e culturas (cana de açúcar, milho, trigo, madeira etc.), sob diversas formas (cavacos, palhas, sabugos, pontas, bagaços etc.) e carregam consigo diferentes características físicas, diferentes épocas de colheita e diferentes velocidades de crescimento (SOCCOL

et al, 2016). São características que precisam ser dominadas para o uso cada vez maior desse tipo de material em grande escala.

5.2 Resultados e análises das entrevistas – Exploração do conteúdo

Essa seção apresenta os resultados obtidos das entrevistas através da transcrição completa das respostas dadas pelos entrevistados às perguntas do questionário de referência, assim como de observações feitas sobre o conteúdo não explicitado nas respostas, mas expressos sob a forma de comentários pelos entrevistados.

Importante destacar que entre os entrevistados, além de profissionais que atuavam nas empresas que participaram dos projetos das plantas pioneiras, também foram ouvidos profissionais que já não mais faziam parte de nenhuma das empresas. O objetivo foi o de colher impressões já sem algum eventual viés estratégico da empresa já que fazer parte, ou não, das empresas na época das entrevistas pode influenciar nas respostas. Durante a análise das entrevistas, entretanto, não foi possível identificar diferenças significativas entre as respostas.

As respostas são apresentadas em subseções que correspondem aos temas abordados nas entrevistas: tomada de decisão, escolha da tecnologia, riscos e problemas identificados, desenvolvimento do projeto e equipe técnica, operação e solução de problemas e mercado.

5.2.1 Tomada de decisão

De forma geral, as empresas trabalham para fazer o que já sabem, e fazê-lo cada vez melhor. Quando algumas condições de contorno (tecnologias, mercado, regulamentações) sofrem mudanças, algumas empresas reagem revendo suas estratégias para dar conta dessa nova realidade. (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005).

O Quadro 8, a seguir, buscou captar os principais fatores que levaram algumas empresas a rever suas estratégias competitivas e tomar a decisão de construir plantas pioneiras para a produção do E2G.

Quadro 9 Respostas das entrevistas – Tomada de decisão

Pergunta 1
Quando (ano) foi tomada da decisão de investir na produção de E2G? Qual foram o(s) fator(es) determinante(s) para a decisão?
Respostas / Comentários / Observações dos entrevistados

A	O objetivo foi entrar no mercado de biocombustíveis através de joint ventures.
B	A decisão foi tomada em 2012 e a ideia foi de aumentar a produção de etanol por hectare utilizando a biomassa residual que já ficava nos campos.
C	Os principais fatores foram os altos preço do petróleo e as expectativas de chegada de formas alternativas de movimentação da frota terrestres.
D	A pesquisa foi iniciada em 2003, como um pequeno projeto de aferição. Uma decisão definitiva de capital para uma planta comercial foi tomada em 2012. Muitas decisões foram tomadas nesse ínterim, incluindo a decisão construção de uma planta piloto. Um fator-chave na decisão foi a crença de que haveria um impulso forte e permanente para reduzir as emissões de carbono no combustível automotivo, e que o petróleo se tornaria cada vez mais caro. A decisão da planta comercial foi tomada quando o petróleo foi negociado acima de US\$ 100/barril, e muitos 'especialistas' mostraram confiança de que nunca mais cairia abaixo da faixa de US\$ 80-90/barril.
E	Um fator muito importante foi o lançamento dos programas de incentivos públicos que deu boas condições para o financiamento de plantas pioneiras, oferecendo também <i>grant</i> para aprimoramento da tecnologia. Também desde o início dos anos 2000 houve iniciativas de formação de consórcios com academias para impulsionar a tecnologia, mesmo que apenas em escala de bancada. Alguns fabricantes de equipamentos já investiam em tecnologias para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa desde os anos 1990 e o lançamento desses incentivos estimulou a compra de patentes e a construção de unidades piloto e de demonstração nos anos seguintes.
F	Os objetivos declarados pelo Escritório de Tecnologia de Bioenergia do DOE e o lançamento do RFS foram fundamentais para direcionar investimentos no sentido do aumento dos volumes de produção de etanol e energia a partir de fontes renováveis para atingir as metas de volume.
G	A decisão foi tomada em 2011 e os fatores-chave foram as expectativas sobre a alta dos preços do petróleo e as expectativas positivas a respeito dos rendimentos e dos custos das tecnologias celulósicas.

Na época da tomada de decisão, algumas crenças permeavam todas as empresas envolvidas: os preços do petróleo “nunca mais” cairiam para valores abaixo dos US\$ 80-90; haveria um impulso forte e permanente para reduzir as emissões de carbono no combustível automotivo, e o petróleo se tornaria cada vez mais caro (RESPOSTA 1C e 1D). Além disso, desde 2005 os governos dos EUA, de alguns países da Europa e do Brasil já haviam lançado programas de incentivos à produção de combustíveis a partir de fontes renováveis (ANFAVEA, 2016; ALBERS; BERKLUNG; GRAFF, 2016; SOCCOL et al., 2016; DOS SANTOS et al., 2016; SOLOMON et al., 2017). Esses incentivos estimularam ainda mais o desenvolvimento de tecnologias para a produção de combustíveis de fontes celulósicas a ponto de criar expectativas positivas a respeito dos rendimentos e dos custos dessas tecnologias (RESPOSTA 1B, 1F e 1G). Ou seja, as pioneiras do E2G enxergaram estímulos, nas condições de contorno para enfrentar as incertezas dos processos de inovação, em buscas de novas oportunidades nesse novo setor. Expectativa de alta na demanda pela produção de combustíveis alternativos ao

petróleo e, ao mesmo tempo, as condições regulatórias adequadas estavam sendo criadas para isso. Além disso, havia tecnologia disponível – mesmo que ainda precisando de novos testes em escalas de laboratório (RESPOSTA 1E) e piloto (RESPOSTA 1D) para obter os resultados esperados.

Pelas respostas dos entrevistados, pode-se assumir que os principais incentivos para que as empresas investissem em unidades de produção de E2G vieram de condições do mercado, mas também de políticas de incentivo que vieram dos Estados (EUA principalmente) que viam a importância estratégica de produzir biocombustíveis avançados. Foram citados tanto os altos preços do petróleo quanto as novas políticas de estímulo ao desenvolvimento da produção de combustíveis alternativo. Também foram citadas as mudanças na infraestrutura agrícola (RESPOSTA 1B) e a entrada de novos atores (RESPOSTA 1A), causando reestruturações internas (RESPOSTA 1B) nos setores atingidos.

As respostas dos entrevistados indicam que suas iniciativas para enfrentar os desafios inerentes à produção pioneira do E2G vieram do mercado (aumento dos preços de petróleo e pressão social para aumento da demanda por combustíveis alternativos). Este movimento se assemelha ao que Rothwell (1994) chamou de processo de inovação de segunda geração, ou modelo “puxado pelo mercado” (*market-pull*), quando as atividades de P&D tem um papel reativo no processo (ROTHWELL, 1994).

No caso do E2G, foram as políticas de incentivo lançadas pelos governos que serviram de gatilho para o grande crescimento nos desenvolvimentos da tecnologia. Esse “projeto” dos governos de estímulos direcionados a mudar a base de produção de combustíveis, encontra suporte nos conceitos de Kline e Rosenberg (1986). Para eles, é o projeto que busca solucionar as demandas do mercado e que define o início dos processos de inovação.

O caso das plantas pioneiras do E2G, entretanto, se diferencia de abordagens tradicionais de diversos autores que tratam dos processos de inovação, pois o desenvolvimento de inovações (novas técnicas para os processos de produção) não se dá como consequência da entrada de um novo produto no mercado e sim de inovação de processo, a partir da mudança de matéria prima para a fabricação de um produto já existente. Essa perspectiva pode levar a novas interpretações sobre os modelos já conhecidos ou ao desenho de novos modelos. Essa é uma temática central dessa tese que voltará a ser discutida nas seções seguintes.

5.2.2 Escolha da tecnologia

As tecnologias de produção de E2G se diferenciam das tecnologias de produção do E1G por causa das etapas de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação, como já exemplificado no esquema de produção de E2G da Figura 11 (capítulo 3). Essas etapas, até o início desse caminho de implantação das unidades de produção do E2G, ainda não haviam sido testadas em grandes escalas e nem em instalações integradas. Durante o período entre 2006 e 2008, os esforços de pesquisadores indicavam que diversos desafios para aumentar a eficiência dessas etapas seriam cruciais para seu desempenho adequado e comercialmente econômico. Não apenas em cada uma dessas etapas, mas também devido ao forte inter-relacionamento entre elas (Ver seção 3.4). Essas características apontam para a classificação dessa inovação como radical de processo, já que altera significativamente os processos de produção de etanol até então utilizados em grande escala (E1G), para o processo de produção do E2G. Estas características permitem, também, classificar a(s) primeira(s) planta(s) de produção do E2G em escala comercial, como pioneiras (*first-of-a-kind*).

Esse entendimento encontrou eco em grande parte dos entrevistados que classificaram suas plantas de produção dessa forma, conforme pode ser observado no Quadro 9. A maioria deles já entendia, na época da tomada de decisão, que as plantas que ainda seriam construídas viriam a ser pioneiras (RESPOSTAS 5A, 5B, 5D, 5E e 5G). Apenas dois entrevistados consideravam que a nova planta seria igual ou semelhante a outras existentes (RESPOSTAS 5C e 5F).

Quadro 10 Respostas das entrevistas – Caracterização de planta industrial

Pergunta 5	
Qual das classificações abaixo melhor caracterizaria o que seria a nova planta na avaliação de tomadores de decisão/equipe técnica, no momento da tomada de decisão citado na questão anterior?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	c – Planta <i>first-of-a-kind</i> , onde tudo é novo, incluindo o manuseio da matéria-prima.
B	b – A nova planta seria de um tipo <i>first-of-a-kind</i> dentro de um setor bem conhecido.
C	a – Nova planta seria igual ou bastante semelhante a outras existentes no mundo, mas fora do seu setor principal. Tentamos usar as soluções mais conhecidas disponíveis, mas que haviam sido usadas com outras matérias-primas.
D	c – Planta <i>first-of-a-kind</i> na bioeconomia, onde tudo é novo, incluindo o manuseio da matéria-prima.

E	c – A primeira planta do gênero na bioeconomia, onde tudo é novo, inclusive o manuseio da matéria-prima. Temos experiência em bioprocessos, mas essa era uma tecnologia de processo nova para nós. O mercado também era novo. Por fim, a cadeia de suprimentos e a matéria-prima também eram novas para nós.
F	a – Nova planta seria igual ou bastante semelhante a outras existentes no mundo, mas fora do seu setor principal.
G	c – Planta <i>first-of-a-kind</i> , onde tudo é novo, incluindo o manuseio da matéria-prima. Também existia a possibilidade de adaptação da planta do E2G na planta de E1G onde a sinergia entre as plantas foi ponto fundamental na aprovação do projeto.

Mesmo considerando que as novas plantas seriam *first-of-a-kind*, parece ter havido a percepção de que o grau de descontinuidade seria baixo ou ausente, pois na grande maioria dos casos, a escolha da tecnologia não levou em conta seu grau de maturidade e sim outros fatores como: a busca pela “simplicidade” nas etapas de processo; o tempo necessário para sua implantação (quanto mais rápido, melhor) e o baixo custo (Quadro 10).

Apenas um dos entrevistados expressou preocupação sobre os critérios adotados para a escolha da tecnologia, levantando questões sobre equilíbrio entre maturidade e risco e necessidade de testes em diversas escalas (RESPOSTA 2C).

Quadro 11 Respostas das entrevistas – Escolha da tecnologia

Pergunta 2	
Por que essa tecnologia foi a escolhida?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	A tecnologia foi desenvolvida internamente, baseada em nossa planta piloto e apontava para uma implantação rápida de unidades replicáveis em escala comercial.
B	Essa tecnologia já tinha dados de produção em planta piloto que reportavam grande quantidade de etanol produzido.
C	A tecnologia escolhida indicava aumento de escala através de um equilíbrio entre risco e maturidade. Na minha experiência existe a necessidade de começar na escala de bancada, passar pelo piloto e depois pela planta de Demonstração. Para todas essas fases é necessário financiamento barato.
D	Era a tecnologia considerada mais simples e, com melhores resultados em laboratório. Poucas etapas de processo e baixo CAPEX.
E	Foram feitas consultas com várias opções de processos biotecnológicos. Foco em custo.
F	Nossa tecnologia preferida oferecia um fluxograma relativamente simples. Um pré-tratamento suave (permitindo materiais de construção um pouco mais baratos) e o mais importante: um rendimento mais alto. Esperávamos que em um negócio de combustível, a longo prazo, o rendimento fosse mais importante do que a maioria das outras métricas de processo.

G	Porque parecia integrar num pacote competitivo os três aspectos básicos do processo: Pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação OGM.
---	--

Quando se trata de inovações radicais, como no caso das tecnologias de produção do E2G, o foco em rapidez na implantação, simplicidade e baixo custo para a escolha de uma tecnologia ainda não testada em grande escala, levanta um ponto de atenção. De forma geral, segundo Kline e Rosenberg (1986), para que uma nova tecnologia alcance todo seu potencial, é preciso que ela passe por períodos de mudanças incrementais, muitas vezes longos, para que, então, possa resultar em custos de produção otimizados e aumento da produtividade. A eventual falta de conhecimento mais detalhado sobre os reais estágios de desenvolvimento e de maturidade da nova tecnologia pode prejudicar as avaliações sobre sua capacidade em desempenhar conforme se espera, já que o grau de incerteza no processo de inovação depende da base científica e do conhecimento tecnológico disponíveis. Quando essa base de conhecimento permite previsões mais precisas, as inovações podem ser mais rápidas e confiáveis. Quando não, os processos de desenvolvimento poderão se tornar mais lentos e incertos (PAVITT, 2003).

As respostas apresentadas no Quadro 12, a seguir, indicam que alguns projetos se basearam em estágios de laboratório ou de escala piloto, que, pelo modelo da Embrapa (CAPDEVILLE; ALVES; BRASIL, 2017) caracterizam maturidade tecnológica inferior ao TRL 7 (RESPOSTAS 2A, 2B, 2D, 3A, 3B, 3C E 3F). O TRL 7 só é alcançado com a realização de testes em escala de demonstração, para verificar a aplicação da tecnologia em escala industrial e reduzir riscos técnicos (HELLSMARK et al, 2016), sendo o último nível antes das etapas finais, que são desenvolvidas já em escala industrial (TRL 8 e 9).

Outros entrevistados, entretanto, afirmaram que suas tecnologias haviam sido testadas em escalas maiores (RESPOSTAS 3D, 3E E 3G), chegando a mencionar plantas de demonstração, plantas integradas e plantas industriais, mas sem deixar claro o quanto integradas eram essas plantas de demonstração e se elas realmente conseguiam representar as condições da “vida real”.

Quadro 12 Respostas das entrevistas – Maturidade tecnológica

Perguntas 3 e 4
<p>Quando da tomada de decisão, qual era o estágio de desenvolvimento / maturidade da tecnologia escolhida na avaliação dos tomadores de decisão?</p> <p>Após a entrada em operação da planta comercial/demonstração, o estágio de desenvolvimento/maturidade da tecnologia avaliado na questão anterior se confirmou?</p>

Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	<p>A tecnologia rodava em escala de laboratório. Existia uma planta demo que ainda não estava operando.</p> <p>Não houve escala comercial. Esperávamos iniciar a planta 2 antes de partir da planta 1 visando ganho de tempo e aprendizado. Entretanto, ao final, a foi decidido pela interrupção do projeto antes da construção de juma planta comercial.</p>
B	<p>A planta piloto já trabalhava a mais de 5 anos operando com várias biomassas e antes da decisão final foi feito um teste piloto com o tipo de biomassa que escolhemos para definir parâmetros de projeto.</p> <p>Entretanto, tivemos muitos problemas com o <i>scale-up</i> do projeto.</p>
C	<p>Escala piloto. Nossos fornecedores garantiam o desenvolvimento da tecnologia com equipamentos já existentes no setor de P&P. Esses fornecedores normalmente desenvolvem máquinas no risco do cliente.</p> <p>O piloto funcionou bem, mas as máquinas de escala comercial não corresponderam.</p>
D	<p>Isso foi comprovado em escala de demonstração, e um investimento industrial anterior estava a caminho.</p> <p>Entretanto, na planta comercial, experimentamos vários problemas em diversas etapas do processo.</p>
E	<p>Operamos em todas as escalas, inclusive alugamos uma planta existente para ver o "comportamento" de nossa matéria-prima em condições experimentais.</p> <p>A planta de demonstração não foi bem-sucedida nos primeiros testes e não havia mais verba nem atratividade para reconstruir a planta comercial. O projeto foi cancelado.</p>
F	<p>A planta piloto estava em operação há alguns anos. As tecnologias usadas no projeto foram testadas nessa planta piloto ou em locais de fornecedores. Os resultados comerciais, da planta piloto e do laboratório eram revisados continuamente. Esperava-se que a demonstração bem-sucedida em escala comercial ajudaria a lançar a replicação e a construção de novas biorrefinarias celulósicas.</p> <p>Os resultados não foram os esperados. Houve vários problemas envolvendo o manuseio de biomassa e problemas de corrosão no pré-tratamento.</p>
G	<p>Havia sido testada em uma escala relativamente grande e de forma integrada. Nessa etapa, o projeto da planta ainda estava em um estágio inicial com: projeto conceitual incluindo fluxograma, balanço de massa e calor, volumes, temperaturas, principais materiais de construção, principais especificações e layout da planta.</p> <p>Entretanto, tivemos vários problemas com os equipamentos. Nós experimentamos mais disso do que normalmente acontece em um projeto. Quando decidimos por sair do negócio, o que tínhamos medido na planta comercial até então correspondia à nossa pesquisa, bancada e experiência em escala piloto.</p>

Os entrevistados informaram que dois projetos foram cancelados antes da construção da planta comercial: um deles ainda em escala de laboratório e o outro devido ao insucesso da planta de demonstração (RESPOSTAS 4A e 4E).

Nos demais casos, quando questionados sobre o desempenho da tecnologia após entrada em operação das plantas, as respostas foram unânimes em mostrar uma grande diferença entre as expectativas iniciais e o desempenho encontrado. Tanto para as

empresas que declaram ter havido testes anteriores em escalas menores (inferiores ao TRL 7) quanto as que declaram testes anteriores em escalas maiores, as respostas mostram que, a plantas industriais pioneiras não tiveram sucesso nas etapas de *scale-up* e experimentaram um desempenho técnico abaixo do esperado (RESPOSTAS 4B, 4C, 4D, 4F e 4G).

A tecnologia para produção do E2G a partir de material lignocelulósico é composta por diferentes etapas de processo que se interligam até a etapa final de fabricação do produto. Destaque para as etapas de pré-tratamento, hidrólise e fermentação, conforme já descrito no capítulo 3 e representado na Figura 12 (seção 3.7). Também pode ser observado na mesma figura que, além dessas 3 etapas de conversão, a tecnologia de produção inclui o sistema de alimentação de biomassa (antes da etapa de pré-tratamento) e os sistemas a jusante da fermentação, como a etapa de destilação e os sistemas auxiliares (utilidades e tratamento de efluentes). Alguns entrevistados declararam que nos estágios de desenvolvimento do projeto, muitas tecnologias haviam sido testadas apenas em escalas de laboratório e piloto – que não permitiam testes integrados. Assim sendo, é pertinente questionar se todas essas etapas estavam no mesmo estágio de desenvolvimento ou de maturidade e se alguma(s) delas foi(foram) determinante(s) no baixo rendimento apresentado pelas plantas comerciais. Essa questão voltará a ser abordada ainda neste capítulo, após a análise dos demais temas abordados nas entrevistas.

É importante destacar que conduzir testes em plantas de demonstração é fundamental para especificar as condições de processo adequadas. É uma etapa que contribui para explorar tecnologias emergentes em condições do “mundo real” e facilita a implantação da tecnologia em escala industrial (HEDELER, 2019). Testes em plantas de demonstração integradas, são geralmente muito mais caros do que as atividades de laboratório e piloto, mas são muito mais confiáveis. A maioria dos projetos de desenvolvimento não deveria contornar essa etapa, porque ela pode ser a única opção para testar o processo completo em um sistema fechado (LAGER 2000 apud FRISHAMMAR, 2015). No caso das plantas do E2G, não foi possível observar pelas respostas, se as plantas de demonstração utilizadas (nos casos em que isso aconteceu), incluíam todas as etapas a serem testadas, inclusive as etapas de manuseio e alimentação de biomassa. Se não houve teste em plantas de demonstração integradas, pode não ter sido possível simular os

movimentos de manuseio e alimentação de biomassa, identificar seus problemas e buscar por soluções antes da construção de plantas em escala comercial.

5.2.3 Riscos considerados x problemas ocorridos

As respostas referentes aos riscos do projeto identificados na fase de tomada de decisão, foram, entre todos os temas debatidos nas entrevistas, as que mais apresentaram diferenças entre os entrevistados, conforme Quadro 13 a seguir. No entanto, apesar das diferenças, um ponto foi comum entre todos os entrevistados: os aspectos técnicos foram considerados como os principais riscos do projeto por todas as empresas.

Quadro 13 Respostas das entrevistas – Riscos considerados x problemas reais

Perguntas 6, 7 e 9	
<p>Quais os 3 principais riscos identificados na época da tomada de decisão, ligados à tecnologia/operação da planta em ordem de importância? Quais foram as estratégias adotadas para mitigá-los?</p> <p>Quais os 3 principais problemas enfrentados (tecnologia/operação) após a entrada em operação da unidade? Comprovaram os riscos identificados no início? Se não foram, quais as situações imprevistas mais impactantes?</p> <p>Por que a planta não operou nas condições de projeto dentro do cronograma esperado? Ainda não opera nas condições de projeto? Pelos mesmos motivos iniciais? Se já opera, quais as principais alterações realizadas?</p>	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	<p>O projeto foi de uma planta integrada a partir das partes que já existem no mercado. O risco estava na lavagem da biomassa.</p> <p>Erramos em confiar no fornecedor de equipamentos que conhecia apenas o setor de P&P. Os equipamentos eram muito grandes e pesados. Os testes foram feitos já durante a fase de operação. Estar dependente de apenas um fornecedor de enzimas era um dos principais riscos. Tentamos mitigar esse risco com a busca de novos fornecedores (China). Além disso, o preço do óleo não foi considerado como um grande risco.</p> <p>Houve falta de continuidade operacional. Muita pressão da alta diretoria para acelerar a partida da planta e venda do etanol. A pressão para aproveitar o momento foi muito grande.</p>
B	<p>Os principais riscos eram: o custo das enzimas (mitigação: contrato de longo prazo com o fornecedor); o excesso de custos do projeto (mitigação: construção com equipe interna) e o; comportamento da matéria-prima (mitigação: ensaios com bagaço e palha).</p> <p>Os principais problemas enfrentados foram: a estabilidade do processo; o rendimento enzimático e a limpeza da matéria-prima.</p> <p>A planta não operou por causa dos sistemas de alimentação de matéria-prima.</p>
C	<p>Os principais riscos eram: o manuseio de sólidos ao longo dos processos de conversão; a progressão da tecnologia de enzimas e leveduras para conversão, rendimento e custo; o manuseio de material de matéria-prima de biomassa em mudança - mudanças sazonais e de idade da matéria-prima e o risco de tecnologia de águas residuais - digestão anaeróbica e depuração de biogás de águas residuais.</p>

	<p>Os grandes problemas foram o desempenho do pré-tratamento e a movimentação de biomassa.</p> <p>A planta vem operando com muitos problemas sem conseguir alcançar as condições de projeto.</p>
D	<p>Os principais riscos eram: econômico (mitigação: buscar custo competitivo contra o concorrente / crença na busca por baixo carbono); tecnologia (mitigação: associar com quem entende – tecnologia não era identificado como um grande risco); escala (mitigação: buscar uma solução escalável – dar escala ao negócio um mercado grande). Outra ação mitigadora foi também a previsão de licenciamento da tecnologia. Outros grandes riscos eram: o custo da enzima (mitigação: busca de solução GMO) e a matéria-prima (mitigação: uso de bagaço já que a palha não era de graça por causa do trade-off com EE).</p> <p>Mesmo não tendo implantado a unidade comercial, os seguintes problemas já haviam sido identificados: Em termos de tecnologia: associar com quem entende foi insuficiente, pois o caminho foi mais difícil do que previsto. Investimento acima do esperado. Além disso, risco agrícola não foi visto, em princípio.</p> <p>Não implantamos uma unidade comercial.</p>
E	<p>Os principais riscos eram: as condições de mercado (ação mitigadora: advocacia junto aos reguladores, envolvimento de uma empresa de distribuição muito experiente); a nova tecnologia (ação mitigadora: pilotagem em larga escala, fluxograma totalmente integrado e colaboração com cientistas do governo); a nova cadeia de suprimentos (mitigação: pilotagem em escala crescente no campo mais de 6 anos (6 colheitas), colaboração com o departamento de agricultura e com uma universidade agrícola de classe mundial) e a execução do projeto (mitigação: uso de empreiteiros de engenharia experientes e empreiteiros de construção experientes e comprovados pela indústria).</p> <p>A execução do projeto esbarrou em problemas, não relacionados à tecnologia e ao mercado do etanol celulósico. Isso causou atrasos substanciais no projeto. As condições do mercado enfraqueceram quando: o preço do petróleo caiu rapidamente em 2014 para cerca de um quarto do preço que tínhamos visto na autorização do projeto; os reguladores perderam a paciência com os atrasos na produção em grande escala do E2G e estavam cada vez menos dispostos a apoiar a manutenção dos incentivos.</p> <p>Os principais problemas foram causados por sistemas de suporte na planta, como utilidades. Não com os principais conceitos de processo.</p>
F	<p>Os maiores riscos conhecidos estavam relacionados à etapa de pré-tratamento, ou seja, o gerenciamento de biomassa sólida e fofa em reatores com altas pressões e depressurização rápida o que levaria à erosão e baixo tempo de operação / Mitigação: escolhemos os equipamentos mais conhecidos disponíveis e precisávamos de adaptação à nossa biomassa e mesmo assim não funcionou. O segundo risco foi a hidrólise que necessitou de enzimas específicas para nosso pré-tratamento / como mitigação: escolhemos o melhor coquetel enzimático comercial e mesmo muito caro o desempenho das enzimas foi bom. O terceiro risco era a fermentação / mitigação: fermentação C6 feita na planta 1G existente. Não encontramos nenhuma boa solução na época para a fermentação C5 e, portanto, esperávamos que o tratamento de resíduos (por exemplo, biodigestão) convertesse C5 "economicamente"</p> <p>Os primeiros testes em escalas menores não foram bem-sucedidos. Não houve verba para mudança de equipamentos e conceitos.</p> <p>Paramos na fase piloto devido a grandes problemas na etapa do pré-tratamento.</p>
G	<p>Os principais riscos eram: a qualidade de material de construção do pré-tratamento (mitigação: seguir as especificações do projeto e identificar fornecedores com capacidade para execução do projeto); a performance das enzimas (mitigação: foi firmado um acordo com fabricante de enzimas com programa que definia cronograma para atingimento de performance e adaptação da enzima no nosso produto pré-tratado); a fermentação de açúcares C5 (mitigação: foi introduzido no processo a separação dos açúcares C5 e C6, no primeiro ano processamos somente C6 e tivemos tempo para testar pelo menos 5 diferentes cepas de levedura geneticamente modificado e encontramos a que se adaptava no mosto de C5).</p> <p>Ocorreram muitos problemas com corrosão/abrasão do equipamento de pré-tratamento em local não previsto; a tecnologia utilizada para separação da lignina não funcionou como previsto, tivemos que</p>

<p>adaptar processo alternativo e problemas de desgaste no equipamento de separação dos açúcares C5/C6.</p>

<p>A planta não operou e ainda não opera nas condições especificadas no projeto pelos motivos já descritos nas questões anteriores. A planta opera atualmente com 70% da capacidade nominal e as correções estão sendo executadas nos períodos de entressafra.</p>
--

Entre os aspectos técnicos, o risco identificado em todas as empresas era o desempenho das etapas de processo – pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação; tanto seu desempenho técnico quanto os custos envolvidos nessas etapas, com destaque para o custo das enzimas. O trato com a biomassa também foi um item quase unânime; tanto em aspectos ligados ao seu manuseio quanto a potenciais dificuldades ligadas à logística de fornecimento. Apenas um dos entrevistados não citou a biomassa como um risco. Os riscos inerentes às etapas de projeto, construção e montagem das unidades também estiveram presentes, mas citados apenas por dois entrevistados.

Além dos riscos técnicos, apenas um risco ligado às condições de mercado foi citado. Tratava-se de preocupação com mudanças na regulação.

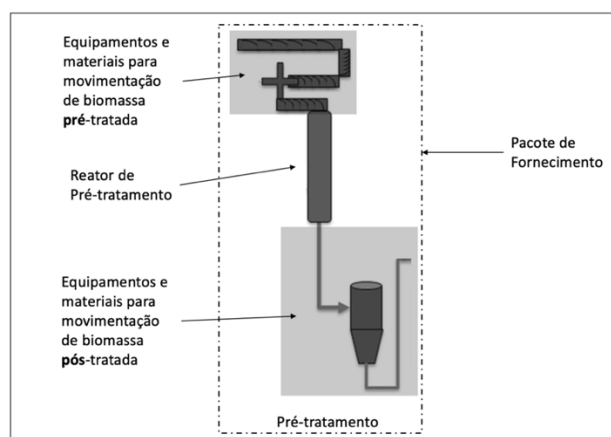
Entretanto, o perfil dos problemas ocorridos após a entrada em operação das unidades foi diferente dos riscos identificados, mas ainda ligados principalmente aos aspectos técnicos.

Analisando o modelo encadeado de Kline e Rosenberg (1968), pode-se entender que diferenças entre os riscos esperados no início das fases de projeto e os problemas que efetivamente acontecem durante o início das operações fazem parte do processo de inovação. Nesse modelo (Figura 4, da seção 2.2) não existe apenas uma sequência direta no desenvolvimento da inovação, onde a pesquisa alimenta a ciência, que alimenta a engenharia, que usa o conhecimento. Existe, na verdade, um encadeamento interativo que precisa envolver *feedbacks* da produção de volta para ciência e engenharia e vice-versa. Ainda segundo Kline e Rosenberg (1968), o grau de incerteza nos processos de inovação vai depender da base científica e do conhecimento tecnológico disponíveis. Quando essa base de conhecimento não permite previsões mais precisas, como pareceu ser o caso das plantas do E2G, pode ser necessário recorrer a testes ou processos empíricos que são incertos e mais lentos. Para Pavitt (2003), todo esse processo interativo irá depender de como as empresas constroem e mantêm o seu conhecimento: de como elas se estruturam internamente ou em conjunto com outras organizações e de como elas estabelecem incentivos internos para garantir que a inovação prossiga rapidamente e na direção certa.

O principal problema esteve relacionado ao pré-tratamento. Ao abordar os problemas na etapa de pré-tratamento, um entrevistado citou que foi um erro confiar demasiadamente nos fornecedores de equipamentos (RESPOSTA 7A) e responsabilizou a falta de continuidade operacional pela interrupção das operações (RESPOSTA 9A). Outro falou em problemas de estabilidade do processo (RESPOSTA 7B) e responsabilizou os sistemas de alimentação de biomassa pela parada da planta (RESPOSTA 9B). Um terceiro falou do desempenho do pré-tratamento e da movimentação da biomassa (RESPOSTA 7C) e informou que a planta continuava operando (na época da entrevista) com muitos problemas e sem alcançar as condições de projeto (RESPOSTA 9C). Outro entrevistado ainda, falou sobre abrasão e corrosão nos equipamentos (RESPOSTA 7G) e informou que a planta continuava sem operar nas condições de projeto (também na época da entrevista) devido aos mesmos problemas (RESPOSTA 9G).

Como já abordado no capítulo 3 (seção 3.4), existem várias rotas tecnológicas para a etapa de pré-tratamento, que é a etapa do processo responsável por quebrar a resistência da lignina e tornar a celulose e a hemicelulose acessíveis ao processo de hidrólise enzimática. O pré-tratamento, em si, acontece dentro de um reator que varia de características em função da rota tecnológica escolhida. Todos os equipamentos auxiliares instalados nessa etapa, antes ou depois do reator, cuidam “apenas” do transporte da biomassa pré-tratada (a montante do reator) ou pós-tratada (a jusante do reator). Na maioria dos casos das plantas pioneiras, as operadoras do E2G compraram as instalações de pré-tratamento, incluindo os equipamentos auxiliares, como um “pacote” de um mesmo fornecedor, conforme detalhe na Figura 13, a seguir.

Figura 12 Esquema de produção de E2G a partir da palha de cana – Pré-tratamento



Fonte: Elaboração própria

Ao longo das entrevistas, foi possível observar que os principais problemas enfrentados não se referiam ao reator em si ou ao processo de quebra da lignina. Os problemas se referiam aos equipamentos e instalações auxiliares responsáveis pelo transporte da biomassa (antes e depois do reator), incluídos nos pacotes de fornecimento e que eram tratados de forma geral como “pré-tratamento”.

Dificuldades no manuseio de sólidos em escala industrial, entretanto, não são problemas recentes. Estudo realizado pela *Rand Corporation* em 1981 (MERROW; PHILLIPS; MYERS, 1981), sobre o crescimento de custos e deficiências de desempenho em plantas de processo pioneiras tratou do desempenho de plantas de beneficiamento de sólidos. O estudo investigou o tempo planejado de inicialização de 40 plantas de processo em escala comercial nos Estados Unidos e Canadá ao longo de seis anos. Os resultados indicaram que 80% das instalações de processamento de sólidos apresentavam problemas no manuseio da matéria-prima. O tempo médio de partida para plantas de manuseio de sólidos foi de 18 meses, enquanto o tempo médio de partida para plantas de manuseio de líquidos e gás foi de 3 meses. Além disso, as plantas de manuseio de sólidos operavam, em média, com apenas 40% a 50% da capacidade nominal. Os resultados do estudo indicaram que as quedas de desempenho não eram atribuídas aos processos químicos e sim aos processos físicos e mecânicos (MERROW; PHILLIPS; MYERS, 1981).

Confrontando as informações da *Rand Corporation* com as respostas dos entrevistados, é possível supor que talvez as plantas do E2G tenham alcançado esse nível de utilização da capacidade (40-50% da capacidade nominal), mas que esses valores tenham frustrado as expectativas de empresas oriundas do setor químico, p.ex. que têm experiência com níveis de utilização bem mais elevados.

Ainda sobre o quadro 13, acima, apenas um entrevistado (RESPOSTA 7E) não citou explicitamente o pré-tratamento e seus equipamentos entre os principais problemas enfrentados, mas citou problemas de projeto e problemas causados por sistemas de suporte da planta, a exemplo das utilidades (RESPOSTA 9E). Para esse mesmo entrevistado, seu principal problema não foi técnico e sim a redução dos incentivos dados pelo governo dos EUA. Para ele, sem esse incentivo e com a queda dos preços do petróleo, a operação da planta ficou economicamente inviável e a empresa decidiu interromper as operações, sem deixar claro se os problemas técnicos permitiriam ou não essa continuidade. Vale destacar que foi essa mesma empresa que levantou esse mesmo tipo

de risco (condições de mercado / agências reguladoras) nas fases iniciais do projeto. Esse ponto voltará a ser discutido na subseção 5.3.5 a seguir.

5.2.4 Equipe técnica, projeto e trocas de experiência

Montar uma equipe técnica dedicada e altamente qualificada foi outro ponto comum entre as pioneiras do E2G, segundo os entrevistados, tanto para desenvolvimento do projeto e gerenciamento da construção das plantas quanto para sua operação, conforme descrito no Quadro 14, abaixo:

Quadro 14 Respostas das entrevistas – Equipe técnica

Perguntas 11 e 12	
<p>Como foram escolhidos os profissionais técnicos a serem envolvidos no projeto (projeto/construção/operação)? Quais as principais competências procuradas? Eles tinham experiência anterior em plantas que operavam com matérias-primas renováveis? Essa experiência foi fator decisivo na fase de recrutamento e contratação desses profissionais?</p> <p>Como foi o desempenho dessas equipes? As competências definidas foram adequadas para a solução dos problemas enfrentados? Foi necessário contratar novos profissionais com competências complementares não previstas no início? Pode citar algumas dessas competências complementares?</p>	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	<p>Equipe toda nova. Apenas um dos profissionais tinha experiência com biomassa.</p> <p>A equipe de engenharia não mergulhou nos problemas dos equipamentos específicos. Faltou experiência na aplicação desses equipamentos.</p>
B	<p>A equipe foi selecionada dentro de nossos quadros. Procuramos profissionais com experiência anterior em IG e em processos bioquímicos.</p> <p>A equipe era altamente qualificada, mas enfrentamos muitos problemas com os equipamentos comprados.</p>
C	<p>A equipe técnica foi recrutada dentro da própria empresa, não existia na época ninguém que operava com esta tecnologia. O pessoal foi treinado na planta piloto e tivemos acompanhamento e treinamento on-site durante os primeiros anos do projeto.</p> <p>O desempenho foi adequado, contratamos especialistas focados nos nossos principais problemas de manutenção e pessoal mais qualificado com doutorado e mestrado para cuidar das questões de enzimas e fermentação de C5.</p>
D	<p>A equipe técnica foi selecionada com base em sua experiência anterior na indústria petroquímica ou de etanol, que eram os exemplos mais próximos do nosso setor.</p> <p>A equipe estava muito qualificada, mas os desafios foram além do estado da arte.</p>
E	<p>Procuramos os players mais conhecidos em dimensionamento e design de equipamentos. Nossa equipe de engenharia e os pesquisadores estiveram totalmente envolvidos em todas as etapas.</p> <p>Não detectamos falhas na equipe. O desempenho foi adequado. O problema estava no desenvolvimento da tecnologia. Etapa preliminar ao desenvolvimento do projeto.</p>

F	<p>Utilizamos uma equipe nova que não tinha o foco necessário na biomassa. Esse tema foi completamente delegado aos fornecedores de equipamentos.</p> <p>O desempenho das equipes foi bem satisfatório. Os problemas encontrados estavam ligados aos equipamentos projetados pelos fornecedores. Alguns desses fornecedores estão sendo processados.</p>
G	<p>Tínhamos um grande grupo técnico com ampla experiência. Muitos de nossos profissionais já tinham desenvolvido novos processos, sendo que um desses já era ligado a biotecnologia. Esses profissionais estavam envolvidos no projeto. Seja em tempo integral ou parcial.</p> <p>A equipe teve um bom desempenho, mas não conseguiu superar os problemas de execução do projeto. Principalmente nos sistemas externos à unidade de produção: utilidades e alimentação de matéria-prima.</p>

Parte dos entrevistados relatou que as empresas selecionaram suas equipes tendo como fonte seus próprios grupos empresariais (RESPOSTAS 11B, 11C e 11G) enquanto outros disseram ter ido buscar profissionais altamente competentes no mercado (RESPOSTAS 11A, 11D, 11E e 11F), principalmente nos setores de química, petroquímica e de produção de E1G. Poucos profissionais tinham experiência em biomassa ou em biotecnologia (RESPOSTA 11A e 11G) e nenhum ainda com experiência em produção de E2G, já que as plantas seriam pioneiras. Os entrevistados deixaram claro que o foco das empresas na formação das equipes foi o acompanhamento dos projetos – conceitual e básico, principalmente nas etapas de conversão (pré-tratamento, hidrólise e fermentação) e de integração de processos, além do desenvolvimento das demais etapas do projeto para a construção e operação das plantas industriais. Ficou claro também que os projetos para as etapas a montante e a jusante dessas novas etapas de conversão foram delegados a fornecedores, por se tratar de tecnologias que supostamente já seriam dominadas (RESPOSTA 11F).

Possuir estrutura interna, tecnicamente forte e estruturada para desenvolvimento de inovações é uma das características determinantes de setores com empresas de trajetórias de inovação “baseadas em ciência”, como os setores de química e eletroeletrônica, entre outros (PAVITT, 1984). Quase todas as pioneiras do E2G eram empresas estabelecidas nesses setores – com a ressalva já feita à GranBio. Durante as entrevistas ficou claro que os pioneiros do E2G não consideravam a tecnologia como um de seus principais riscos, pois confiavam que suas equipes técnicas fariam os ajustes necessários ao longo dos processos de projeto, construção e entrada em operação. Um dos entrevistados chegou a afirmar verbalmente que a “tecnologia nunca foi considerada como um problema”. Essa estratégia encontra eco nas teorias de Pavitt (2003) onde grandes corporações com estruturas rígidas e processos organizacionais bem

estabelecidos, podem procurar o futuro condicionadas pelo que aprenderam a fazer no passado (PAVITT, 2003).

As respostas dos entrevistados, indicam que, no que diz respeito aos processos de conversão (pré-tratamento, hidrólise e fermentação), as pioneiras do E2G tiveram sucesso em seguir essa trajetória já que eles não foram citados entre os principais problemas que prejudicaram a operação das unidades. Sempre que as plantas conseguiam operar, as tecnologias ligadas as essas etapas conseguiam atender as expectativas geradas inicialmente, o que pode indicar que, ao operar em grande escala, conseguiram alcançar níveis correspondentes aos TRL 7 ou 8 (CAPDEVILLE; ALVES; BRASIL, 2017).

Mas o resultado parece não sido o mesmo para os sistemas auxiliares à produção. A maioria das entrevistas discutidas na subseção anterior indicou que os principais problemas operacionais estavam relacionados aos equipamentos para movimentação de biomassa, adquiridos com tecnologia de terceiros. Como suas equipes internas não tinham a qualificação necessária, eles delegaram a fornecedores o desenvolvimento de novos equipamentos assim como de novas tecnologias. Alguns entrevistados afirmaram ter confiado demais nos fabricantes de equipamentos já que esses tinham ampla experiência anterior no manuseio e alimentação de biomassa no setor de papel & celulose (RESPOSTA 6A). Além disso, as equipes próprias não conseguiam se envolver adequadamente nessas questões (RESPOSTAS 12A, 12B, 12E, 12F E 12G). Se por questões de falta de capacitação ou de tempo, não ficou claro nas entrevistas. Os problemas operacionais com alguns desses equipamentos foram tão significativos que algumas das pioneiras entraram em disputas litigiosas com seus fabricantes pedindo ressarcimento de prejuízos, devido ao baixo rendimento apresentado tanto pelos equipamentos quanto pelas tecnologias adquiridas.

Frente ao desafio de operar a partir de biomassa – um tipo de matéria-prima que não é familiar às empresas que operam com processos químicos ou similares, quase todas as pioneiras do E2G delegaram o desenvolvimento de seus sistemas de pré-tratamento a grandes fornecedoras de equipamentos. Esse movimento, por si só, não pode ser caracterizado como um problema já que em setores consolidados, como o setor de papel & celulose e o de produção de E1G, as empresas possuem trajetórias tecnológicas “dominadas pelos fornecedores”, e delegam seu próprio aprimoramento tecnológico para fornecedores especializados, através de novos equipamentos ou novas tecnologias (PAVITT, 1984). E nem por isso, deixam de ser produtivas.

Para Pavitt (1984), empresas de diferentes trajetórias tecnológicas podem se relacionar através transferência de informação, conhecimento e diversificação tecnológica. No contexto específico da colaboração entre fabricantes de equipamentos e empresas de processo, é importante uma detalhada troca de informações, pois o compartilhamento inadequado ou, a retenção indevida de informações podem ser centrais para definir o sucesso ou o insucesso desses desenvolvimentos (LAGER; FRISHAMMAR, 2010). A colaboração bem-sucedida depende de uma gestão adequada dos fluxos de informação e do compartilhamento de conhecimento entre as partes envolvidas. No caso do E2G, a combinação de empresas com trajetórias tecnológicas diferentes – empresas do setor químico com fornecedores oriundos de papel & celulose, pode ter sido uma das causas de dificuldade que não conseguiram ser ultrapassadas.

Fornecedores de equipamento só conseguem desenvolver novos equipamentos a partir do conhecimento bem definido das novas demandas, que devem vir dos usuários inovadores. Os novos equipamentos não têm como serem desenvolvidos se os usuários não compartilham claramente a demanda. Os usuários são o que von Hippel (1988) chamou de fonte funcional da inovação. No caso dos setores de papel & celulose e E1G, esse processo de conhecer o problema do usuário já teria ocorrido no início das trajetórias quando a concepção dos equipamentos já foi "aprendida" pelos fornecedores.

Problemas relacionados aos equipamentos de manuseio de biomassa também foram relatados como motivos para mudanças nas etapas de projeto e até mesmo de construção, conforme apresentado no Quadro 15, a seguir. No entanto, os equipamentos não foram os únicos responsáveis pelas mudanças.

Quadro 15 Respostas das entrevistas – Desenvolvimento do projeto

Pergunta 8	
Os projetos mudaram muito ao longo das etapas de construção? Onde ocorreram as principais mudanças? Quais foram os principais motivos técnicos/operacionais para essas mudanças?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	Impurezas foram um problema. A limpeza a seco da matéria-prima também assim como a confiança na maturidade da tecnologia.
B	Durante a construção não houve mudanças no projeto. Os projetos de movimentação de biomassa, fermentação, destilação e utilidades foram realizadas internamente por nossas equipes. Tivemos que fazer adaptações nos primeiros anos de funcionamento para reforçar durabilidade de equipamentos do pré-tratamento, equipamentos para separação de lignina e separação de açúcares C5/C6.

C	Sim. Saindo do modelo com 2ª geração <i>stand-alone</i> para modelo integrado dentro do conceito de biorrefinaria. Visava redução da exposição ao risco financeiro. Também houve a revisão do pacote agrícola após a descoberta do risco agrícola, buscando sinergia com outros modelos de negócio. Outro ponto foi que a discussão sobre separação C5/C6 só aconteceu durante o FEL3 (o momento adequado seria no FEL2). Também durante o FEL3 foi decidido usar fábrica de enzima de terceiros. Nesse momento, o CAPEX já estava apontando para <i>overrun</i> .
D	Não conseguimos encontrar nenhuma boa solução para o pré-tratamento. Outros players usaram conceitos diferentes e tiveram um sucesso razoável, mas com custos bem maiores.
E	Sim. A execução do projeto esbarrou em problemas, não relacionados à tecnologia e ao mercado do etanol celulósico. Isso causou atrasos substanciais no projeto. As condições do mercado enfraqueceram quando o preço do petróleo caiu rapidamente em 2014 para cerca de 1/4 do preço que tínhamos visto na autorização do projeto. Além disso, houve a redução dos estímulos através de políticas econômicas.
F	Sim, os projetos mudaram muito durante a fase de construção. Principais mudanças na área de pré-tratamento. Os principais motivos estavam atrelados ao detentor da tecnologia.
G	Sim. Houve diversas mudanças nas etapas de projeto, principalmente ligados a mudanças na tecnologia.

Alguns entrevistados citaram uma grande incidência de mudanças na tecnologia (projetos conceitual e básico) já durante o desenvolvimento das fases mais avançadas do projeto. Essas mudanças podem ter sido consequência dos estágios ainda iniciais de maturidade tecnológica, já que os estágios anteriores ao TRL 7 ainda são considerados com estágios de validação e melhoramento da tecnologia (capítulo 3, subseção 3.10.3). Mudanças que também podem ser vistas como características da fase fluida dos modelos de dinâmica de inovação de Utterback (1987). A fase fluida se caracteriza pelo uso de mão-de-obra altamente qualificada e de maquinário e equipamentos e uso genérico como parece ter sido o caso das plantas pioneiras. Entretanto aqui vale uma ressalva semelhante àquela feita nas análises sobre modelos dos processos de inovação (subseção 5.3.1). No modelo de dinâmica de inovação apresentado por Utterback (1987), a fase fluida se caracteriza por taxas de mudanças de produto muito altas, e com inovações de processo assumindo um papel secundário. Já, no caso do E2G, diferentemente do modelo de Utterback (1987), o desenvolvimento das inovações de processo não se dá como consequência da entrada de um novo produto no mercado e sim da entrada de uma nova matéria-prima para a fabricação de um produto já existente.

Sob a ótica do conhecimento, as frequentes mudanças nos projetos podem caracterizar que os processos inovadores ainda estavam entre os subprocessos de produção do conhecimento e transformação do conhecimento em tecnologia (PAVITT, 2003). Para o autor, a transformação do conhecimento em produtos (nesse caso, em

tecnologia) se inicia antes mesmo da conclusão das etapas de produção do conhecimento e precisa de uma coordenação que integre a geração do conhecimento com a aprendizagem das condições de incerteza. Essa combinação, inerente aos processos de inovação, caracteriza ambientes de incerteza e de mudanças que podem fluir de formas diferentes a depender das características das estruturas organizacionais de cada empresa inovadora. A troca de conhecimento entre os técnicos de um mesmo estágio de processo deve fluir adequadamente, mas a troca de conhecimento entre etapas diferentes tende a fluir com mais dificuldade, pois nem sempre os canais são apropriados (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). Nesse sentido, é de se esperar que a troca de conhecimento envolvendo equipes diferentes, de empresas diferentes flua com ainda mais dificuldade, demandando que a empresa que coordena todas as interfaces, atue na construção de canais adequados.

A colaboração bem-sucedida depende de uma gestão adequada dos fluxos de informação e do compartilhamento de conhecimento entre as partes interessadas em um mesmo projeto. No contexto específico da colaboração entre fabricantes de equipamentos e empresas de processo no desenvolvimento de inovações ou na resolução de problemas, é importante uma detalhada troca de informações (LAGER; FRISHAMMAR, 2010). Como já dito, o compartilhamento adequado ou, a retenção indevida de informações podem ser pontos centrais a definir o sucesso ou o insucesso de processos inovadores que envolvam fontes externas de inovação, como os fornecedores de equipamentos e tecnologia, no caso das plantas pioneiras do E2G.

Nesse sentido, a pesquisa perguntou aos entrevistados sobre a existência de troca de experiência entre os diversos atores desse novo setor, conforme Quadro 16.

Quadro 16 Respostas das entrevistas – Troca de experiências

Pergunta 10	
Houve troca de informações sobre os problemas enfrentados com os demais players do setor visando acelerar a solução dos problemas? Se sim, os problemas eram semelhantes? Quais foram os problemas que sua empresa enfrentou diferente dos demais players?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	Não. Todos queriam se pioneiros na venda de licença. A venda de tecnologia seria a fonte de receitas/lucros.
B	Trocamos algumas informações. Principalmente sobre separação de lignina e limpeza da biomassa.
C	Não. Fizemos o desenvolvimento internamente.

D	Não muito. Houve alguma troca ainda na definição de tecnologia. Havia mais competição do que cooperação.
E	Eu não acho que os problemas foram semelhantes. Eu entendo que muitos outros lutaram com problemas de pré-tratamento, ou seja, problemas na unidade onde a biomassa sofre uma primeira reação química (além da redução de tamanho). Principalmente para romper a lignina da biomassa e torná-la mais disponível para outros agentes (como enzimas) para agir sobre isso mais tarde. Mas nós não tivemos problemas nessa etapa.
F	Sim, tivemos troca de informações. Todo mundo estava enfrentando problemas semelhantes.
G	Tivemos algumas trocas de informações, mas principalmente sobre sistemas de apoio (utilidades, biomassa).

Dois entrevistados afirmaram não ter havido trocas de informações/conhecimentos (RESPOSTA 10A e 10C), sendo que o primeiro chegou a sugerir que estaria em jogo uma futura venda de tecnologia para novos entrantes. A empresa que conseguisse sucesso na operação da planta, partiria na frente nessa corrida para a venda de tecnologia. Três outros entrevistados informaram ter havido troca parcial de informações, restritas aos sistemas auxiliares, como: utilidades, efluentes etc. (RESPOSTA 10B, 10D e 10G). Enquanto na resposta 10E o entrevistado entende que os problemas não eram semelhantes, o entrevistado da resposta 10F afirma exatamente o contrário: que todos estavam enfrentando os mesmos problemas. Essa divergência pode confirmar a falta de troca de informações estruturadas e de qualidade entre as empresas.

Para Pavitt (1984), a maior parte do conhecimento gerado no desenvolvimento de inovações acaba sendo específico para a empresa desenvolvedora, mas também de aplicação dentro de seus próprios setores de atuação. No caso das empresas do E2G, é possível especular que uma troca de experiências entre elas poderia gerar novos conhecimentos que poderiam acelerar o desenvolvimento de soluções para os problemas comuns e dar fôlego ao desenvolvimento da produção do E2G. Conforme afirmam Chesbrough e Crowther (2006), o uso de entradas e saídas intencionais de conhecimento pode acelerar a inovação interna e expandir os mercados para seu uso externo.

Pode-se supor que os padrões setoriais de inovação de seus setores de origem e a dependência de suas trajetórias de sucesso naqueles setores dessem, às pioneiras do E2G, a certeza de que conseguiriam, sozinhas, vencer os obstáculos que surgiram. O que de forma geral, não aconteceu.

5.2.5 Mercado

O último tema abordado nas entrevistas trata das expectativas e da participação das empresas no setor de produção do E2G, conforme Quadro 17.

Quadro 17 Respostas das entrevistas – O papel das empresas

Pergunta 13	
Qual o papel de sua empresa nesse setor?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	
A	c. Desenvolver e aplicar tecnologia
B	b. Aplicar tecnologia (produção de E2G)
C	a. Venda de tecnologia
D	c. Desenvolver e aplicar tecnologia
E	a. Desenvolver tecnologia: licença de tecnologia, produtos químicos bioquímicos e/ou desenvolvimento e fornecimento de equipamentos
F	c. Desenvolver e aplicar tecnologia
G	c. Desenvolver e aplicar tecnologia

Apenas um entrevistado (RESPOSTA 13B) afirmou que a empresa tinha objetivo específico de aplicar tecnologia (operar plantas de produção). Todas as demais, tinham interesse na venda das tecnologias desenvolvidas, confirmando a resposta 10A que responsabilizava essas expectativas pela falta de troca de experiências entre as empresas.

Na época das entrevistas, apenas duas empresas declaravam permanecer no setor de produção do E2G (RESPOSTAS 14C e 14F), sendo que uma mostrava a intenção de ampliar sua atuação (ver Quadro 18). Todas as demais já não operavam mais as unidades industriais, alegando motivos diversos: falta de retorno do investimento, venda da divisão do E2G, foco no negócio principal, falta de apoio de políticas públicas e queda no preço do petróleo.

Quadro 18 Respostas das entrevistas – Permanência no setor

Pergunta 14	
A empresa se mantém no mercado de E2G/Biocombustíveis? Por que a empresa decidiu sair (ou ficar) do mercado?	
Respostas / Comentários / Observações dos Entrevistados	

A	Não. Essa divisão foi vendida.
B	A redução dos incentivos por parte do governo dos EUA (principal cliente) resultou em erosão dos valores econômicos, incerteza da consistência das políticas e severa redução no interesse de investimento em ativos de biocombustíveis de segunda geração.
C	A empresa se mantém no mercado e pretende ampliar sua atuação.
D	Com a queda do preço do petróleo, o projeto foi desmobilizado. Não era o negócio principal.
E	Acreditamos que fundamentalmente temos uma tecnologia forte, também do lado da biotecnologia, e que talvez tenhamos chegado cedo demais nesse mercado. Em outras palavras, ainda esperamos que em algum momento no futuro, esse mercado possa ser apoiado e desenvolvido.
F	Sim, a empresa continua no mercado.
G	Não, porque a empresa não encontrou uma forma de devolver o investimento comercializando uma solução incompleta e potencialmente muito cara.

Mudanças nas condições contorno alteram as bases sobre as quais as inovações estão sendo desenvolvidas. São mudanças que exigem dos inovadores um redesenho de suas estratégias e estruturas para dar conta da nova realidade. Entretanto, essas perturbações não são facilmente absorvidas e algumas empresas decidem interromper o processo inovador, retornando a suas trajetórias originais (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005). No caso do E2G, a queda de patamar dos preços do petróleo e de seus derivados, somada à redução dos programas de incentivos (principalmente dos EUA), apontava para uma redução na margem dos produtores de etanol combustível, incluindo os do E2G, gerando desestímulo para continuação de investimentos nessa indústria e retorno de empresas à suas trajetórias originais, como indica ser o caso da empresa citada nas respostas acima.

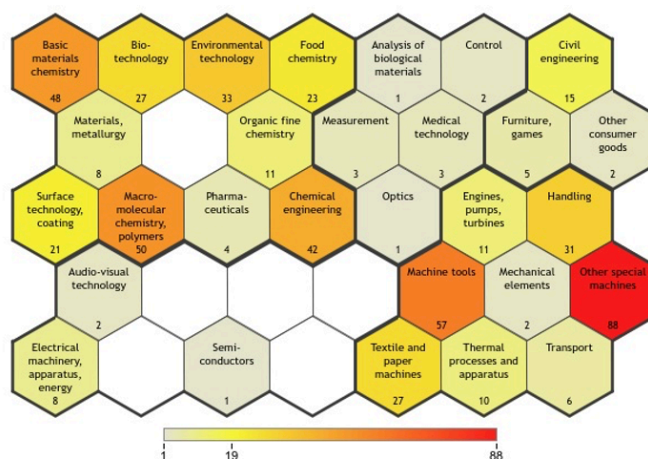
5.2.6 Resultados da pesquisas de patentes

Os problemas envolvendo o manuseio e a alimentação de biomassa levantados pelos entrevistados motivaram uma busca por patentes sobre equipamentos de movimentação de biomassas lignocelulósicas. O objetivo foi identificar se, fora do universo de conhecimento das operadoras do E2G, havia alguma tecnologia já desenvolvida e patenteadas com essas finalidades.

As buscas iniciais da pesquisa de patentes, realizada em abril de 2021 e compreendendo uma janela de tempo entre 1970 e 2020, encontraram 58.198 depósitos de patentes ligados aos setores de geração de energia e produção de combustíveis. Após restringir as buscas aos tipos de biomassas lignocelulósicas (resíduos de cana-de-açúcar,

milho e trigo), o resultado foi reduzido para 5.640 patentes, indicando que, entre 1970 e 2020, apenas 1% de todas as patentes depositadas sobre projetos de equipamentos para uso em biomassa foram aplicados para atingir os tipos específicos usados nas plantas de E2G. Os filtros seguintes orientaram a seleção para as áreas de engenharia mecânica, visando excluir equipamentos tipicamente ligados aos processos de conversão da biomassa, como reatores, queimadores e outros equipamentos. Os resultados dessa etapa trouxeram apenas 171 patentes. Importante comentar que, mesmo utilizando filtros para direcionar os resultados para a engenharia mecânica, o número de patentes depositadas sob o domínio tecnológico da química ainda permaneceu muito alto (ver Figura 14). Isso pode indicar que, também nessas patentes, os depositantes ainda abordavam temas ligados aos processos de conversão.

Figura 13 Domínio tecnológico das 171 patentes



Fonte: Elaboração própria com uso do *Questel Orbit Intelligence*, 2019-2020

Os conteúdos de todas as 171 patentes foram lidos na íntegra, para realizar uma última seleção qualitativa, identificando quais delas tratavam especificamente de projetos de equipamentos para movimentação ou alimentação dos tipos de biomassas lignocelulósicas utilizadas nas plantas pioneiras do E2G. Após essa seleção qualitativa, restaram apenas 4 patentes. Todas as 4 chinesas:

- um 'Alimentador de transporte de hastes/talos tipo parafuso' (depositada pela Shandong Shankuang Machinery em 2007);

- uma 'Prensa de moldagem por compressão de biomassa' (depositada pela Handan Goldenlion Cotton Machinery em 2013);
- um 'Moedor de alimentação tipo universal' (depositada pela Shenyang University Of Technology em 2014) e
- uma 'Máquina trituradora de grama' (depositada pela Urumqi Animal Husbandry Abundant Weiye Agricultural Machinery Manufacturing em 2015).

A 'Prensa de moldagem por compressão de biomassa' foi selecionada porque incluiu em seu projeto um sistema de alimentação de prensa contínua para palhas de milho e palhas de trigo, entre os materiais estudados. Tanto o 'Moedor de alimentação tipo universal' quanto a 'Máquina trituradora de grama' foram selecionados por abordarem a trituração de palha em geral, palha de milho e palha de arroz. Como o transporte de materiais com fibras longas é sempre problemático, o conhecimento de técnicas para alimentação, moagem e trituração da palha de milho, trigo e arroz, desenvolvidos nessas patentes pode ser considerado útil para a alimentação desse tipo de material em instalações industriais.

O projeto do 'alimentador de transporte de hastes/talos tipo parafuso, depositado em 2007, descreve um equipamento típico para alimentação de matérias-primas sólidas. Como foi projetado para lidar com palha de trigo e outros materiais, ele também foi selecionado.

Nenhuma dessas 4 patentes trata de equipamentos projetados para um dos tipos específicos de biomassa usados em plantas do E2G. Todos tratam, em um mesmo projeto, de diferentes tipos de biomassa, trazendo a ideia de que o equipamento projetado pode manusear ou alimentar qualquer um deles com a mesma eficiência. No entanto, se durante o desenvolvimento das patentes as empresas utilizaram diversos tipos de biomassas lignocelulósicas em seus testes, inclusive aquelas utilizadas nas plantas de E2G, é possível que esses testes possam contribuir para a geração de conhecimento técnico sobre o comportamento desses materiais. É importante notar que todas as quatro patentes foram aplicadas antes de 2016, quando os problemas operacionais das usinas E2G pioneiras começaram a ser detectados. Isso pode indicar que esses desenvolvimentos não foram motivados nem influenciados por esses problemas.

Essa pesquisa também utilizou um segundo caminho na busca por patentes que tratassem de projetos de equipamentos para o uso de biomassas lignocelulósicas. Esse

caminho pesquisou todas as patentes depositadas por 48 empresas⁸ ligadas a produção de E2G. Empresas cujos nomes foram selecionados em jornais e revistas especializadas. Após encontrar mais de 4.000 patentes depositadas por essas empresas tratando sobre uso de biomassa em geral, apenas 33 delas estavam dentro do domínio tecnológico ligados a engenharia mecânica (excluindo assim, equipamentos ligados a processos químicos/bioquímicos). Após análise qualitativa sobre o conteúdo de todas as 33, apenas 6 foram selecionadas. Todas depositadas pela Valmet, um dos maiores fabricantes de equipamentos do setor de papel & celulose, e que fez parte dos projetos de algumas das pioneiras do E2G. Essas patentes tratavam de projetos de equipamentos para manuseio de material 'não-madeira' e 'material lignocelulósico', sendo:

- um 'Recipiente com dispositivo de descarga' (depositada em 2001);
- um 'Sistema para manuseio de material vegetal não-madeira' (2012);
- um 'Transportador helicoidal para material lignocelulósico (2013);
- um Recipiente de estocagem intermediária para coleta e descarga de material lignocelulósico' (2013);
- um 'Alimentador de parafuso para biomassa lignocelulósica' (2014) e
- um 'Sistema para alimentação de biomassa não-madeira (2017).

Dois deles referem-se a um recipiente “pulmão” tipicamente localizado entre diferentes etapas de processo: uma contínua seguida de outra descontínua. Esse tipo de equipamentos serve para absorver as oscilações entre esses dois tipos de processos.

Os outros quatro tratam de projetos de 'alimentador de parafuso', normalmente usados para alimentar cavacos de madeira no setor de papel & celulose, mas também usados nas fábricas pioneiras de produção de E2G. Nenhuma dessas 6 patentes foi desenvolvida explicitamente para um tipo específico de biomassa. Todas elas continham projetos de equipamentos direcionados a biomassas genéricas como: 'biomassa não-madeira' e 'biomassa lignocelulósica', assumindo que tipos diferentes de biomassa teriam

⁸ Abengoa, American Process Inc (API), Andritz, Anhui Guozhen Group, BASF, Beta Renewables, Bharat Petroleum Corporation, Bio Tech Oy, Biochemtex, Bioflex, Bioforever, BP, Bunge, Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Clariant, Cosan, DSM, DuPont, Edenig, Eni's Versalis, Enviral, Gevo's GIFT technology, Gran Investimentos, GranBio, Hindustan Petroleum Corporation, Indian Oil Corporation, InEnTec, Institute of Chemical Technology, Iogen Corporation, L&T Hydrocarbon Engineering, LanzaTech, Mossi & Ghisolfi Group (M&G), Metso, Petrobras, Poet, Praj Industries, Raízen, Renmatix's Plantrose Process, Shell, Siouxland Energy, Southwest Iowa Renewable, Energy, St1 Biofuels Ou, Sweetwater's Sunburst, TRHoldco, Valmet, VERBIO North America Corporation e VERBIO Vereinigte BioEnergie AG.

Obs.: Esta lista não considerou se algumas empresas listadas pertencem ou não ao mesmo grupo, pois pode haver pedidos de patentes em seus nomes individualmente

comportamentos semelhantes entre si. A maioria dessas patentes da Valmet foi depositada antes de 2016, sendo que apenas uma foi depositada em 2017.

Para efeito de comparação, a Valmet aplicou um total de 5.805 patentes em todas as áreas durante o mesmo período coberto por esta pesquisa; dessas, apenas 6 (0,1%) se referem ao manuseio de biomassas lignocelulósicas. A Metso e a Andritz, outras fabricantes que também fornecem equipamentos para o setor de papel & celulose, depositaram, respectivamente, 4.335 e 2.568 patentes no mesmo período, indicando que também utilizam o pedido de patente para garantir os direitos sobre seus conhecimentos. Nenhum desses dois fabricantes foi encontrado entre as patentes selecionadas.

Em resumo, entre centenas de milhares de patentes pesquisadas, apenas 10 foram selecionadas (4 chinesas e 6 da Valmet) e, nenhuma delas tratava de projeto de equipamentos para um tipo específico de biomassa lignocelulósica residual. Apesar de mostrar algum interesse de empresas, pesquisadores e universidades sobre o tema, o resultado indica que não há conhecimento específico patenteado para alimentar diferentes tipos específicos de biomassas lignocelulósicas em instalações industriais.

Vale destacar que os equipamentos para manuseio de sólidos utilizados em uma planta de produção não se restringem às roscas/parafusos transportadores que são utilizados imediatamente a montante do reator de pré-tratamento, como no caso de algumas das patentes da Valmet. Antes dessa etapa, diversos outros equipamentos, como moinhos, peneiras separadoras, transportadores de correias, desfardadores e outros, (Figura 12 – capítulo 3), também são necessários e, segundo os entrevistados, também apresentaram problemas de abrasão e quebras constantes. A exceção de um ‘Moedor de alimentação universal’ patenteado ainda em 2014, nenhuma outra patente selecionada tratou desses tipos de equipamentos.

O número ínfimo de patentes encontradas após a seleção final ou mesmo a ausência de patentes específicas sobre o tema, por si só, não constitui evidência da falta de desenvolvimento tecnológico, pois tal conhecimento também pode ser um segredo industrial ou tecnológico. No entanto, esse pequeno número de patentes, somado às dificuldades enfrentadas pelas plantas do E2G para operar continuamente, são fortes indicadores de que existe uma lacuna conhecimento referente ao manuseio de biomassa no âmbito da engenharia que precisa ser preenchido para suportar o desenvolvimento de biorrefinarias.

A descrição completa dos resultados obtidos nessa segunda pesquisa está apresentada no Anexo I.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo debate todo o conteúdo apresentado no capítulo anterior à luz dos processos de inovação revisitados no capítulo 2 e está dividido em 3 sessões: a primeira que tece diversos comentários a respeito dos resultados apresentados no capítulo 5; a segunda que apresenta o Quadro Analítico dos Processos de Inovação do E2G que é fruto do quadro analítico geral proposto no capítulo 2, redesenhado para refletir o caso das plantas pioneiras do E2G, assim como análises obtidas a partir dele e, a terceira sessão que levanta considerações e reflexões com o objetivo de contribuir para a compreensão dos desafios enfrentados pelas plantas do E2G e de seus possíveis desdobramentos para o futuro do uso de biomassas lignocelulósicas como matéria-prima industrial.

6.1 Comentários gerais

As empresas que decidiram enfrentar os desafios de se envolver em processos de inovação para produzir o E2G, o fizeram a partir da identificação de uma janela de oportunidade aberta pelos aumentos dos preços do petróleo, e pelo lançamento de políticas públicas nos EUA, Europa e Brasil que estimularam o crescimento da oferta de produção de combustíveis renováveis. Todas eram oriundas dos setores de química, petroquímica e energia e todas (com exceção já mencionada da GranBio) com aparente capacidade de investimento suficiente para suportar as incertezas típicas de um processo de inovação em uma nova indústria com rotas tecnológicas ainda em desenvolvimento.

Apesar de reconhecerem que as tecnologias a serem utilizadas em suas plantas pioneiras ainda não haviam atingido níveis de maturidade de TRL 7 ou 8, de maneira geral, as empresas optaram por tecnologias mais simples, de baixo custo e que fossem implantadas com rapidez.

Na fase de tomada de decisão para construção das plantas, os principais riscos identificados diziam respeito aos custos de produção, principalmente custos ligados aos coquetéis enzimáticos a serem usados na etapa de hidrólise enzimática, mas também a potenciais problemas de fornecimento de biomassa e suas dificuldades logísticas. Havia a identificação de riscos ligados aos processos de conversão, mas não eram considerados os mais críticos.

Todas as empresas montaram corpos técnicos qualificados, dedicados aos projetos, e possuíam estruturas internas de engenharia capazes de lidar com os desafios tecnológicos que pudessem surgir. Também de forma geral, os entrevistados deixaram

transparecer sua confiança nessas equipes e em sua capacidade de solucionar potenciais problemas nas etapas de projeto, construção e montagem, apesar de reconhecerem (em função de suas experiências anteriores) que essas etapas sempre trazem surpresas e imprevistos. O ponto de destaque nessa questão é que, por entenderem que os potenciais problemas estariam vinculados aos processos de conversão de biomassa (pré-tratamento, hidrólise e fermentação), essas equipes foram formadas por técnicos com capacitação para lidar com esses processos. Eventuais problemas ligados aos sistemas periféricos, seriam transferidas para fornecedores especializados, assim como era feito em suas experiências anteriores com projetos inovadores em seus setores de origem.

Como esperado, os projetos sofreram diversas alterações ligadas aos processos de conversão. A grande quantidade e a alta frequência das alterações, entretanto, causaram preocupação. As primeiras alterações aconteceram já durante o desenvolvimento do projeto básico e continuaram até durante a fase de pré-operação das plantas. Mesmo assim, as plantas iniciaram seus processos de entrada em operação (*start-up*) dentro de uma faixa de tempo que estava dentro das expectativas. O que não estava previsto foi a ocorrência de inúmeras paradas que se sucederam, cada vez mais frequentes, com quebras de equipamentos e intensos processos de corrosão e abrasão nos sistemas de alimentação de biomassa e nas instalações de alimentação e descarga da etapa de pré-tratamento.

Apesar de cada empresa ter seguido seu próprio caminho, sem trocas de experiências ou de informações entre elas, as entrevistas indicam que os problemas operacionais enfrentados por elas eram bem semelhantes e, principalmente ligados ao manuseio da biomassa. Segundo as entrevistas, as empresas seguiram a estratégia de não compartilhar seus problemas prevendo uma competição por um mercado potencial de venda de tecnologia: a primeira empresa a ter sua tecnologia funcionando entraria com vantagens nesse novo mercado.

O que parece ter sido um “ponto cego” na avaliação de riscos das empresas é que, nesse caso, as novas plantas não iriam operar a partir de derivados do petróleo e nem de qualquer outra matéria-prima líquida ou gasosa, como o setor químico/petroquímico está habituado: elas iriam operar a partir de novas matérias-primas sólidas até então desconhecidas no âmbito de operações industriais em grandes escalas. Dificuldades com manuseio de sólidos já não eram uma novidade no meio industrial desde a década de 1980 (MERROW; PHILLIPS; MYERS, 1981). Mesmo assim, parece que essas dificuldades não foram consideradas em seus projetos. Segundo as informações dos entrevistados,

problemas com a movimentação da biomassa não estavam entre as prioridades nem dos pesquisadores e nem das empresas envolvidas na produção do E2G. Tanto que, na composição de suas equipes técnicas, não havia especialistas com essa capacitação. E foi justamente o trato com a matéria-prima um dos principais fatores que impediram as plantas de operar continuamente.

O uso em grande escala das biomassas lignocelulósicas, em indústrias de processamento contínuo, não se mostrou como um problema técnico secundário, mesmo não envolvendo reações químicas. Os desafios impostos pela movimentação da biomassa mostraram que essas questões precisam ser encaradas com relevância semelhante aos problemas ligados aos processos de conversão e não relegados a um segundo plano, como se fossem de menor complexidade.

Fazendo uma analogia com fórmulas matemáticas, nessa indústria emergente, a matéria-prima não é mais uma constante, como no caso dos derivados do petróleo: ela é uma variável fundamental para a solução da equação e exige a compreensão de que questões relacionadas ao seu manuseio são complexas e ainda precisam ser estudadas, testadas e trabalhadas para que se garanta seu aprendizado. De outra forma, as biorrefinarias seguirão enfrentando sérios problemas de fluxo, que poderão comprometer as taxas de ocupação de capacidade projetadas e, conseqüentemente, o retorno esperado dos investimentos realizados, assim como aconteceu nas plantas pioneiras do E2G.

Os atributos da biomassa são variáveis e inconsistentes, tanto dentro de uma determinada espécie quanto entre diferentes espécies. Além disso, mudanças de local e época da colheita podem afetar seu teor de umidade, dificultando tanto as operações de transporte e manuseio quanto de armazenamento e pré-processamento. Por isso, os equipamentos a serem utilizados para seu manuseio precisam considerar as especificidades de cada material para que se possa garantir estabilidade nos fluxos de alimentação e possibilitar operações industriais contínuas e estáveis (DOE, 2016). As dificuldades operacionais enfrentadas pelas pioneiras do E2G e a falta de patentes com projetos de equipamentos dedicados a tipos específicos de biomassa dão indicações de que projetos os equipamentos podem ainda não ter conseguido alcançar esses objetivos. Além disso, é importante considerar que para dimensionar equipamentos para tipos específicos de biomassa, é preciso que essas especificidades sejam conhecidas e esse trabalho encontrou dados que indicam a existência de uma lacuna de conhecimento, no âmbito da engenharia, justamente no que diz respeito às características específicas das

biomassas lignocelulósicas.

Nesse ponto, vale considerar que a engenharia de processos, em especial a engenharia química, se desenvolveu ao longo de quase um século, a partir da química do petróleo, manuseando, processando e transformando materiais fluídos (líquidos e gases). Em sua 5ª edição do Manual de Engenharia Química, Perry e Chilton (1980) tratam, em 87% de seu conteúdo, de processos dedicados aos fluidos, sendo apenas 13% dedicados a materiais sólidos. E mesmo entre estes, não se encontram muitas fórmulas ou equações que tratem de seu processamento. Em sua grande maioria, seu conteúdo traz soluções empíricas a partir de materiais específicos como grãos, madeira e minérios utilizados na agricultura e pecuária assim como nos setores de papel & celulose e mineração; setores que carregam grandes diferenças para os de química & petroquímica e suas indústrias de processos contínuos, que operam em grandes escalas. A potencial entrada, em grande escala, das biomassas lignocelulósicas residuais nos processos produtivos de fabricação de bioprodutos e de geração de bioenergia, pode ser o gatilho para que a engenharia se debruce sobre a ciência que estuda os materiais sólidos e desenvolva novas tecnologias que atendam ao manuseio desse tipo de material.

6.2 Os Processos de inovação no caso do E2G – Quadro analítico

As análises e discussões realizadas no capítulo anterior levam a composição de um Quadro Analítico dos Processos de Inovação do E2G (Quadro 19), com base no quadro analítico introduzido no capítulo 2, redesenhado para refletir o Caso das Plantas Pioneiras do E2G, conforme detalhado nos parágrafos que se seguem.

Quadro 19 Quadro analítico – Processos de inovação do E2G

Arcabouço Teórico / Dimensões (autores, ano de publicação)	Unidade de Análise	Características / Classificações / Fases
Condições de Contorno (TIDD; BESSANT; PAVITT, 2005)	Sistemas	Mercado → <u>Regulação</u> → Tecnologia
Empresa Inovadora (LAZONICK, 2006)	Empresa	Financiamento, Estratégia e <u>Organização – capacitação do corpo técnico</u>
Modelos (PAVITT, 1984; KLINE; ROSENBERG, 1986)	Setor	Puxado pelo Mercado → Encadeado (<i>chain-linked</i>) – <u>nos processos de conversão</u>
Padrões Setoriais (PAVITT, 1984)		<u>Combinação (?) de padrões</u> entre Baseados em Ciência / Dominados pelos Fornecedores

Fontes de Inovação (VON HIPPEL, 1988)			<u>Interna</u> \leftrightarrow <u>Fornecedor</u>
Processos de Inovação (UTTERBACK, 1987-1994)	Conhecimento (PAVITT, 2003)	<u>Matéria-prima</u> e Processo	Produção \rightarrow Transformação do Conhecimento – <u>falta de troca/combinção de conhecimento</u>
	Natureza		Inovação em Processo
	Graus de Desenvolvimento		Inovação Radical – <u>inclusão da MP como unidade de análise</u>
	Fases		Fase Fluida – <u>inclusão da MP como unidade de análise</u>

O Quadro Analítico dos Processos de Inovação do E2G indica que mudanças nas condições do mercado (aumentos nos preços do petróleo), estimularam mudanças na regulação/políticas públicas (criação dos incentivos fiscais nos EUA, Europa e Brasil), que foram determinantes para os desenvolvimentos de novas tecnologias que viabilizassem a produção em grande escala do E2G. Nesse caso, as políticas públicas foram determinantes tanto para a entrada de empresas nessa nova indústria quanto para a saída posterior, de algumas delas.

Como já discutido na seção anterior, as empresas que decidiram investir na produção do E2G possuíam as principais características que Lazonick (2006) atribui às empresas inovadoras: robustez financeira, estratégias claras e organização bem estruturada. O ponto de destaque que pode ser observado também no quadro analítico foi a falta de capacitação técnica frente aos problemas encontrados nos sistemas de alimentação de biomassa.

Apesar da indústria do E2G ainda não fazer parte de um setor estruturado, a análise dos modelos de inovação indica que o desenvolvimento das novas plantas do E2G foi um movimento puxado pelo mercado (ROTHWELL, 1994), com os aumentos nos preços dos derivados do petróleo e os incentivos oferecidos pelas políticas públicas e sendo seus principais alavancadores. Entretanto, pode-se dizer que também carregam características semelhantes ao modelo encadeado onde a inovação é impulsionada não pelo mercado ou pela tecnologia, mas sim por um projeto de solução (KLINE; ROSENBERG, 1986). A principal característica do modelo encadeado são as contínuas interações entre tecnologia, ciência e pesquisa, o que parece ter ocorrido nas etapas de pré-tratamento (exceto para os equipamentos de movimentação de biomassa), hidrólise e fermentação, que, ao operarem em escala industrial de modo satisfatório, mesmo que ainda sem continuidade,

conseguiram alcançar uma maturidade tecnológica próxima aos níveis TRL 7 ou 8. Entretanto, as dificuldades operacionais enfrentadas pelos sistemas de alimentação de biomassa, somadas à falta de informações sobre novos desenvolvimentos tecnológicos detectadas nas pesquisas de patentes, parecem indicar que esses sistemas não foram objeto dos mesmos processos de desenvolvimento encadeados como propõe o modelo de Kline e Rosenberg (1986). É muito provável, portanto, que esses sistemas ainda precisem de estudos e experimentos envolvendo usuários e fornecedores especializados de equipamentos num processo de desenvolvimento coordenado (VON HIPPEL, 1988; PAVITT, 2003; CHESBROUGH; CROWTHER, 2006; LAGER; FRISHAMMAR, 2010). Desde o nível conceitual (TRL 1 e 2), passando por testes em pequenas escalas (laboratório e piloto) até testes em escalas de demonstração (TRL 7) para que possam alcançar os mesmos estágios de desenvolvimento dos processos de conversão (pré-tratamento, hidrólise e fermentação). Sendo assim, somente após todas as etapas de alimentação e de conversão atingirem o mesmo estágio de desenvolvimento é que a tecnologia de produção do E2G poderia caminhar para aos graus mais avançados de maturidade (TRL 8 e 9).

Uma análise de padrões setoriais de inovação, deve ser vista com ressalvas já que, a indústria do E2G, ainda emergente e lidando com diferentes estratégias e desafios não deve se enquadrar em um padrão. Mas, considerando essas ressalvas, é possível notar que, mesmo que cada empresa tenha seguido por caminhos específicos, sem trocas de informações entre elas, todo o desenvolvimento dos processos de inovação no caso das plantas pioneiras do E2G carrega a marca dos setores baseados em ciência: grandes empresas oriundas dos setores de química e de geração de energia com forte estrutura técnica interna para desenvolvimento de inovações nas etapas de processo e delegação do desenvolvimento de projetos dos sistemas periféricos (entre eles os sistemas de movimentação de biomassa) para fornecedores (PAVITT, 1984). No caso do E2G, a combinação de empresas com trajetórias tecnológicas baseadas em ciência (originárias do setor químico) com de fornecedores que atuam em setores com empresas dominadas pelos fornecedores (papel & celulose), parece não ter resultado em um fluxo adequado de troca de conhecimento. Nem mesmo quando essas empresas baseadas com trajetórias baseadas em ciência formaram *joint-ventures* com empresas com trajetórias tecnológicas dominadas pelos fornecedores (E1G) esse fluxo de informações parece ter acontecido de forma apropriada. Pode não ter havido uma clara compreensão sobre quem deveria ter

desempenhado o papel de fonte funcional de inovação (VON HIPPEL, 1988) e, quais informações deveriam ter sido trocadas ou que novos conhecimentos precisariam ter sido criados para o desenvolvimento dos projetos de equipamentos. Vale destacar que em setores com trajetórias dominadas por fornecedores, esses fornecedores, geralmente, detêm grande parte do conhecimento tecnológico da indústria e conduzem o desenvolvimento de inovações sob financiamento e risco dos contratantes (LAGER; FRISHAMMAR, 2010).

As consequências dessa falta de fluidez de informações e da falta de clareza sobre o papel de cada um no desenvolvimento das inovações para os sistemas de alimentação de biomassa podem ter sido as responsáveis pela ineficiência operacional dos equipamentos de manuseio de biomassa, que acabaram por ficar a cargo dos projetos dos fornecedores sem domínio sobre as características das matérias-primas. O desenvolvimento de novas trajetórias tecnológicas de sucesso, com características específicas de um eventual setor de produção do E2G deverá suscitar a criação de novos padrões com definições mais claras sobre o papel de cada parte no desenvolvimento de inovações.

Sob a ótica do conhecimento (PAVITT, 2003), a indústria do E2G, ainda emergente, parecia estar na sobreposição das fases de produção do conhecimento e de transformação do conhecimento em novos processos de produção. A falta da troca de informações e experiências entre os envolvidos pode ter tido papel importante na dificuldade das empresas em encontrar soluções para problemas que parecem ter sido semelhantes. Como o manuseio da biomassa não fazia parte do pacote tecnológico objeto de futuras vendas de tecnologia, um compartilhamento de informações entre as diversas operadoras poderia sugerir a formação de grupos de desenvolvimento tecnológico envolvendo a indústria, fornecedores e até mesmo universidades e institutos de pesquisa na busca de soluções mais imediatas. Essa troca de informações entre as empresas poderia também chegar até formuladores de políticas públicas que pudessem viabilizar financiamentos de estímulo a essas pesquisas.

Sob a abordagem dos processos de inovação, como proposta por Utterback (1987-1994), a indústria do E2G vivia sua fase fluida com rotas tecnológicas ainda em desenvolvimento. Porém com uma peculiaridade: o caso do E2G não trata de uma inovação de processo que se segue à inovação de produto como representado nos modelos tradicionais de Utterback (1987). Ela se dá em função da utilização de novas matérias-

primas, para fabricação de um produto já existente. Esta perspectiva sugere que as unidades de análise não são apenas produto e processo, pois nas rupturas tecnológicas envolvendo as biomassas lignocelulósicas, a matéria-prima deve se tornar uma variável importante a ser considerada nos processos de tomada de decisão envolvendo compras de tecnologia ou desenvolvimento de projetos para implantação de plantas pioneiras.

6.2.1 Resumo – Quadro analítico

Assim como enunciado na seção 2.6 do referencial teórico, o quadro analítico dos Processos de Inovação do E2G (Quadro 19) consegue apresentar em conjunto, e de forma esquemática, as diversas dimensões de análise e características dos processos de inovação experimentados pelas pioneiras do E2G, dando destaque a determinadas dimensões ou características. Como visto nos parágrafos anteriores, o uso desse quadro também permite extrair lições que podem ser úteis para análise dos processos de inovação de outras biorrefinarias ou outras descontinuidades tecnológicas que envolvam inovações de processos baseados em novas matérias-primas, como no caso do E2G.

Em análises fora do âmbito da bioeconomia, esse quadro analítico também pode ser explorado de forma mais ampla: seja na análise de sistemas, para identificar a importância das condições de contorno que influenciam ou impactam os processos de inovação; seja para estudo das empresas como unidade de análise, ao se observar as características das empresas que se propõe a atuar com empresas inovadoras; ou ainda na avaliação de novos padrões setoriais de inovação que surjam sob novas condições e em ambientes onde as inovações estão se desenvolvendo ou impactando.

6.3 Considerações e reflexões

Esse trabalho defende a tese que o uso de biomassas lignocelulósicas em escala industrial, deve ocupar o centro dos debates estratégicos sobre desenvolvimentos científicos e tecnológicos, no âmbito da bioeconomia. Como já discutido, sem o funcionamento adequado dos equipamentos de alimentação de matéria-prima, plantas industriais contínuas não conseguem alcançar a estabilidade necessária para operar dentro de suas condições de projeto. É fundamental destacar que, sem que haja conhecimento sobre as especificidades do tipo de biomassa não é possível se projetar os equipamentos adequados para sua movimentação. Assim sendo, os desafios que envolvem essa questão vão além do campo da indústria e perpassam diversas esferas que envolvem os processos

de criação do conhecimento, como em modelos propostos por Nonaka e Takeuchi (1995). Desde os conhecimentos científicos básicos a respeito desses materiais ainda pouco utilizados em escala industrial, passando por seu compartilhamento e combinação com o conhecimento existente no âmbito da engenharia, até sua absorção e transformação em tecnologia para aplicação industrial.

Mesmo com essa amplitude, as análises desenvolvidas nessa tese, sobre as relações entre os processos de inovação e os desafios enfrentados no caso do E2G, alcançam seu objetivo de propor reflexões e considerações que contribuam na compreensão desses desafios e de seus possíveis desdobramentos. Desdobramentos que tanto podem impactar na retomada das produções em grande escala do E2G, quanto na implantação de novas biorrefinarias e no crescimento de outras indústrias baseadas no uso de biomassas como matéria-prima industrial.

6.3.1 Sobre as perguntas que nortearam a tese

Essa pesquisa se inicia a partir de questões sobre os desafios enfrentados na implantação de biorrefinarias que se transformaram em obstáculos operacionais e sobre quais experiências dessas biorrefinarias podem contribuir para o sucesso de outras plantas que se utilizem de biomassa como matéria-prima.

O desenvolvimento do trabalho indica que entre os diversos desafios enfrentados pelas biorrefinarias pioneiras, instaladas nas últimas duas décadas – incluindo as plantas do E2G, parece que o funcionamento dos sistemas de movimentação e alimentação de biomassa foi um dos principais obstáculos técnicos (se não, o principal) à manutenção da continuidade operacional das plantas. E é justamente a continuidade operacional que viabiliza o desenvolvimento de inovações incrementais que irão propiciar otimizações operacionais trazendo aumento de produtividade e alcance da rentabilidade esperada para as plantas, viabilizando o crescimento da indústria.

As biorrefinarias do E2G foram projetadas, construídas e operadas por empresas oriundas de 6 países diferentes (sem considerar as empresas de desenvolvimento de tecnologia e projeto de equipamentos), que atuam, pelo menos, nos setores de química, petroquímica, açúcar & álcool, geração de energia, óleo & gás e nutrição & saúde. Algumas centenárias, quase todas experientes no desenvolvimento e uso de novas tecnologias e todas com robustez financeira para suportar as incertezas dos processos de inovação. E mesmo com toda essa diversidade, as dificuldades no manuseio de biomassa

parecem ter surpreendido a todas. Em função de suas trajetórias tecnológicas, algumas empresas podem não ter tido “olhos” para problemas técnicos vindos da biomassa, visto que, em seu histórico, a matéria-prima (líquida ou gasosa na maioria das vezes) já não era fonte de problemas complexos. Ou ainda, porque seus padrões de atuação em seus setores de origem podem ter “desviado” sua atenção dos problemas que poderiam surgir com o uso de matérias-primas sólidas tecnicamente desconhecidas, dando foco aos desafios conhecidos, ligados aos processos de conversão. Desafios para os quais as empresas se prepararam adequadamente, a julgar pelos bons resultados alcançados por essas etapas de processo, apesar de todas as dificuldades de continuidade operacional.

Apesar desse “ponto cego” ligado à movimentação da biomassa, as experiências das pioneiras do E2G indicam que os desenvolvimentos tecnológicos feitos nas etapas de pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação já alcançaram níveis de maturidade adequados para serem otimizadas durante sua operação em grande escala, logo que as plantas consigam operar continuamente. E, dessa forma, assim como em diversos desenvolvimentos feitos em indústrias de processos químicos e similares, ganhar em produtividade e rentabilidade, viabilizando a produção economicamente rentável do E2G.

Apesar das frustrações ligadas a continuidade operacional dos sistemas de movimentação de biomassa, diversos outros equipamentos e sistemas foram desenvolvidos e testados nas diversas etapas do processo de produção com relativo sucesso. Foram desenvolvimentos técnicos feitos por fornecedores, que podem viabilizar sua fabricação e disponibilização, já em escalas comerciais, para as próximas biorrefinarias.

As dificuldades técnicas encontradas na operação dos sistemas de alimentação de biomassa, trouxeram à tona a necessidade de se conhecer as especificidades de cada tipo de biomassa e de se projetar tecnologias, equipamentos e sistemas para o tipo específico a ser utilizado. Se cada planta deverá ter equipamentos projetados especificamente para o tipo de biomassa a ser utilizado, a necessidade do uso de tipos específicos muda a abordagem de que as biorrefinarias seriam projetadas para uso de diversos tipos de biomassa, em geral. Essa nova abordagem pode rediscutir os conceitos atuais de economia de escala, substituindo um modelo centralizador no qual se constroem grandes refinarias (a exemplo das refinarias de petróleo) para onde as matérias-primas são facilmente transportadas, por modelos descentralizados, com biorrefinarias menores

tendo biomassa acessível dentro de um raio economicamente viável para o transporte desse tipo de material com baixa densidade aparente.

6.3.2 Sobre os conceitos e fatores ligados aos processos de inovação

O modelo clássico de Utterback (1987, 1994) relaciona as fases fluida, transitória e específica e os graus de desenvolvimento das inovações (radical e incremental) a um padrão de interação dinâmica entre inovação de produto e inovação de processo. Suas principais unidades de análise são, portanto, produto e processo. O caso do E2G que apresenta uma inovação de processo, a partir do uso de novas matérias-primas, para a fabricação de um produto já existentes no mercado, trata de uma inovação de processo não precedida de uma inovação de produto, o que pode sugerir um modelo diferente do modelo clássico. Vale destacar que, nesses casos, o próprio uso matéria-prima já se caracteriza como uma inovação, pois suas características ainda não são completamente conhecidas. Espera-se que o crescimento do uso de biomassas em novas plantas pioneiras trará novos casos a serem estudados que, certamente, farão com que novas pesquisas se debruçem sobre o tema.

Entre os diversos fatores envolvidos nos processos de inovação, merece destaque a relação entre os pioneiros do E2G os fornecedores dos equipamentos ligados ao manuseio de biomassa. Os pioneiros, que vinham de uma lógica "baseados em ciência" (dos setores de química & petroquímica), tiveram que lidar com uma lógica "dominados pelos fornecedores", e parece que encontraram dificuldades em gerenciar o fluxo de informações e de construção de conhecimento, a respeito do manuseio de biomassa, com esses fornecedores. Essas dificuldades parecem ter prejudicado o desenvolvimento tecnológico envolvido e afetado, definitivamente, a produtividade das plantas.

O crescimento do uso de biomassas residuais no âmbito da bioeconomia deverá propiciar o desenvolvimento de novas indústrias com o possível surgimento de novas estratégias de inovação que, dadas as suas diferentes naturezas, deverão exigir determinadas especializações das empresas. Esse processo poderá gerar novas trajetórias tecnológicas de sucesso, que poderão moldar novos setores com novos possíveis padrões setoriais de inovação e, definir, com mais clareza, o papel de cada um como fonte funcional de inovação.

6.3.3 Sobre gestores de empresas e gestores de projetos

A biomassa lignocelulósica precisa ser um dos principais direcionadores nos projetos de biorrefinarias, com importância semelhante aos desenvolvimentos de processos químicos e bioquímicos. Pois, como foi possível observar no caso do etanol E2G, sem ela as plantas industriais terão dificuldade para operar. Sendo assim, na compra ou desenvolvimento de pacotes tecnológicos, os gestores precisam se preocupar tanto com o nível de maturidade dos processos de conversão de biomassa quanto com o nível de maturidade dos sistemas e equipamentos de movimentação e alimentação de biomassa. Analisar dados sobre testes realizados em escalas de demonstração será fundamental para mitigar os riscos inerentes a esses projetos.

Testes em plantas de demonstração integradas que incluam tanto as etapas de conversão da biomassa (pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação) quanto sistemas de movimentação e alimentação de biomassa (desde o desfardamento até a entrada dos reatores) são fundamentais para reproduzir as condições do “mundo real”.

A corrida pelo pioneirismo também pode ter prejudicado, em alguma medida, a construção do conhecimento necessário para a solução dos problemas enfrentados para movimentação de biomassa. Movidas pela competição potencial para venda de tecnologia, as pioneiras do E2G não trocaram informações ou experiências no que diz respeito a seus desafios operacionais centrais. Se não houve troca de experiências, é possível que mais de uma empresa tenha sofrido com os mesmos problemas nas etapas de transporte de biomassa que, se enfrentados pela combinação de conhecimento de suas equipes, poderiam ter mais chances de solução. A troca de informações, mesmo entre concorrentes pode ser fundamental para o crescimento de industriais emergentes e, desde que adequadamente gerenciadas, podem otimizar tempo e recursos de todos os envolvidos (PAVITT, 2003).

Durante as entrevistas e visitas que serviram de base para esse trabalho, foi possível notar que as preocupações das empresas sobre seus desenvolvimentos tecnológicos nem sempre alcançavam questões identificadas por autores acadêmicos que tratam dos processos de inovação, demonstrando um grande distanciamento entre seus movimentos estratégicos e estudos teóricos desenvolvidos pela academia. Os diversos fatores ligados aos processos de inovação foram ferramentas fundamentais para diversas análises realizadas nessa pesquisa e, podem ser úteis, da mesma forma, aos gestores

corporativos. Ter conhecimento dos casos apresentados nos textos sobre a dinâmica da inovação e seus resultados práticos, possibilitará que gestores aprimorem suas estratégias e consigam obter mais sucesso em seus processos de mudança. Uma aproximação maior entre academia e empresa, transferindo conceitos teóricos de um lado e informações práticas do outro é um antigo dilema que “aflige” a ambos e cuja solução, certamente, traria enriquecimento teórico e prático a ambos os lados. A montagem do Quadro Analítico apresentado no capítulo 2 e desenvolvido no capítulo 6 procura dar mais um passo nessa direção.

6.3.4 Sobre retorno dos investimentos

Tanto por estudos anteriores, desenvolvidos sobre a produtividade industrial com o uso de materiais sólidos (MERROW; PHILLIPS; MYERS, 1981) quanto pelas informações obtidas das entrevistas, deve-se esperar que, em plantas industriais, os sistemas que operem com manuseio de biomassas, apresentem uma taxa média de ocupação da capacidade nominal bem abaixo daquela obtida nas plantas químicas tradicionais. Sendo assim, é possível que os projetos desse tipo unidade industrial precisem rever as expectativas sobre a ocupação de suas capacidades de produção. Ou ainda que devam considerar alternativas técnicas que permitam que as demais etapas de produção operem continuamente mesmo com paradas ou interrupções inesperadas nos sistemas de alimentação de biomassa.

O grau de incerteza nos processos de inovação depende da base científica, do conhecimento tecnológico disponíveis e do salto tecnológico requerido pela inovação (KLINE; ROSENBERG, 1986). Quando essa base de conhecimento não permite previsões mais acuradas, como no caso dos sistemas de manuseio de biomassa, pode ser necessário recorrer a testes ou processos empíricos mais lentos e incertos. Esse processo mais lento pode aumentar o tempo necessário para otimização dos processos operacionais e diminuir a efetividade das inovações incrementais que deveriam suceder a partida de plantas pioneiras. Pelo menos até que se tenha mais domínio sobre o manuseio da biomassa, toda essa incerteza deverá levar a um tempo de retorno dos investimentos maior do que investidores ligados à indústria de processos químicos e similares, vinham experimentando.

6.3.5 Sobre fornecedores de equipamentos e tecnologia

Diferentemente da China, onde as universidades estimulam pesquisadores a depositarem patentes como comprovação de suas pesquisas, em países ocidentais a exemplo dos EUA, Brasil e países europeus, a academia estimula pesquisadores a publicarem artigos científicos sobre experimentos técnicos em pequenas escalas, deixando o depósito de patentes para empresas e fabricantes de equipamentos. Dessa forma, fabricantes de equipamentos ou empresas desenvolvedoras de tecnologia são os principais depositantes de patentes, nesses países ocidentais (CHEN; ZHANG, 2019; CORREA et al, 2023). Principalmente em setores com trajetórias tecnológicas dominadas pelos fornecedores, mas também em outros setores, desenvolvimentos tecnológicos para projeto e fabricação de equipamentos industriais complexos são feitos pelos próprios fabricantes sob solicitações específicas e financiados por empresas que precisam desses equipamentos para suas operações (PAVITT, 1984; LAGER; FRISHAMMAR, 2010). Esses desenvolvimentos demandam tempo e recursos que o próprio fabricante não conseguiria remunerar sem garantias de venda em escalas que assegurassem o retorno do valor investido.

Entretanto, em países como o Brasil (entre poucos), que possuem uma grande diversidade de fontes abundantes de materiais lignocelulósicos que podem ser usados como matéria-prima industrial, esses fornecedores podem ter uma importância estratégica. Fabricantes locais de equipamentos com acesso a essa grande diversidade de fontes de biomassa podem ser fundamentais para desenvolver novas tecnologias capazes de viabilizar a operação contínua de plantas industriais a base desse tipo de material. E isso pode vir a ser um diferencial para países com o perfil do Brasil. Políticas públicas que estimulem o desenvolvimento de equipamentos dedicados à movimentação de diferentes tipos de biomassa podem revitalizar o setor local de fabricação de máquinas e equipamentos. Se a movimentação de biomassa foi uma das barreiras encontradas para a produção de grande escala de diversas biorrefinarias, o desenvolvimento de novas tecnologias para esse fim poderá um diferencial competitivo importante para o futuro dessa indústria no país.

6.3.6 Sobre políticas públicas

O caso do E2G mostrou a importância das políticas públicas sobre o início dos processos de inovação ao estimular fortemente o aumento das pesquisas que aceleraram

o desenvolvimento dos processos de conversão da biomassa em produtos. Ficou claro nas entrevistas que, apesar de toda pressão social pela redução das emissões de CO₂, foram as políticas públicas promovidas, principalmente, pelo governo dos EUA, mas também do Brasil e da Europa que estimularam a construção das plantas industriais pioneiras de produção do E2G. Destaca-se esse ponto também como um convite para que novos estudos acadêmicos trabalhem sobre essa relação entre o início dos processos de inovação e políticas públicas e discutam se os modelos atuais demonstram sua real relevância.

Por outro lado, mudanças nessas políticas que deixem os novos investidores sem proteções para que concorram com regimes já estabelecidos, desestimulam os investimentos e, conseqüentemente, o desenvolvimento de novas pesquisas tecnológicas. Conforme um dos entrevistados deixou claro, foi a redução dos incentivos pelo governo dos EUA que desmotivou a continuação de investimentos e até mesmo a permanência de empresas nessa indústria. Sem políticas públicas de incentivo robustas, será muito difícil que iniciativas privadas consigam competir com a forte estrutura do regime de produção de combustíveis fósseis, consolidada ao longo de mais de um século.

Além das estratégias já adotadas que estimulam a produção de combustíveis através de fontes renováveis, se sugere que os formuladores de políticas públicas avaliem alternativas para viabilizar a construção de plantas de demonstração integradas para testes com o uso de biomassas lignocelulósicas como matéria-prima. Seja através de institutos ou empresas que disponibilizem essas instalações para testes de vários desenvolvedores de tecnologia, ou para a construção de plantas de demonstração (também integradas) como parte de um projeto específico. Esse tipo de iniciativa que, a princípio, pode parecer mais custosa, pode ser fundamental para evitar investimentos ainda mais elevados que poderão conduzir projetos a relativos insucessos operacionais, como aconteceu no caso das plantas do E2G.

6.3.7 Sobre a formação universitária de engenheiros de processo

A formação dos engenheiros de processo, principalmente dos engenheiros químicos, foi construída com base nas indústrias derivadas do petróleo, na qual o manuseio de líquidos e gases é predominante. A mudança de base de produção para materiais sólidos como a biomassa, demanda uma reavaliação nos cursos de formação tanto na engenharia quanto em biologia, física e química, além de todas as suas derivações.

Pode ser necessário reavaliar a inclusão de mais conteúdo ligado ao manuseio de sólidos tanto nos cursos de graduação quanto nos de pós-graduação. Iniciando, possivelmente, com o estudo de materiais sólidos já manuseados tradicionalmente em alguns setores industriais (papel & celulose, mineração, siderurgia, agricultura e alimentação, p.ex.), mas também destacando a importância crescente do uso industrial da biomassa como fonte alternativa aos materiais fósseis.

Em função da crescente importância do uso industrial de diferentes tipos de biomassa, pode ser necessário estimular, ainda mais, o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas tratando desse tema. Pesquisas que estudem a diversidade e as especificidades desses materiais, não apenas em escalas de laboratório, mas em escalas que auxiliem no desenvolvimento e na criação de métodos tecnológicos e de projetos equipamentos que permitam o uso da biomassa em escala industrial com eficiência semelhante ao que já foi desenvolvido para materiais líquidos e gasosos.

Principalmente em países, como o Brasil, que possuem uma grande diversidade de fontes de biomassas lignocelulósicas residuais capazes de alimentar a produção industrial de combustíveis, energia e diversos outros produtos, em alternativa às fontes fósseis.

7 CONCLUSÕES

Em resposta às perguntas que nortearam este trabalho e atendendo ao objetivo proposto pela pesquisa, esta tese conclui que os principais obstáculos que impediram as plantas pioneiras do E2G de operar dentro das condições de projeto, estavam ligados ao desempenho dos sistemas de alimentação de biomassa. Em função de diversos fatores ligados às trajetórias tecnológicas das empresas que projetaram e operaram essas unidades, o manuseio e a alimentação das biomassas lignocelulósicas parecem não ter sido “vistos” pelas empresas como desafios técnicos ainda a serem enfrentados. A falta desse olhar para os problemas de manuseio e alimentação de biomassa, parece ter causado um “ponto cego” sobre a necessidade de desenvolvimentos tecnológicos que levassem os sistemas de movimentação a alimentação aos mesmos níveis de maturidade tecnológica alcançados pelos processos de pré-tratamento, hidrólise enzimática e de fermentação. Esse desnível tecnológico acabou por impedir que as plantas conseguissem operar continuamente. Essa tese conclui também que não foram apenas as empresas a não ter olhos para essas questões, mas também os formuladores de políticas públicas e os investidores, assim como pesquisadores e desenvolvedores de tecnologia. A falta de olhos para questões tecnológicas ligadas ao manuseio de matérias-primas sólidas pode ser um paradigma construído a partir do uso predominante do petróleo e seus derivados (fluidos) nas indústrias de processos químicos e similares. Um paradigma que deve remontar até a base de formação acadêmica dos engenheiros de processo e que precisa ser quebrado. Com o uso da biomassa em grande escala, a matéria-prima deve ser considerada como uma importante variável no direcionamento de projetos e desenvolvimentos tecnológicos e, não apenas um dado. Provavelmente, muito conhecimento científico ainda precisa ser transformado em tecnologia para viabilizar esses desenvolvimentos.

Nesse caminho, as experiências vividas pelas pioneiras do E2G podem trazer importantes lições sobre como riscos tecnológicos não antecipados se transformaram em obstáculos, chamando a atenção sobre importância do manuseio da biomassa dentro dos desafios tecnológicos que ainda precisam ser vencidos para o sucesso operacional de novas biorrefinarias.

Essa pesquisa se limitou ao estudo do caso do E2G sob a luz dos processos de inovação, sem se dedicar a desenvolvimentos tecnológicos, nem descrever detalhes sobre as tecnologias ou fornecedores escolhidos por cada empresa ou mesmo sobre as

características específicas de cada planta e nem sobre os tipos específicos de biomassa escolhidos por cada uma.

Sob esse ângulo, a tese levanta também perguntas teóricas que convidam ao desenvolvimento de novas pesquisas sobre os processos de inovação, como as que se seguem:

- de que forma uma inovação em processo, a partir do uso de novas matérias-primas, para a fabricação de produtos já existentes (como aconteceu no caso do E2G), conversa com o modelo clássico de Utterback (1987, 1994), que define um padrão de interação dinâmica entre inovação de produto e inovação de processo?
- novas indústrias a base de biomassas deverão conformar novos padrões setoriais de inovação que combinem (como no caso do E2G) padrões de empresas baseadas em ciência com padrões setoriais de empresas dominadas pelos fornecedores?
- a importância das políticas públicas para o início dos processos de inovação (como se deu no caso do E2G) está adequadamente representada nos modelos atuais dos processos de inovação?

São temas que podem trazer novas abordagens sobre os processos e a dinâmica de inovação e auxiliar no enfrentamento dos desafios atuais e dos que ainda estão por vir.

O uso industrial de biomassas lignocelulósicas, como alternativa às fontes fósseis, já se mostrou um caminho sem volta, tanto para a retomada global da produção do E2G quanto para outras iniciativas de fabricação de novos bioprodutos. Poucos países têm o privilégio de possuir, em seus territórios, uma grande diversidade de fontes que podem se transformar em biomassas residuais lignocelulósicas. E o Brasil é um deles.

No Brasil, a cada renovação de safra ao longo de quase 60 milhões de hectares de terras dedicada ao plantio, se gera biomassa lignocelulósica residual agrícola. A cada folha ou galho seco que cai, ao longo de mais de 550 milhões de hectares de florestas nativas, se gera biomassa lignocelulósica residual florestal. São fontes renováveis capazes de se retroalimentar continuamente, e que podem suprir uma grande parte da demanda global por combustíveis, além outros produtos. Claramente, toda essa diversidade espalhada por mais de 850 milhões de hectares e com todas as especificidades já discutidas, apresenta enormes desafios técnicos e logísticos que ainda precisam ser vencidos. Mas também trazem enormes oportunidades que podem levar o país a exercer um papel de liderança global no crescimento da bioeconomia.

8 REFERÊNCIAS

ABBI. **Identificação das Oportunidades e o Potencial do Impacto da Bioeconomia para a Descarbonização do Brasil**. 2022. Disponível em: https://abbi.org.br/wp-content/uploads/2022/06/Bioeconomia_Descarbonizacao_Nov2022_Final2.pdf.

ABENGOA DNT. **Progressive Farmer. Renewable Diesel to Launch in Hugoton**. Disponível em: <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/news/business-inputs/article/2021/05/17/seaboard-energy-build-renewable-site>.

ABENGOA. **Annual Report**. 2010. Disponível em: http://annualreport.abengoa.com/web/2010/en/resp_social/accionistas/Datos_economico_financiero/index.html

ABERNATY, W.J.; UTTERBACK, J.M. **Patterns of Industrial Innovation**. 1978. Disponível em: <http://teaching.up.edu/bus580/bps/Abernathy%20and%20Utterback%2C%201978.pdf>

AKHTAR, N. et al. **Recent Advances in Pretreatment Technologies for Efficient Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass**. Published online 15 October 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.12257

ALBERS, S.C.; BERKLUNG, A.M.; GRAFF, G.G. **The rise and fall of innovations in biofuels**. *Nature Biotechnology*. 34, p. 814–821. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nbt.3644>.

ALVES, F.C.; BOMTEMPO, J.V.; MUNIER, F. **Competências Para Inovar Em Indústrias “Dominadas Pelos Fornecedores”**: O Caso Da Indústria Brasileira De Embalagens Plásticas. XXIV Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica, Gramado – RS, Outubro de 2006.

ALVES, F.C.; BOMTEMPO, J.V. **Dinâmica da Inovação e Inserção na Cadeia Produtiva**: O Caso das Embalagens Plásticas. XXII Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica, Salvador – BA, Novembro de 2002.

ANDRITZ. **Andritz Inc.v.M&G Finanziaria S.R.L., Biochemtex S. P.A.** <https://casetext.com/case/andritz-inc-v-mg-finanziaria-srl-biochemtex-s-pa/noticia/2016>.

ANTUNES, A.M.S et al. **Métodos de prospecção tecnológica, inteligência competitiva e foresight**: principais conceitos e técnicas, in: Coleção PROFNIT série Prospecção Tecnológica; Ribeiro, N.M., Ed.; IFBA: Salvador, 2018 ISBN 978-85-67562-24-7.

BACOVSKY, D. et al. **Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities in June 2010**. A Report to IEA Bioenergy Task 39. Report T39-P1b 27 July 2010 dina.bacovsky@bioenergy2020.eu

BALAN, V.; CHIARAMONTI, D.; KUMAR, S. **Review of US and EU initiatives toward development, demonstration, and commercialization of lignocellulosic**

biofuels. Received February 25, 2012; revised and accepted July 4, 2013. View online August 9, 2013 at Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com); DOI: 10.1002/bbb.1436; Biofuels, Bioprod. Bioref. 7:732–759 (2013)

BENNETT, S.J. **The socio-technical dynamics of chemical feedstock transitions: The case of renewable raw materials in the UK**. PhD Thesis in the Centre for Energy Policy and Technology. Imperial College, London, UK, December 2009.

BENNETT, S.J.; PEARSON, P.J.G. **Scenarios for biorefineries** – results from interviews with UK biofuels and bio-based chemicals professionals. Poster presented at IARU International Scientific Congress on Climate Change, March 2009, Copenhagen.

BEZERRA, P.X.O. et al. **Cellulosic Ethanol from Sugarcane Straw: a Discussion Based on Industrial Experience in the Northeast of Brazil**. BioEnergy Research. Received: 10 February 2020 / Accepted: 20 July 2020 <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10169-w>

BOMTEMPO, J.V. **A nova bioenergia dos anos 2020**. Ensaio Energético, 25 de julho, 2022. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/a-nova-bioenergia-dos-anos-2020/>

BOMTEMPO, J.V. **O futuro dos biocombustíveis XIII** – Matéria prima como fator estruturante da indústria. 2011. Blog Infopetro 2012. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/o-futuro-dos-biocombustiveis-xiii-por-jose-vitor-bomtempo/20120813-145013-e966>

BRITT, B.L. et al. **Document Classification Techniques for Automated Technology Readiness Level Analysis**. Journal of the American Society for Information and Technology, 59(4):675–680, 2008.

BUERGER, M.; CANTNER, U. **The regional dimension of sectoral innovativeness: An empirical investigation of two specialized suppliers and two science-based industries**. Papers in Regional Science, Volume 90 Number 2 June 2011.

CALDERON, O.R.; ARANTES, V. **A review on commercial - scale high - value products that can be produced alongside cellulosic ethanol**; Biotechnology for Biofuels, 2019; ISBN 1306801915291.

CALISE, F. et al. **Toward an efficient and sustainable use of energy in industries and cities**. Energies 2019, 12, 1–28, doi:10.3390/en12163150.

CAMPOS, B.; RUIZ, A.U. **Padrões Setoriais de Inovação na Indústria Brasileira**. Revista Brasileira de Inovação, Rio de Janeiro (RJ), 8 (1), p.167-210, janeiro/junho 2009.

CAPDEVILLE, G. de; ALVES, A.A.; BRASIL, B.S.A.F. **Modelo de inovação e negócios da Embrapa Agroenergia: gestão estratégica integrada de P&D e TT**. Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2017 45 p. : il. – (Documentos ; v. 24). Disponível em: <http://www.embrapa.br/agroenergia/publicacoes>

CASTELLACI, F. **Technological paradigms, regimes and trajectories:** Manufacturing and service industries in a new taxonomy of sectoral patterns of innovation, *Research Policy* 37. 2008. 978–994.

CASTRO, A.C. **New roles for the agrobusiness sectors:** technological trajectories and institutional settings. *Beyond the Global Crisis*. 1st Edition. First Published 2012. Imprint Routledge. Pages 13. eBook ISBN 9780203117828.

CHEN, Z.; ZHANG, J. **Types of patents and driving forces behind the patent growth in China.** *Econ. Model.* **2019**, *80*, 294–302, doi:10.1016/j.econmod.2018.11.015.

CHERUBINI, F. The biorefinery concept : **Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals.** *Energy Convers Manag* 2010;51:1412–21. doi:10.1016/j.enconman. 2010.01.015.

CHESBROUGH, H.; BOGERS, M. **Explicating Open Innovation:** Clarifying an Emerging Paradigm for Understanding Innovation. 2014. *New Frontiers in Open Innovation*. Oxford: Oxford University Press, Forthcoming (pp. 3-28), Disponível em: SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2427233>

CHESBROUGH, H.; CROWTHER, A. K. **Beyond high tech:** Early adopters of open innovation in other industries. 2006. *R&D Management*, 36(3): 229-236.

CLARIANT. **Clariant and Eta Bio announce license agreement on sunliquid cellulosic ethanol technology in Bulgaria.** Disponível em: <https://www.clariant.com/pt/Corporate/News/2020/07/Clariant-and-Eta-Bio-announce-license-agreement-on-sunliquid-cellulosic-ethanol-technology-in-Bulgar>

CLARIANT. **Clariant completes construction of first commercial Sunliquid cellulosic ethanol plant in Podari, Romania.** 2021. Disponível em: <https://www.clariant.com/en/Corporate/News/2021/10/Clariant-completes-construction-of-first-commercial-sunliquid-cellulosic-ethanol-plant-in-Podari-Rom>

CNPEM. **Obstáculo no Caminho**, Revista Pesquisa FAPESP, 2018. Disponível em: <https://cnpem.br/obstaculos-no-caminho/>

CORREA, C.E.F. et al. **Biomass feeding in cellulosic ethanol projects: An underestimated issue?.** *Alexandria Engineering Journal*. 2022. 61, 10233–10244. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.066>

DALE, B. **A New Industry Has Been Launched:** The Cellulosic Biofuels Ship (Finally) Sails. *Biofpr*, Volume 9, Issue 1, January, 2015, p. 1-3

DALE, B. **A sober view of the difficulties in scaling cellulosic biofuels.** *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 11. 2017. 5–7, <https://doi.org/10.1002/bbb>.

DALE, B.; ONG, R.G. **Energy, Wealth, and Human Development: Why and How Biomass Pretreatment Research Must Improve.** DOI 10.1002/btpr.1575 Published online July 16, 2012 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

- DOE. **Bioenergy Research Centers** – An Overview of the Science. Feb. 2008. genomicsgtl.energy.gov/centers/brcbrochure.pdf
- DOE. **Biorefinery Optimization Workshop**. Chicago, Illinois. Summary report from the October 5–6, 2016. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Bioenergy Technologies Office
- DOE. INL. **Researches Investigate Loblolly Pine Flow Issues**. 2021. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/inl-researchers-investigate-loblolly-pine-flow-issues>
- DOS SANTOS, L.V. et al. **Second-Generation Ethanol: The Need is Becoming a Reality**. *Ind Biotechnol* 2016;12:40–57. doi:10.1089/ind.2015.0017.
- DOSI, G. et al. **Technical Change and Economic Theory**, 1988. Pinter, London.
- DSM. **Annual Report 2010**. Disponível em: https://www.dsm.com/content/dam/dsm/corporate/en_US/documents/annual-report-2010.pdf
- DUPONT. **Report Annual 2010**. Disponível em: https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/d/NYSE_DD_2010.pdf
- DUPONT. **Verbio to buy DuPont cellulosic ethanol plant, convert it to RNG**. 2018. *BIOMASS Magazine*. Disponível em: <http://biomassmagazine.com/articles/15743/verbio-to-buy-dupont-cellulosic-ethanol-plant-convert-it-to-rng>
- E4TECH; RE-CORD; WUR. **From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals**. 2015. Final report for the European Commission, contract No. ENER/C2/423-2012/SI2.673791
- ECKARD, A. *Biofuel and Biorefinery Technologies*. Chapter 4: **Enzymatic Hydrolysis Technologies for the Production of biofuels**. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- ETHANOL PRODUCER MAGAZINE. **Versalis to restart cellulosic ethanol plant**. *Ethanol Producer Magazine*. 2020. Disponível em: <http://ethanolproducer.com/articles/16974/versalis-to-restart-italian-cellulosic-ethanol-plant>
- EPO – EUROPEAN PATENT OFFICE. **The role of (patent) information in the innovation process** [Internet]. (May) (2017). Available from: <https://www.epo.org/service-support/contact-us/surveys/patent-information/innovation-survey.html>.
- FAGERBERG, J. *The Oxford Handbook of Innovation*. Chapter 1: **Innovation: A Guide to the Literature**; Centre for Technology, Innovation, and Culture (TIK), University of Oslo, Norway Print publication date: 2006, Published to Oxford

Handbooks Online: September 2009. Print ISBN-13: 978-0-19-928680-5, doi:10.1093/oxfordhb/9780199286805.001.0001.

FRISHAMMAR, J. et al. **The role of pilot and demonstration plants in technological development: synthesis and directions for future research**, *Technology Analysis & Strategic Management*, 2015. 27:1, 1-18, DOI: 10.1080/09537325.2014.943715

FURTADO, A.T.; HEKKERT, M.P.; NEGRO, S.O. **Of actors, functions, and fuels: Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil**. *Energy Research & Social Science* 70. 2020. 101706.

GARCIA, A. **Evaluation of different lignocellulosic raw materials as potential alternative feedstocks in biorefinery processes**. *Industrial Crops and Products* 53. 2014. 102-110. Accepted 12 December 2013

GOLDENBERG, J. **Biomassa e Energia**. *Quím. Nova* vol.32 no.3 São Paulo 2009, Print version ISSN 0100-4042 On-line version ISSN 1678-7064

GRANBIO. **Executive Leadership**. 2002. Disponível em: <http://www.granbio.com.br/en/conteudos/executive-leadership/>.

GUSAKOV, A.V. **Cellulases and hemicellulases in the 21st century race for cellulosic ethanol**. 2013. *Biofuels*, 4:6, 567-569

GUSTAFSSON, R.; KUUSI, O.; MEYER, M. **Examining open-endedness of expectations in emerging technological fields: The case of cellulosic ethanol**. *Technol Forecast Soc Chang* 2015;91:179–93. doi:10.1016/j.techfore.2014.02.008.

HAYES, R.; ABERNATHY, W.J. **Managing Our Way to Economic Decline**, Harvard Business Review, July-August, 1980.

HEDELER, B. **Strategic decisions on knowledge development and diffusion at pilot and demonstration projects**. *Forest Policy and Economics* 110. 2020. 102027. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102027>.

HELLSMARK, H. et al. **The role of pilot and demonstration plants in technology development and innovation policy**. *Research Policy* 45. 2016. 1743–1761. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242013000300054>

IACGB. **Global Bioeconomy Policy Report (IV): A decade of bioeconomy policy development around the world**. A report from the International Advisory Council on Global Bioeconomy. https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/04/GBS-2020_Global-Bioeconomy-Policy-Report_IV_web-2.pdf

INPI. **Busca de patentes**. 2020. Disponível em: <http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/informacao/busca-de-patentes> (accessed on Apr 28, 2020).

KARIMI, K. **Biofuel and Biorefinery Technologies**. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

KLIN, S. J.; ROSENBERG, N. **An Overview of Innovation**. 1986. Disponível em: [http://dec.ec.unipg.it/~fabrizio.pompei/KlineRosenberg \(1986\).pdf](http://dec.ec.unipg.it/~fabrizio.pompei/KlineRosenberg (1986).pdf)

LAGER, T.; FRISHAMMAR, J. **Equipment supplier/user collaboration in the process industries**. In search of enhanced operating performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Vol. 21 No. 6, 2010. pp. 698-720

LAZONICK, W. The Oxford Handbook of Innovation Chapter 2: **The Innovative Firm**; Centre for Technology, Innovation, and Culture (TIK), University of Oslo, Norway Print publication date: 2006, Published to Oxford Handbooks Online: September 2009 Print ISBN-13: 978-0-19-928680-5, doi:10.1093/oxfordhb/9780199286805.001.0001

LEONARD-BARTON, D. **Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development**. *Strategic Management Journal*, Vol. 13, Special Issue: Strategy Process: Managing Corporate Self-Renewal (1992), pp. 111-125. <http://www.jstor.org/stable/2486355>

LEONARD-BARTON, D. **Wellsprings of Knowledge: building and sustaining the sources of innovation**”, 1995. HBS Press, Boston.(tradução brasileira: Nascentes do Saber; criando e sustentando as fontes da inovação, FGV Editora, 1998).

LIS, A. et al. **The Concept of the Ambidextrous Organization: Systematic Literature Review**. *International Journal of Contemporary Management* Volume 17 (2018) Number 1, pp. 77–97. doi:10.4467/24498939IJCM.18.005.8384

M&G. **PROESA technology: the industrial solution for cellulosic ethanol projects**. IEA – Vienna, 14/11/2012. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/02/IX3-Pescarolo-PROESA-Overview-Tech.pdf>

M&G. **Tecnologia PROESA**. BIOFUELS International. World's 'first' commercial second-generation bioethanol facility 'shuts down'. 2017. Disponível em: <https://biofuels-news.com/news/worlds-first-commercial-second-generation-bioethanol-facility-shuts-down/>.

M&G. **Mossi Ghisolfi Group** – Turnover 2012. Disponível em: <https://customergauge.com/benchmarks/companies/mossi-ghisolfi-group>. Acesso em 30/04/2023. 2023

MADANI, F; WEBER, C. **The evolution of patent mining: Applying bibliometrics analysis and keyword network analysis**. *World Pat. Inf.* [Internet]. 46, 32–48 (2016). Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wpi.2016.05.008>.

MALERBA, F. **Sectoral systems of innovation and production**. *Research Policy*, V 31[2], pp 247-264, ISSN 0048-7333, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)001391](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)001391). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733301001391>) (Periódicos CAPES)

MANKINS, J.C. **Technology readiness assessments: A retrospective**. *Acta Astronautica* 65 (2009) 1216–1223. Science Direct. doi:10.1016/j.actaastro.2009.03.058

MANKINS, J.C. **Technology Readness Level**. A White Paper, April 1995. Advanced Concepts Office. Office of Space Access and Technology.

MANUAL DE OSLO. **Proposta de Diretrizes para Coleta e Interpretação de Dados sobre Inovação Tecnológica**. Copyright OECD, 1997. Traduzido em 2004 sob a responsabilidade da FINEP — Financiadora de Estudos e Projetos.

MARSILI, O.; VERSPAGEN, B. **Technology and the dynamics of industrial structure: an empirical mapping of Dutch manufacturing**. *Industrial and Corporate Change* 11 (4), 791–815. 2002.

MERROW, E.W.; PHILLIPS, K.E.; MYERS, C.W. **Understanding Cost Growth and Performance Shortfalls in Pioneer Process Plants**. 1981. Prepared for DOE. The Rand corporation. R-2569-DOE.

MILANEZ, A.Y et al. **De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar** – uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. *Biocombustíveis BNDES Setorial* 41, p. 237-294. 2015. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4283>.

MOWERY, D.C.; ROSENBERG, N. **The Influence of Market Demand upon Innovation: A Critical Review of Some Recent Empirical Studies**, *Research Policy*, Vol. 8. 1978.

NELSON, R.R. **The Allocation of Resources to Invention**. *Book Reviews: SCIENCE*, 1966. Vol 153, Issue 3742. pp. 1367-1368 DOI: 10.1126/science.153.3742.1367.

NOGUÉ, V.S. **Xylose fermentation as a challenge for commercialization of lignocellulosic fuels and chemicals**. *Biotechnol Lett*. DOI 10.1007/s10529-014-1756-2. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014.

NOGUEIRA, L.A.H. et al. **Bioenergy in Brazil: current status and perspectives** (in Portuguese). *Revista Brasileira de Energia* | Vol. 27, No 3, 3o Trimestre de 2021 - Edição Especial. DOI: 10.47168/rbe.v27i3.640

NOGUEIRA, L.A.H. et al. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. BNDES, Rio de Janeiro, v. 316, 2008.

NONAKA, I.; TAKEUCHI H. **The Knowledge-creating Company**. Oxford UP, Oxford. 1995. (tradução brasileira: *Criação de Conhecimento na Empresa*, Campus, 1997)

NOVACANA. **Custo de Produção estimado do etanol celulósico nas 6 maiores usinas do mundo**. 2016. Novacana.com. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/custo-producao-etanol-celulosico-usinas-mundo-150316>

NOVACANA. **Raízen irá investir em nova planta de etanol de segunda geração**. 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/raizen-investir-nova-planta-etanol-segunda-geracao-250621>.

NYKO, D. et al. **A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada.** 2010. Produção BNDES – Artigos Produção BNDES – Artigos. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2406>

O'SULLIVAN, M. **The Innovative Enterprise and Corporate Governance.** Cambridge Journal of Economics 24(4): 393–416. 2000.

OCDE. **Meeting Policy Challenges for a Sustainable Bioeconomy.** OECD, Paris. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264292345-en>

OCDE. **The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy. Main Findings and Policy Conclusions.** 2009. OECD International Futures Project. Disponível em: www.oecd.org/futures/bioeconomy/2030

OLIVEIRA FILHO, A.A. **Mudanças e permanências no Sistema Setorial de Inovação da cana-de-açúcar: o caso do etanol celulósico.** Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências para obtenção do título de Doutor em Política Científica e Tecnológica. – Unicamp. Campinas, SP: [s.n.], 2017.

OLIVEIRA, M. **Entre açúcares e genes.** Revista Fapesp. 2012. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/entre-acucares-e-genes/>

PAVITT, K. **Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory.** 1984. Technology”, Management and Systems of Innovation, 15-45. Disponível em: http://inctpped.ie.ufrj.br/spiderweb/pdf_2/Dosi_6_Pavitt.pdf

PAVITT, K. The Oxford Handbook of Innovation Chapter 4: **Innovation Processes;** Centre for Technology, Innovation, and Culture (TIK), University of Oslo, Norway Print publication date: 2006, Published to Oxford Handbooks Online: September 2009 Print ISBN-13: 978-0-19-928680-5, doi:10.1093/oxfordhb/9780199286805.001.0001

PAVITT, K. **The process of innovation** (Vol. 89). Brighton: SPRU. 2003. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/7372120>

PAVITT, K. **What We Know about the Strategic Management of Technology.** Alifornia Management Review, Spring, 1990. Based on a keynote adressed to the Annual Meeting of the British Academy of Management.

PEIXOTO ROSÁRIO, F.J.; PEIXOTO SANTA RITA, L.; ALBUQUERQUE, P.P. **Technology, Relationship and Support Institutions on Sectoral Systems of Innovation and Production in Brazil's Northwest Bio Ethanol and Sugar Agro-industry.** Journal of Technology Management & Innovation vol.8 supl.1 Santiago Feb. 2013. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-27242013000300054&script=sci_arttext&tlng=pt

PENALVA SANTOS, D.C.J. et al. **Brazil and the world market in the development of technologies for the production of second- generation ethanol.** Alexandria Engineering Journal. 2023. 67, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.004>.

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. **Manual de Engenharia Química** - 5ª edição, Edição brasileira Ed. Guanabara Dois, 1980.

PHILP, J. **The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers**. N. Biotechnol. 2018, 40, 11–19, doi:10.1016/j.nbt.2017.04.004.

POET-DSM. **Poet-DSM pausing production of cellulosic ethanol at Project Liberty, shifting to R&D; blames EPA**. 2019. Disponível em: <https://www.greencarcongress.com/2019/11/20191124-poetdsm.html>

POET. **Poet awaits arbitration in \$33 million ethanol dispute**. 2018. Disponível em: <https://www.argusleader.com/story/news/2018/02/22/poet-awaits-arbitration-33-million-ethanol-dispute/361789002/>

PORTER, M.E. (1979) **How Competitive Forces Shape Strategy**. Harvard Business Review, 57, 137-145.

QUESTEL. **Questel Orbit Intelligence: business intelligence software**. 2019-2020. Disponível em: <https://www.questel.com/business-intelligence-software/orbit-intelligence/>.

ROSENBERG, N. **The Direction of technological Change: Inducement Mechanisms and Focusing Devices**. Research Policy, v. 23, n. 5, 1994.

ROSENBERG, N.; STEINMUELLER, W.E. **Engineering knowledge**. Industrial and Corporate Change, Volume 22, Number 5, pp. 1129–1158 doi:10.1093/icc/dts053 Advance Access published January 11, 2013

ROTHWELL, R. **Towards the fifth-generation innovation process**. International Marketing Review, 11(1), 7. 1994. (Periódicos CAPES – base Scopus)

RUBIO, M.D.M. **Will small energy consumers be faster in transition? Evidence from the early shift from coal to oil in Latin America**. Energy Policy 50 (2012) 50–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.054>.

RYDLEWSKI, C. **A maior startup do Brasil**. Época Negócios. 25 de abril de 2015. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Informacao/Visao/noticia/2015/04/maior-startup-do-brasil.html>

SANTOS, D.F.S; BOMTEMPO, J.V.; SOARES, G.A. **Flagship Plants in Bioeconomy: What Can We Learn from 2G Ethanol Pioneers?** 29th European Biomass Conference & Exhibition, Session code 5BV.5. 2021. Disponível em: <http://programme.eubce.com/2021/abstract.php?idabs=18621&idses=1202&idtopic=28>

SCHMOOKLER, J. Book Reviews: **The Allocation of Resources to Invention**. Harvard University Press, Science, 153 (3742), 1966. DOI:10.1126/science.153.3742.1367 Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.153.3742.1367>

SHELL. **Annual Report 2010**. Disponível em:
https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/r/NYSE_RDS.B_2010.pdf

SILVA, A.H; FOSSÁ, M.I.T. Análise de Conteúdo: **Exemplo de Aplicação da Técnica para Análise de Dados Qualitativos**. *Qualit@s Revista Eletrônica* ISSN 1677 4280 Vol.17. No 1 (2015)

SINGHANIA, R.R. et al. Industrial Biorefineries and White Biotechnology. Chapter 13. **Industrial Enzymes**. 2015. Elsevier. Industrial Enzymes.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00015-X>

SOARES, G.A. **O Avanço das Tecnologias de Segunda Geração e seus Impactos na Indústria do Etanol**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Indústria e Tecnologia, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

SOCOL, C.R. et al. **Green Fuels Technology: biofuels**. Curitiba, Brazil; Québec, Canada; Marseille, France: Springer; 2016.

SOLOMON, B.D. et al. 2007. **Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy**. *Biomass and Bioenergy*, v. 31, n. 6, p. 416-425, 2007.

SPERLING, D. **New transportation fuels: a strategic approach to technological change**. Univ of California Press, 1990.

SPITZ, P.H. **Petrochemicals: The rise of an industry**. 1988. John Wiley & Sons, New York.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change**, 3rd edition, Wiley, Chichester. 2005.

TUSHMAN, M.L.; O'REILLY, C.A. **Ambidextrous organizations: Managing evolutionary and revolutionary change**. *California Management Review Reprint Series* ©1996 by The Regents of the University of California CMR, Volume 38, Number 4, Summer 1996.

UNIDO. **Unlocking the bioethanol economy**. A pathway to inclusive and sustainable industrial development in developing countries. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). April 2022. All rights reserved. Disponível em:
https://www.unido.org/sites/default/files/files/2022-08/UNIDO_Ethanol_Summary_Report_screen.pdf

UNRUH, G.C. **Understanding carbon lock-in Energy Policy**. Volume 28, Issue 12, 1 October 2000, Pages 817-830. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7)

UTTERBACK, J.M. **Innovation and Industrial Evolution in Manufacturing Industries**. In *Technology and Global Industry: Companies and Nations in the World Economy*, 1987. Edited by Bruce R. Guile and Harvey Brooks, 16-48. Washington, DC:

National Academy of Engineering. Disponível em:
<https://www.nap.edu/read/1671/chapter/3>

UTTERBACK, J.M. **Mastering the Dynamics of Innovation**, HBS Press, Boston. 1994. (tradução brasileira: Dominando a Dinâmica da Inovação, Qualitymark, 1996).

VALDIVIA, M. Biofuels 2020: **Biorefineries based on lignocellulosic materials**. Microbial Biotechnology (2016) 9(5), 585–594 doi:10.1111/1751-7915.12387

VALMET, **Valmet to deliver BioTrac biomass pretreatment system to Clariant in Romania**. 2018. Disponível em: <https://news.cision.com/valmet-oyj/r/valmet-to-deliver-biotractm-biomass-pretreatment-system-to-clariant-in-romania,c3206346>

VALOR ECONÔMICO. **Idas e Vindas de um Projeto Inovador**. 2018. Disponível em: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2018/12/27/as-idas-e-vindas-de-um-projeto-inovador.ghml>

VARRICHIO, P.C. **Uma análise dos condicionantes e oportunidades em cadeias produtivas baseadas em recursos naturais: o caso do setor sucroalcooleiro no Brasil** / Pollyana de Carvalho. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências para obtenção do título de Doutor em Política Científica e Tecnológica. – Unicamp. Campinas, SP.: [s.n.], 2012.

VIMMERSTEDT, L.J.; BUSH, B.W. **Effects of Deployment Investment on the Growth of the Biofuels Industry: 2016 Update**. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Prepared under Task No. BZ14.1002

VISWANATHAN, M.B. **Technoeconomic analysis of fermentative-catalytic biorefineries** : model improvement and rules of thumb, Iowa State University, 2015.

VON HIPPEL, E. **The Sources of Innovation, Capítulo 1**. 1988. Disponível em: <http://web.mit.edu/evhippel/www-old/books/sources/Sofl.pdf>

WYMAN, C.E. Biomass Ethanol: **Technical Progress, Opportunities, and Commercial Challenges**. ResearchGate. Energy Environmental. 1999. 24:189–226.

YIN, R.K. **Case Study Research**. Sage, 1994, p.1-52

9 ANEXOS

9.1 ANEXO I – PESQUISA DE PATENTES

Parte integrante da Tese de Doutorado de Carlos Eduardo Fernandes Corrêa – **Os Desafios da Utilização de Biomassa Lignocelulósicas em Plantas Industriais Pioneiras**: O Caso das plantas de Etanol de Segunda Geração, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 15 de março 2023.

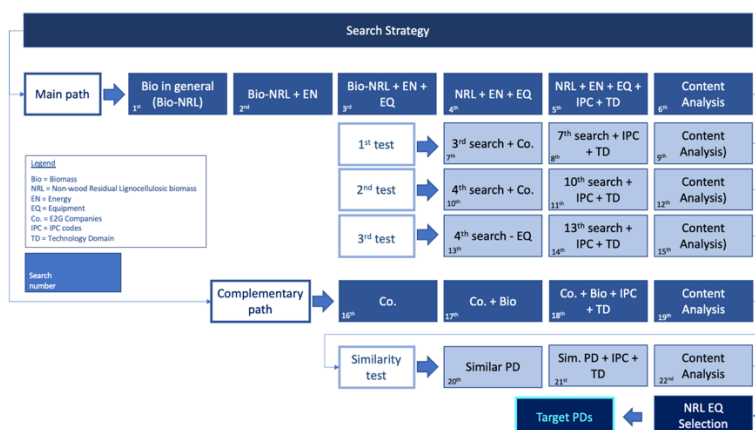
PESQUISA DE PATENTES SOBRE EQUIPAMENTOS PROJETADOS PARA MANUSEIO DOS TIPOS DE BIOMASSA UTILIZADOS NAS PLANTAS PIONEIRAS DO E2G

Autores: Carlos Eduardo Fernandes Corrêa e Daniel de C.L. e Penalva Santos

METODOLOGIA

Essa pesquisa tem como objetivo localizar e analisar documentos de patentes (DP) contendo projetos de equipamentos de manuseio de sólidos dimensionados para os diferentes tipos de biomassa lignocelulósica utilizados em plantas inovadoras de E2G. A estratégia definida para pesquisa e seleção de PD é por meio de palavras-chave [1] e segue dois caminhos distintos, conforme mostra a Figura 1.

Fig. 1 – Estratégia de busca



O principal caminho de buscas (*Main path*) parte da palavra-chave 'biomass' submetida a três testes e um caminho complementar que parte das patentes depositadas por empresas ligadas à produção de E2G. Os resultados dos dois caminhos são submetidos a um último 'teste de similaridade' que busca DP similares à seleção final para busca de patentes eventualmente excluídas de ambos os caminhos. Todas essas etapas são detalhadas a seguir.

Esta pesquisa foi realizada em abril de 2021, analisando DP aplicados em escritórios de patentes de mais de 95 países [2] utilizando o Software Empresarial *Questel Orbit Intelligence*. O banco de dados foi o FAMPAT – uma coleção mundial de patentes agrupadas por famílias baseadas em invenções que abrange mais de 54 milhões de DP [3]. A janela temporal compreendeu o período de 1970 a 2020, considerando que o desenvolvimento da tecnologia para produção de biocombustíveis a partir de fontes renováveis foi intensificado após a primeira crise do petróleo [3].

No caminho principal, a primeira busca seleciona DP sobre biomassa em geral (incluindo biomassa lignocelulósica, madeira, tabaco, grãos etc.), seguida de filtros selecionando apenas patentes de biomassa que tratam de seu uso no setor de energia/combustíveis ligados a sólidos equipamentos de manuseio. A etapa seguinte restringe a busca apenas a DP em biomassas lignocelulósicas residuais que tratam de projetos de equipamentos de movimentação de sólidos no setor de energia/combustíveis.

As palavras-chave utilizadas são: BIOMASS (para biomassa em geral); STRAW, STOVER, BAGASSE, CORN, CANE, WHEAT and ARUNDO (para biomassa residual lignocelulósica); ‘CANE STRAW’, ‘CORN STOVER’, ‘SUGARCANE BAGASSE’, ‘WHEAT STRAW’ e ARUNDO (para as biomassas específicas utilizadas nas plantas do E2G); FUEL *, BIOFUEL *, ENERG *, BIOENERG *, ETHANOL, BIOETHANOL (para identificar patentes que tratem dos setores de energia e de combustíveis) e, HAND *, TRANSPORT *, SCREW *, CONVEY *, MILL *, GRIND *, CRUSH *, SIEV * (para identificar patentes incluindo equipamentos típicos de manuseio de sólidos). As buscas foram feitas nos campos "title", "abstract", "claim" e "object of invention", considerando patentes “alive” (granted and pending) e “dead” (lapsed, revoked, expired), já que ambas as categorias contêm tecnologias válidas para os objetivos desse estudo [4].

Dois filtros classificatórios adicionais (disponíveis pela Orbit) são utilizados nos DP selecionados nas etapas anteriores: IPC - International Patent Classification (International Patent Classification) e DT - Domínios Tecnológicos (Technology Domains).

- O IPC classifica a PD por seções, classes, subclasses, grupos e subgrupos. As oito seções referem-se a: (A) HUMAN NECESSITIES; (B) PERFORMING OPERATIONS; TRANSPORTING; (C) CHEMISTRY; METALLURGY; (D) TEXTILES; PAPER; (E) FIXED CONSTRUCTIONS; (F) MECHANICAL ENGINEERING; LIGHTING; HEATING; WEAPONS; BLASTING; (G) PHYSICS and (H) ELECTRICITY.
- Para classificação dos domínios tecnológicos (DT), os códigos IPC são agrupados em 35 campos de tecnologia e em 5 campos de família de tecnologia, para identificar a diversidade ou a especificidade do portfólio de patentes de um requerente e permite aos usuários, muito rapidamente, identificar o core business do player que está sendo estudado. Um mesmo PD individual pode ser incluído em mais de um domínio de tecnologia. Os 5 campos da família são: química, engenharia mecânica, engenharia elétrica, instrumentos e outros.

Esses dois filtros adicionais são utilizados para excluir da lista de DP, até então selecionada, todos aqueles que não se referem ao IPC e DT vinculados à Engenharia Mecânica e Operação e Transporte – visando excluir todos os DP direcionados a processos químicos. Essa seleção também permite excluir patentes depositadas em equipamentos para manuseio de madeira, papel, fumo, grãos ou têxteis. As tecnologias de manuseio desses materiais são dominadas, e sua inclusão daria a falsa impressão de que o mesmo ocorre com as biomassas lignocelulósicas.

Para definir claramente o tipo de matéria-prima incluída em cada patente, esse trabalho nomeia as "biomassas lignocelulósicas residuais não madeiras" de LRN. Os "tipos específicos de biomassa lignocelulósica residual não madeira" usados nas usinas 2GE pioneiras são chamados de ELRN. Por

exemplo, palha de cana-de-açúcar ou palha de trigo ou bagaço de cana-de-açúcar devem ser considerados ELRN, enquanto palha ou bagaço tratados genericamente em patentes são considerados LRN.

Três testes foram aplicados no caminho principal para verificar sua eficácia: os dois primeiros testes incluem 48 empresas relacionadas à produção 2GE para buscar DP não encontradas por meio das palavras-chave utilizadas no início das buscas. Os nomes das empresas foram selecionados em buscas em jornais, revistas de negócios e periódicos*. O terceiro teste verifica se algum DP que trate de algum outro tipo de equipamento de movimentação de sólidos não listado no filtro correspondente teria sido excluído indevidamente.

(* Abengoa, American Process Inc (API), Andritz, Anhui Guozhen Group, BASF, Beta Renewables, Bharat Petroleum Corporation, Bio Tech Oy, Biochemtex, Bioflex, Bioforever, BP, Bunge, Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Clariant, Cosan, DSM, DuPont, Edenig, Eni's Versalis, Enviral, Gevo's GIFT technology, Gran Investimentos, GranBio, Hindustan Petroleum Corporation, Indian Oil Corporation, InEnTec, Institute of Chemical Technology, Iogen Corporation, L&T Hydrocarbon Engineering, LanzaTech, Mossi & Ghisolfi Group (M&G), Metso, Petrobras, Poet, Praj Industries, Raizen, Renmatix's Plantrose Process, Shell, Siouxland Energy, Southwest Iowa Renewable, Energy, Stl Biofuels Ou, Sweetwater's Sunburst, TRHoldco, Valmet, VERBIO North America Corporation e VERBIO Vereinigte BioEnergie AG.

Nota: Esta lista não considerou se algumas empresas listadas pertencem ou não ao mesmo grupo, pois pode haver pedidos de patentes em seus nomes individualmente.

O caminho complementar segue uma estratégia de busca diferente. Busca todas as patentes depositadas por essas 48 empresas sobre biomassa em geral, para buscar patentes também não encontradas no caminho principal. O último teste é aplicado às patentes selecionadas pelos dois caminhos (principal e complementar) por meio de outro recurso do software *Orbit* que busca por patentes semelhantes ao conjunto final. Esta 'pesquisa de similaridade' usa os códigos IPC, Classificação Cooperativa de Patentes (CPC) e Classificação de Patentes dos Estados Unidos (USPCL), atribuídos a uma família de patentes para encontrar todas as publicações classificadas sob os mesmos regulamentos [2].

Ao final de cada caminho ou teste, todos os DP selecionados são submetidos a uma análise qualitativa. Nessa última análise, todo o conteúdo do DP é analisado para escolher apenas aqueles que tratam de novos projetos de equipamentos para biomassa lignocelulósica: ambos (LRN) e (ELRN). No final, as patentes são classificadas em quatro grupos:

- a) **Patentes não-relacionadas:** são DP não ligadas a projetos de equipamentos, mesmo que envolvendo biomassas LRN ou ELRN. Todos os PD que não passaram pelos filtros ICP e DT são consideradas não-relacionadas;
- b) **Indiretamente-relacionadas:** DP excluídas pelos critérios de conteúdo “diretamente-relacionadas” abaixo;
- c) **Patentes diretamente-relacionadas:** DP selecionadas pelo mesmo critério “diretamente-relacionadas”;
- d) **Patentes-alvo:** DP que tratem de projeto de equipamento para manuseio e/ou alimentação de biomassa ELRN selecionadas das patentes “diretamente-relacionadas”.

As patentes que se enquadravam nos itens abaixo foram consideradas “indiretamente-relacionadas”:

- tratando de biomassa em geral sem tratar especificamente de biomassa LRN (resíduos orgânicos, resíduos domésticos, plásticos, grãos, sementes etc.), mesmo tratando de equipamentos;

- tratando de biomassas LRN não relacionadas ao seu uso industrial como matéria-prima para conversão bioquímica (por exemplo, sistemas de alimentação de combustível sólido para caldeiras a vapor) ou relacionadas diretamente ao uso tradicional de bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol de primeira geração (1GE);
- tratando de madeira ou lascas de madeira;
- tratando de extrusoras ou outros equipamentos para fabricação de briquetes/pellets, pois são utilizados principalmente como combustível sólido;
- tratando de processos envolvendo sistemas sólido-líquido, pois o foco desta pesquisa é o manuseio de sólidos ou separação sólido-sólido;
- tratando de processos, fluxogramas, métodos e/ou modelos, sem projeto de equipamentos;
- tratando de equipamentos de colheita ou outro equipamento usado para manusear biomassa antes dos sistemas de desfardamento, mesmo para LRN.

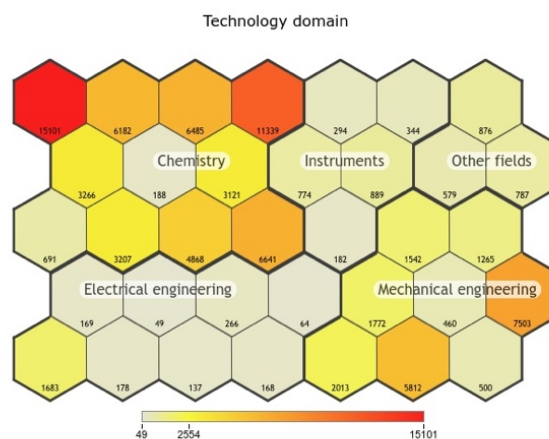
Com exceção da análise de conteúdo, todos os outros filtros foram usados para encontrar patentes de equipamentos projetados para biomassa LRN. Apenas a análise de conteúdo teve como objetivo buscar as patentes da Target que tratam de equipamentos de alimentação de biomassa ELRN.

RESULTADOS

O caminho principal encontrou, inicialmente, 639.319 DP sobre biomassa em geral, independentemente do seu uso final pretendido – uso industrial, agrícola ou mesmo lixo urbano. Este total inclui também as patentes que tratam da madeira, cujo desenvolvimento para a indústria de papel e celulose é relativamente consolidado, e diversos tipos de biomassa utilizados em outras áreas.

Ao aplicar filtros para indústrias de energia/combustíveis e equipamentos de manuseio de sólidos, o número total de descobertas foi reduzido para 58.198 DP: menos de 10% de todas as patentes de biomassa inicialmente identificadas com a palavra-chave 'biomass'. A maioria deles concentrava-se na área de Química (ver Fig. 2).

Fig. 2 – Domínio Tecnológico por família

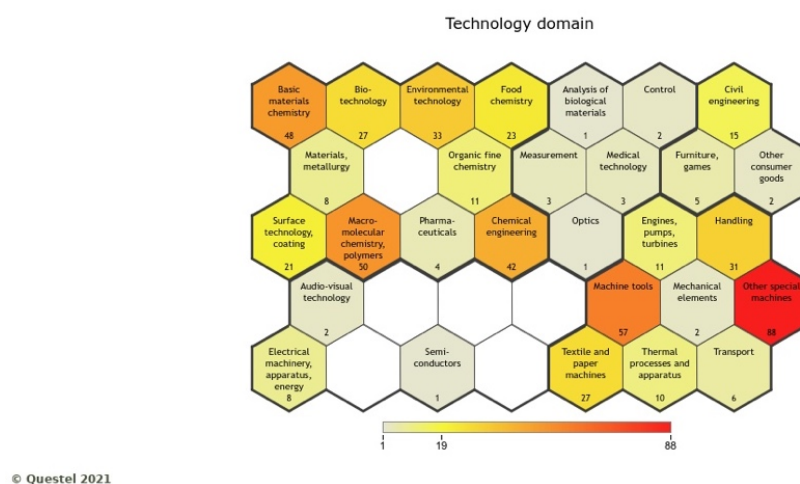


Nota: “Essa visualização é baseada nos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) contidos em um conjunto de patentes que está sendo analisado. Os códigos IPC foram agrupados em 5 campos de família de tecnologia, que são representados aqui. Este gráfico ajuda a identificar a diversidade ou a especificidade do portfólio de patentes de um requerente.” [1].

Um mesmo PD individual pode ser incluído em mais de um domínio de tecnologia.

Após remover a palavra-chave “biomass” e manter as palavras-chave que identificam a biomassa LRN, o resultado foi reduzido para 5.640 DP, indicando que, nos últimos 50 anos, apenas 1% de todos os DP sobre biomassa foram aplicados para atingir os tipos específicos usados nas plantas do E2G, conectadas a equipamentos de manuseio de sólidos. Após os filtros DT e IPC, orientando a seleção para as áreas de engenharia mecânica, restaram apenas 171 DP. Importante ressaltar que mesmo utilizando filtros para direcionar os resultados para a Engenharia Mecânica, o número de DP em química continua muito alto (ver Fig. 3). Isso pode indicar que, assim como nas revistas científicas, os depositantes de patentes também abordaram suas preocupações sobre o processo de conversão, sem enfatizar sistemas de manuseio e alimentação de matérias-primas.

Fig. 3 – Campos de Domínio Tecnológico



Nota: Visualização também baseada nos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) contidos em um conjunto de patentes em análise. Os códigos IPC foram agrupados em 35 campos de tecnologia para identificar a diversidade ou a especificidade do portfólio de patentes de um requerente e permite que os usuários identifiquem rapidamente o core business do player em estudo [1].

Todos esses 171 DP estão dispersos entre os depositantes. A empresa que possui o maior número de DP é a chinesa Xileco com 15. Outras sete empresas possuem dois aplicativos cada. A China não só tem o depositante com maior número de patentes, como também é o país de origem do maior número de empresas depositantes: das 30 primeiras empresas do ranking, 18 são chinesas.

No entanto, esse número relativamente grande de patentes não se restringe ao caso do etanol celulósico ou ao setor de energia ou energia alternativa. De acordo com o Bureau Nacional de Estatísticas da China, os pedidos de patentes, em geral, aumentaram de 25.000 para 300.000 entre 2000 e 2010 no país. Uma taxa média de crescimento anual de mais de 30%. Esse crescimento se deve aos investimentos em P&D realizados no país e principalmente a um efeito cumulativo de três fatores principais: alterações feitas

nas legislações de patentes e propriedade privada na China; programas de subsídios a patentes iniciados por províncias chinesas e investimento estrangeiro direto em pedidos de patentes. Importante enfatizar que essa soma de fatores também pode estimular desproporcionalmente a aplicação de patentes de baixa qualidade com o objetivo de se ter acesso aos benefícios [5,6].

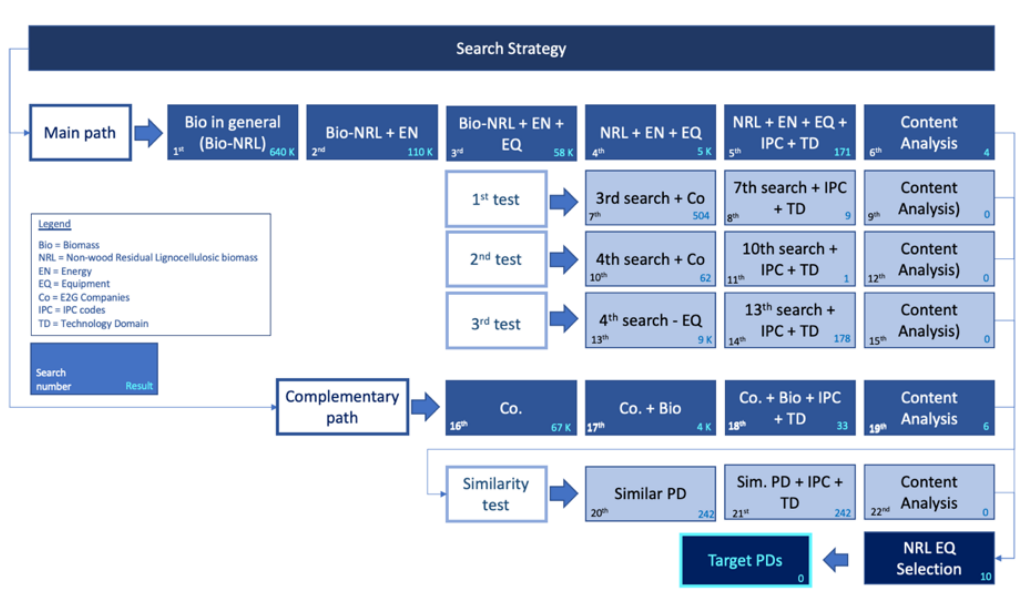
Após a seleção qualitativa do conteúdo, apenas 4 dos 171 DP foram classificados como diretamente-relacionados. Os três testes aplicados na via principal identificaram outros 201 novos DP similares não encontrados no caminho principal. No entanto, na análise de conteúdo, nenhum deles foi classificado como diretamente-relacionado, comprovando a eficácia do caminho principal.

A trajetória Complementar, que começou com DP atribuídos pelas 48 empresas ligadas à produção de E2G, rendeu seis novos DP classificados como diretamente relacionados. Todos aqueles aplicados pela Valmet, grande fabricante de equipamentos de papel e celulose que também trabalha para a E2G. No entanto, nenhum deles estava ligado à produção de energia/combustíveis. Possivelmente por isso não haviam sido selecionados no caminho principal.

O caminho complementar adicionou seis DP aos quatro diretamente-relacionados do caminho principal, aumentando o número total de DP diretamente relacionados para dez [6-16]. O teste de similaridade aplicado a esses dez DP não identificou nenhuma nova patente, confirmando o número final.

A Fig. 4 mostra um resumo dos resultados de todas as pesquisas.

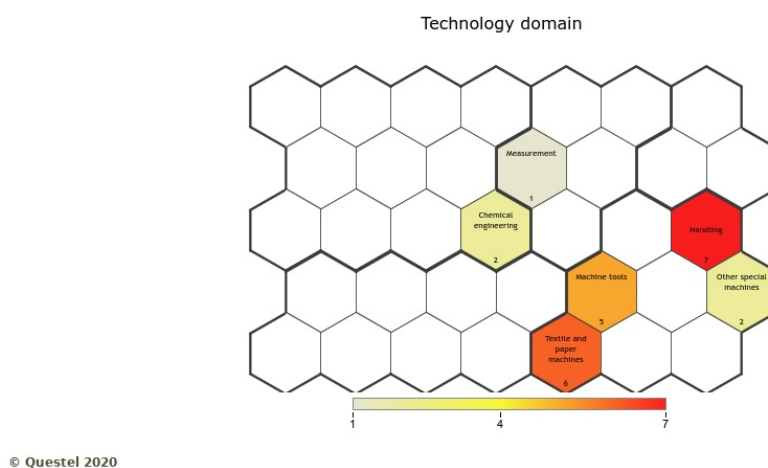
Fig. 4 – Resultados



Seleção Final

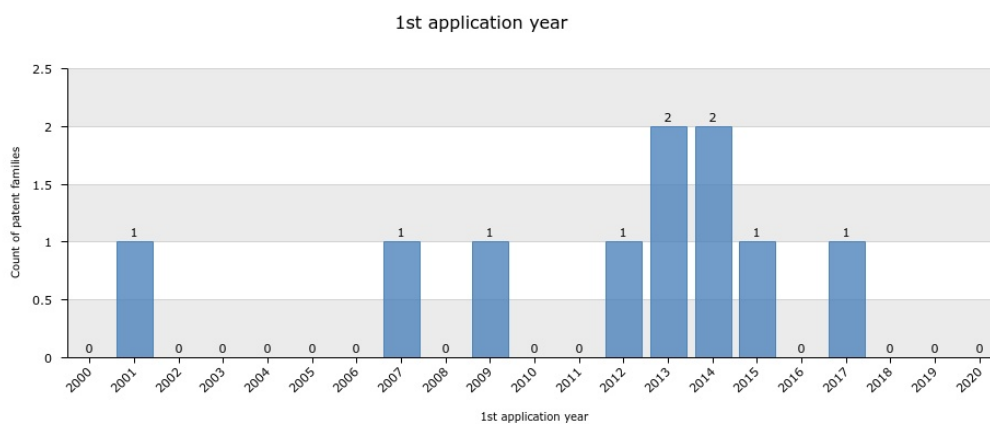
A maioria dos dez DP diretamente-relacionados concentra-se na área de engenharia mecânica (ver Fig. 5), indicando que os filtros aplicados aos 687 mil DP iniciais (caminho principal + caminho complementar) foram eficazes em levar os resultados a esse campo.

Fig. 5 – Campos de Domínio Tecnológico das patentes diretamente-relacionadas



A evolução da aplicação da DP ao longo do tempo (Fig. 6) mostra que nove delas foram aplicadas a partir de 2007 – período de forte crise e grandes altas do preço do petróleo, com um pequeno pico em 2013-2014, coincidindo com outro grande crise financeira e com o início das fases de construção das usinas 2GE.

Fig. 6 – Aplicação de patentes ao longo do tempo



A maioria dos DP foi depositado com prioridade na China (quatro) e na Europa-EPO (quatro). Os outros dois foram depositados nos EUA. Um depositado por uma universidade (na China) e os outros nove por empresas.

A Valmet – que foi uma das fornecedoras de equipamentos e tecnologia para algumas plantas E2G, depositou seis das dez DP [9,13-15,18]. A Valmet é uma das maiores fabricantes de equipamentos e sistemas para movimentação de sólidos e está presente principalmente no setor de papel e celulose. Seus DP eram sobre projeto de equipamentos para manuseio de 'não-madeira' e 'material lignocelulósico' e foram classificados em mais de um domínio tecnológico ('máquinas-ferramentas, manuseio, têxteis' e 'máquinas de papel'). Para fins de comparação, a Valmet depositou um total de 5.805 patentes em todos os campos

durante o mesmo período coberto por esta pesquisa. Dessas, apenas seis (0,1%) dizem respeito ao objeto de estudo.

A Metso e a Andritz, outras importantes fabricantes de equipamentos para a indústria de papel e celulose, depositaram, respectivamente, 4.335 e 2.568 DP no mesmo período, indicando que também utilizam o pedido de patente para garantir os direitos sobre seus conhecimentos. Nenhum deles foi encontrado entre os dez DP diretamente-relacionados selecionados nesta pesquisa.

Nenhum dos dez DP selecionados teve como foco o projeto de equipamentos para manusear/alimentar um dos tipos específicos de biomassa utilizados na produção do E2G (ELRN) – patente-alvo da pesquisa. Além dos seis sobre material não madeireiro e lignocelulósico, os outros quatro foram sobre material residual (palha, talo) em geral.

Os resultados da pesquisa também mostram que, além da baixa concentração de patentes por empresa, as empresas também apresentaram um baixo índice de colaboração em patentes aplicadas. Entre os últimos dez DP, apenas a Valmet e a Clariant aplicaram patentes em colaboração com outras empresas.

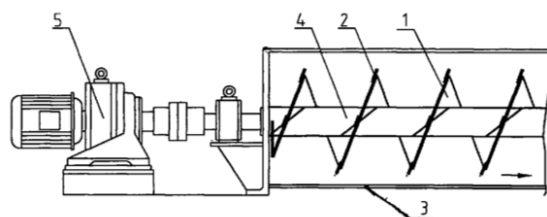
Projeto de Equipamentos

Caminho Principal:

Do total de dez patentes, quatro foram encontradas no caminho principal – todas chinesas: um 'Alimentador de transporte de hastes/talos tipo parafuso' (aplicado em 2007) [9], uma 'Prensa de moldagem por compressão de biomassa' (2013) [8], um 'Moedor de alimentação do tipo universal' (2014) [14] e 'Máquina trituradora de grama' (2015) [15].

A 'Prensa de moldagem por compressão de biomassa' foi classificada como diretamente-relacionada porque incluiu em seu projeto um sistema de alimentação de prensa contínua para palhas de milho e palhas de trigo, entre os materiais estudados. Tanto o 'Moedor de alimentação tipo universal' quanto a 'Máquina trituradora de grama' foram selecionados para abordar a trituração de palha em geral, palha de milho e palha de arroz. Como o transporte de materiais com fibras longas é sempre problemático, o conhecimento das técnicas de trituração da palha pode ser considerado útil para a alimentação desse tipo de material em instalações industriais. O design do alimentador de transporte de hastes/talos 'tipo parafuso' descreve o equipamento típico para alimentação de matérias-primas sólidas. Como foi projetado para lidar com palha de trigo e outros materiais, também foi classificado como DP diretamente-relacionado. A Fig. 7 mostra a representação estrutural de que o alimentador transportador de palha tipo parafuso modelo utilitário, contido no DP 'Alimentador de transporte de hastes/talos tipo parafuso' [9].

Fig. 7 - Projeto de alimentador de transporte de hastes/talos 'tipo parafuso'



Nenhum dos DP encontrados no caminho principal trata de equipamentos projetados para os tipos específicos de biomassa usados nas plantas de E2G. Nem mesmo entre os quatro DP selecionados ao final. Todos tratam de diferentes tipos de biomassa, trazendo a ideia de que o equipamento projetado pode manusear ou alimentar qualquer um deles com a mesma eficiência. Supor que todos os diferentes tipos de biomassa com diferentes especificidades, diferentes comprimentos de fibra e diferentes teores de umidade se comportariam de maneira semelhante quando manuseados pelo mesmo equipamento pode ter sido uma das causas dos problemas de produtividade enfrentados pelas pioneiras do E2G.

No entanto, se durante o desenvolvimento das patentes as empresas utilizaram diversos tipos de biomassa lignocelulósica em seus testes, inclusive aquelas utilizadas em plantas de E2G, é bem provável que esses testes tenham contribuído para a geração de conhecimento técnico sobre o comportamento desses materiais. Conhecimento que pode ser fundamental para a solução futura destes problemas.

Esses quatro DP foram os únicos selecionados entre os 171 escolhidos como projetos de equipamentos para lidar com a biomassa residual lignocelulósica. Mesmo assim, não foram específicos a ponto de se dedicarem a um único tipo. Os resultados da pesquisa ao longo do caminho principal indicam, portanto, que não há conhecimento patentado suficiente para garantir massa crítica para o propósito específico de alimentar essas biomassas em plantas industriais.

É importante notar que todas as quatro patentes foram aplicadas antes de 2016, quando os problemas operacionais das usinas 2GE pioneiras começaram a ser detectados, o que pode indicar que esses desenvolvimentos não foram motivados nem influenciados por esses problemas.

Caminho complementar:

A Valmet depositou todas as seis patentes selecionadas pelo caminho complementar: um 'Contêiner com dispositivo de descarga' (aplicado em 2001), um 'Sistema para manuseio de material vegetal não-madeira' (2012), um 'Transportador de parafuso para material lignocelulósico' (2013), um 'Depósito intermediário para coleta e descarga de material lignocelulósico' (2013), um 'Alimentador de parafuso e sistema para material de biomassa lignocelulósica' (2014) e um 'Sistema de alimentação de biomassa não-madeira' (2017). Dois deles dizem respeito a um recipiente tampão tipicamente localizado entre etapas de processo contínuos e descontínuos para absorver as oscilações entre eles. Os outros quatro lidam com projetos de 'alimentadores de parafuso', normalmente usados para alimentar cavacos de madeira na indústria de papel e celulose, mas também usados nas fábricas pioneiras do E2G.

Da mesma forma que as quatro patentes chinesas selecionadas pelo caminho principal, as seis patentes da Valmet, também não foram explicitamente desenvolvidas para um tipo específico de biomassa. Todos eles projetaram equipamentos para vários tipos considerados semelhantes. As patentes se referiam aos materiais testados de forma genérica como 'biomassa não-madeira' e 'biomassa lignocelulósica'. Eles também traziam a ideia de que seus comportamentos seriam semelhantes quando manuseados pelo equipamento projetado. Assim como as patentes chinesas, a maioria das patentes da Valmet selecionadas pelo caminho complementar foram aplicadas antes de 2016. Apenas a aplicada em 2017 (Sistema de alimentação de biomassa não-madeira) pode ter sido influenciada pelos projetos enfrentados pelas plantas pioneiras do E2G. Mesmo assim, não foi desenvolvido para um tipo específico de biomassa.

REFERÊNCIAS

- [1] WIPO. Guide to the International Patent Classification. World Intellectual Property Organization, Geneva, Switzerland.
- [2] Questel. Orbit Intelligence: business intelligence software [Internet]. (2021). Available from: <https://www.questel.com/business-intelligence-software/orbit-intelligence/>.
- [3] Calderon OR, Arantes V. A review on commercial - scale high - value products that can be produced alongside cellulosic ethanol [Internet]. Biotechnology for Biofuels. Available from: <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1529-1>.
- [4] INPI. Busca de patentes [Internet]. (2016). Available from: <http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/informacao/busca-de-patentes>.
- [5] Albers SC, Berklund AM, Graff GD. The rise and fall of innovation in biofuels. Nat. Biotechnol. 34(8) (2016).
- [6] Chen Z, Zhang J. Types of patents and driving forces behind the patent growth in China. Econ. Model. [Internet]. 80(November 2018), 294–302 (2019). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.11.015>.
- [7] Valmet; Metso Paper; Valtra. Arrangement, system and method for handling non-wood plant material. (2012).
- [8] Handan Goldenlion Cotton Machinery. Biomass compression molding press. (2013).
- [9] Shandong Shankuang Machinery. Screw type stalk conveying feeder. (2007).
- [10] Valmet Technologies; Metso Paper. Container with discharging device. (2001).
- [11] Valmet. Bin arrangement for the collecting and discharging of smaller ligno-cellulosic material. (2013).
- [12] Valmet. Screw conveyor for lignocellulose containing material. (2013).
- [13] Valmet. Plug screw feeder, feeder arrangement and system for treatment of lignocellulosic biomass material. (2014).
- [14] Shenyang University of Technology. Universal type feed grinder. (2014).
- [15] Urumqi Animal Husbandry Abundant Weiye Agricultural Machinery Manufacturing. Grass crushing machine. (2015).
- [16] Valmet. System for feeding non-wood biomass. (2017).

9.2 ANEXO II – ARTIGO / BIOMASS FEEDING IN CELULLOSIC ETHANOL PROJECTS: AN UNDERESTIMATED ISSUE

Alexandria Engineering Journal (2022) 61, 10233–10244



Biomass feeding in cellulosic ethanol projects: An underestimated issue?



Carlos Eduardo Fernandes Corrêa^a, Daniel de C.L. e Penalva Santos^{b,*},
José Vitor Bomtempo^a, Flavia Chaves Alves^a, Cristina Gomes Souza^c,
Ronney A. Mancebo Boloy^c

^a UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola de Química, Centro de Tecnologia Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco E, Sala E-201, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro CEP 21941-909 Caixa Postal 68542, Brazil

^b IFPE - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Rua Sebastião Joventino, s/n°, Destilaria Central, Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco CEP: 54.510-110, Brazil

^c Cefet/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Av. Maracana 229, Rio de Janeiro CEP 20271-110, Brazil

Received 26 August 2021; revised 8 March 2022; accepted 27 March 2022

KEYWORDS

Biomass;
Feeding;
Ethanol;
Cellulosic;
Handling;
Patents

Abstract Projects unsuitable for specific types of biomass can cause serious flow problems, capable of making the production unfeasible. This paper aims to identify whether there was available technological knowledge proper to design equipment that would guarantee a linear flow feed of biomass as raw material, searching patents applications, that is an efficient tool widely used to analyse technological scenarios. The results showed an increase in the patents number dealing with specific types of biomass as of 2016 – a pick of 14 patent application per year, but still in a very small number if compared to the number of patents applied on biomass in general – a pick of 5.974 patent application per year. Analysing together with problems occurred in cellulosic ethanol plants, these results seem to support the hypothesis that new technological developments will still be needed to allow plants to work efficiently with biomass as feedstock. This study brings a new approach to discussions about the challenges faced by second-generation ethanol plants, both in the search methodology developed for this research and in bringing the theme of biomass feeding and handling to the centre of debates on the next challenges for industrial plants using lignocellulosic biomass as feedstock.

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier BV on behalf of Faculty of Engineering, Alexandria University This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Corresponding author.

E-mail addresses: daniel.penalva@cabo.ifpe.edu.br (Daniel de C.L. e Penalva Santos), vitor@eq.ufrj.br (J.V. Bomtempo), falves@eq.ufrj.br (F.C. Alves).

Peer review under responsibility of Faculty of Engineering, Alexandria University.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.066>

1110-0168 © 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier BV on behalf of Faculty of Engineering, Alexandria University This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

One century after oil overcame coal as the main source for generating energy, the world seems to move towards a new change in its energy base [1]. This latest great change happened since

1920, when oil started consolidating its role as the main worldwide source of fuel for transport. Such uncontested standing endured for 50 years, until it was shaken by the first embargo imposed by the Organization of Petroleum Exporters Countries – OPEC, which led to significant rises in the oil prices and produced a global energy crisis, sparking interest in the search for alternative energy sources [2]. New crises, along with great fluctuations of oil prices, added to social and regulatory pressures for the prevention of climate changes and against the greenhouse gas emission, further stimulated the search for alternative fuels that could both substitute oil and reduce environmental impacts [2–5].

Solutions which may reduce the economic dependency on oil and, at the same time, mitigate environmental impacts, certainly will be complex and affect not only fuel production processes, but also consumption habits, technological changes in vehicles production and public transports' expansion [5,6] and biofuels can be one of the possible solutions as they may provide routes that meet these demands. Among biofuels, ethanol is the most widely used for the transport worldwide, being produced in large scale in countries like the United States and Brazil. Its utilization has shown significant growth, also stimulated by an increasingly larger number of countries adopting policies which privilege the use of renewable energies. Ethanol is presently produced from feedstocks which contain sugar and starch, whose production is capable of meeting only a limited fraction of the global needs for fuels. One alternative which seeks to overcome such limitations is the production of cellulosic ethanol from residual biomasses [2,7,8].

Over the past 50 years, several scientists and engineers have concentrated their research and discussions on lignocellulosic biomass conversion processes. Pretreatment, enzymatic hydrolysis, and fermentation are fundamental steps of converting lignocellulosic material into ethanol and the main challenges were associated with one or more of these stages. The pretreatment stage is responsible for breaking the physical lignin barrier and exposing cellulose and hemicellulose to the following stages. It is vital for the economically viable success of second-generation ethanol (2GE) production. Variables such as yield, concentration, and sugar production rates are fundamental in choosing the pretreatment route for each type of raw material. They have a close relationship to the subsequent enzymatic hydrolysis and fermentation stages. Enzymatic hydrolysis is a stage fundamental in productivity and the overall costs of the process. Due to the recalcitrant nature of the biomass fibers, the composition of enzymatic cocktails can be considered one of the essential parts of the technology. Combining *Cellulases*, *Hemicellulases*, and other accessory enzymes, this cocktail is responsible for catalyzing the hydrolysis of cellulosic and hemicellulosic biomass components into sugars to be fermented. The fermentation stage also carries a high rate of complexity, as different sugars can be generated in the pretreatment and enzymatic hydrolysis, whose fermentation can significantly impact the total process yield. The fermentation of sugars can occur after hydrolysis in a configuration known as SHF (separate hydrolysis and fermentation) or simultaneously in another configuration called SSF (simultaneous saccharification and fermentation). Or even in mixed configurations. The multiple combinations of raw material choice, process configurations, and pretreatment route generate a diversity of hydrolysate compositions that also include by-products that can act as inhibitors for the fermenta-

tion process, increasing the complexity in the choice and technology development of 2GE production processes [2,4,16,7,9–15].

The efforts and new developments to solve those issues resulted in the implementation of several cellulosic ethanol production plants between 2013 and 2015. In 2016, the U.S. Department of Energy hosted a Biorefinery Optimization Workshop with more than 100 bioenergy industry stakeholders to gather inputs and opinions on biorefinery development and optimization issues. At that time, only a few commercial scale biorefineries were starting to operate. Many technical (and non-technical) issues had revealed barriers to go on to the next development stages. Among them, it was highlighted: “Complexity and variability of non-food feedstocks; the operational difficulty encountered with the handling of solids in the production process, and recalcitrance of feedstocks to convert into products efficiently.” Workshop participants had also identified many challenges related to feedstock transportation and engineering processes within the biorefineries [19]. Problems never highlighted in the literature on biorefineries until the start-up of pioneer cellulosic ethanol plants. “The solutions should involve proper feedstock characterization, development of advanced feedstock supply system, and designing equipment based upon each feedstock material specifications” [17].

In general, lignocellulosic biomass is fibrous and with low density – which makes its transportation and handling inefficient. The variable content of moisture during harvest, besides making it possible of degradation, makes it difficult to manage transport and handling, as well as storage, feeding and pre-processing. The “imperfect flow in system can result in stagnation of material leading to feedstock oxidation, fermentation, runaway bioactive reactions, smoldering and ignition” [17]. The attributes of biomass are variable and inconsistent, both within a certain species and between different species, and they change with harvest location and time. The equipment used for its handling must consider these specificities, in order to guarantee stability in the feeding flows, vital for production units continuous operation [8,18,19].

The same workshop presented a study developed in 1998 by Rand Corporation on the growth of costs and performance deficiencies in pioneer process plants [20]. One of the points presented in the study deals with the performance of a solid processing plant. The study investigated the planned start-up time of 40 commercial-scale process plants in the United States and Canada over six years. The results indicated that 80% of the facilities processing solids had problems in handling this raw material. The average start-up time for solid handling plants was eighteen months, while the average start-up time for liquid and gas handling plants was three months. Besides, the solid handling plants operated with only 40% to 50% of the nameplate capacity. These performance drops were attributed, in the study, to the physics and mechanical processes rather than to chemical process problems. An indication that there is a capability gap in bulk solids flows for biorefineries that require knowledge and actions specific for their solution [17].

The implementation of new technologies using new materials, as in biorefineries, requires project management that understands these problems under the risk of failure in the plant's operations. The difficult nature of handling bulk solids in process plants and the effect that misuse of knowledge can be vital on these projects' overall success [17]. Improving the

technology currently used to feed biomass is vital for the future of using this type of material on a large scale because only with a stable feed flow is it possible to optimize the other process stages such as pre-treatment hydrolysis and fermentation. And it is precisely the optimization of these production stages that will be fundamental for reducing 2GE production costs.

Considering the possibility of a blind spot in the technological development that gave rise to cellulosic ethanol plants, this paper carried out a research on the patents applied in the main patent offices around the world, in order to identify if there were patents applied on the industrial handling of different types of biomass. The use of information contained in patent documents allows evaluating technological development in diverse areas, observing changes and scenarios over time. The analysis of the amount of patent documents - PD and also by international patent classifications - IPC, for example, allow to identify trends and technological breakthroughs, and has been applied methodologically in scientific research [21–23].

The objective was to identify whether there was technological knowledge proper to design equipment that would guarantee a linear flow feed of biomass in cellulosic ethanol production plants which started operating between 2013 and 2015. This research contributes to the advancement of science by placing the issue of biomass feeding and handling at the center of the debates of 2GE biorefineries, and from the search and analysis strategies of technological information developed specifically for this purpose, both fills a scientific gap, and it subsidizes the decision-making of public and private managers.

1.1. The cellulosic ethanol case

Since 1970, with the oil crisis, researchers have been poring over technologies for ethanol production using lignocellulosic materials as feedstock [24] which, even before the new millennium, already indicated having potentially competitive costs for its mixture with gasoline. The technological advances reached for biomass pre-treatment, together with the development of genetically modified micro-organisms for the bioconversion seemed to offer sufficient results in order to secure the reduction of production costs [25].

In April of 2014, the editorial of *Biofuels* magazine - upon commemorating the success of the stages of enzymatic hydrolysis in industrial plants for the production of cellulosic ethanol built between 2005 and 2013 - announced that “A recent boom in the construction of cellulosic ethanol demonstration facilities and the upcoming operation of new full-scale commercial biorefineries in different countries shows that second-generation biofuels have become a reality” [24]. Several other publications of the same period reported the apparent success of cellulosic ethanol production plants in similar ways [4,7,9–15].

There were many reasons for such optimism. The first commercial scale plant, designed to produce 75 million liters of ethanol per year from agricultural residues – e.g., rice straw, wheat straw and *Arundo donax* - had already been built in 2013 by Chemtex (M&G Group) in Crescentino, Italy. The first installation to produce cellulosic ethanol in the Southern Hemisphere was the GranBio plant, designed to produce 82 million liters of ethanol per year from cane straw – which started operating in September 2014, in São Miguel dos Campos, Alagoas, Brazil. Also in September, the POET cellulosic

ethanol plant (Sioux Falls, SD, USA)/DSM (Herleen, The Netherlands) – known as Project Liberty, in association with a traditional corn ethanol plant in Emmetsburg, IA, USA, announced the start of its operations to produce 94.5 million liters of ethanol per year from corn stover – with the intention of expanding its consumption of biomass to include corn cobs, leaves, peels and some stalks. In October of the same year, the plant belonging to Abengoa (Seville, Spain), designed to produce 95 million liters of ethanol per year using corn stover, started operating in Hugoton, KS, USA. Raízen (São Paulo, Brazil) – a joint-venture between Royal Dutch Shell (The Hague, The Netherlands) and the Brazilian company Cosan (São Paulo), inaugurated in 2015 a plant to produce 40 million liters of ethanol per year in Piracicaba, SP, Brazil – foreseeing the use bagasse and straw of sugarcane as feedstocks. In October of 2015, DuPont (USA) inaugurated the biggest cellulosic ethanol plant of the world in Iowa, Nevada, USA, with a capacity of producing almost 120 million liters of ethanol per year, from corn stover [26].

During 2016, many papers, still demonstrated optimism about the plants operability but indicating that for the complete success of the technology it would be still necessary to overcome a series of limitations which prevented the plants to operate in the nameplate capacities [8,26–29]. The previous global forecasts, which pointed to an intense growth in ethanol production between 2014 and 2020 from 750 million to 2.22 billion liters per year were already revised to reach 1.7 billion liters by 2024 [30]. The initial optimism gave place to prudence in the forecasts – as, despite all the advances, the technologies employed in cellulosic ethanol plants still had to overcome huge challenges to become mature and competitive. The successive comings and goings in projects reinforce prudence for new forecasts.

After undergoing financial difficulties, in 2016 Abengoa declared bankruptcy of its bioethanol plant, and GranBio suspended operations of its plant due to technical difficulties in the pre-treatment. In 2017, DowDuPont announced the intention of selling their cellulosic biofuels business and their cellulosic ethanol commercial plant in Nevada, while Clariant (Switzerland) announced the start of a project for its own plant in Podari, Romania and the sale of a license to Enviral (Slovakia) for construction of a plant for production of 57 million liters of ethanol per year, from agricultural residues. In 2018, the Crescentino plant operated by Beta Renewables was sold in order to pay off debts of the M&G Group, while Raízen announced a reduction in their cellulosic ethanol investments – due to the low gasoline prices [2].

Besides the expected problems concerning conversion stages (pre-treatment, enzymatic hydrolysis and fermentation), production plants faced great challenges in handling and storing lignocellulosic biomass, both baled and chopped – especially in feeding systems for pre-treatment which, due to being the first stage in the conversion processes, involves both drive systems and physicochemical conversion. The processing of such fibrous material made the equipment work well below their designed capacities [8,18].

Part of the difficulties in handling biomass faced by the cellulosic ethanol plants may have happened due to the belief that equipment suppliers already had technologies capable of solving the problems that would be found, or that these problems would become relevant only after the first stage of the pioneer plants operation [31]. Since each biomass behaves in peculiar

ways and lignocellulosic biomasses were only recently tested in industrial scale, it is quite unlikely that even the most traditional equipment supplier had consistent experiences with those. The main objective of raw materials feed systems in production plants is to guarantee homogenous flows; judging from the obtained results, it seems that no special innovations considering new types of biomass were made at the time [17]. Litigations brought up by POET, GranBio and Biochemtex against their respective suppliers of equipment or technologies due to problems occurred in their cellulosic ethanol plants in the following years seem to support such thesis [32–34].

In 2019, GranBio announced the resumption of its operations in São Miguel dos Campos, Brazil, without informing the production volume achieved, while Raizen and the Project Liberty continued to operate their units. In addition to that, it is hoped that the Clariant and Enviral plants will start their operations soon [2].

Hard data on the plants' effective capacity during their operation time would be essential for a more accurate assessment of the pioneer plants' problems. The literature has recently raised questions about the effective productivity of pioneer plants of 2GE, but still without hard data [20,28]. They are not yet openly available.

2. Materials and methods

2.1. Methods and tools

Considering that patenting an invention is recognized worldwide as a tool for guaranteeing rights over technologies, the study of such technological information is largely utilized for learning about technological advanced scenarios, as well as their foresight [21,35–37]. 70% of the technological information contained in the patent documents cannot be found in any other source [38]. Inventors, entrepreneurs and research institutions use technological information both to develop new technologies and to analyze markets and technological trends. The technological information is classified into standardized data systems that enables comparative analysis [39]. Mapping patents and compares to other published patent search studies allows both quantitative analyses – through the statistical treatment of large quantities and varieties of technological information – as well as qualitative analyses – through content analysis of patent documents [40]. For that reason, this research used as its main method the *Bibliometric Patents Analysis*, in addition to bibliographical and documental research.

The study searched registries of patent application relating specific types of biomass with equipment for handling, transport and processing solids in order to test the hypothesis of the existence of gaps in technological knowledge which could justify part of the problems found in cellulosic ethanol plants. Such searches occurred in January 2021, using *Business Software Questel Orbit Intelligence* to have access to a large database covering broadly patent offices and for the possibility of running dynamic searches, crossings, and analyses – including qualitative assessments - with real time access to the integral patent text. The software accesses a proprietary database, which updates daily over 54 million patents registered in over 95 countries [41].

2.2. Search strategy

Initially, basic search premises were outlined, in which the fields and status to be considered were defined, as well as the logical Boolean operators of proximity and truncation were used. For searches by keywords, data were collected in the fields: “title”, “abstracts”, “claims” and “object of invention”. In order to detect the interest of inventors/assignees in new technologies related to the industrial handling of specific types of biomass, both “alive” applications (granted and pending) and “dead” ones (revoked, lapsed, expired) were considered. The use of logic Boolean operators also became necessary using “OR” for greater coverage, “AND” to abide to specific fields, and “*” to consider endings - e.g., “CONVEY” in order to find results that contain “conveyor”, “conveyed”, “conveyance”, etc.

Sixteen surveys were conducted according to four Strategic Stages:

Stage 1 – General Biomass: With the intention of comprising in a generic way the universe of lignocellulosic biomasses, the initial research sought to identify patents that contained the keyword “BIOMASS” and its residues utilized as feedstock – e.g., “STOVER”, “STRAW” or “BAGASSE”. Considering that the wording of many patents could not mention the generic term “biomass” and, instead, the specific type of biomass for which the invention was designed, the words “CORN”, “WHEAT”, “CANE” and “ARUNDO” were added to the searches, since those were the cultures used by companies who installed cellulosic ethanol plants, as shown in Table 1:

The first two surveys, using exclusively keywords referring to solid handling equipment and fuels, is to compare the number of patents applied in general with those applied for specific use in different types of biomass. To focus solely on the ethanol segment, an additional filter was used, whereby restricting the set only to patents that relate to energy, fuel and ethanol - by using the keywords “FUEL*”, or “BIOFUEL*”, or “ENERG*”, or “BIOENERG*”, or “ETHANOL” or “BIOETHANOL”.

Having as premises that traditional equipment for the handling of solids in industrial chemical plants are screws, conveyors, mills, grinds, crushers and sieves, the keywords “HAND*”, or “TRANSPORT*”, or “SCREW*”, or “CONVEY*”, or “MILL*”, or “GRIND*”, or “CRUSH*” or

Table 1 Cellulosic ethanol biorefineries. Source: SANTOS, et al, 2016 [26].

2GE Biorefineries	Plant Location	Feedstocks
GranBio	Maceió, Alagoas, Brazil	Sugarcane straw
Raizen	Piracicaba, São Paulo, Brazil	Sugarcane bagasse
Chemtex/Beta Renewables	Crescentino, Itália	Arundo donax and wheat straw
DSM/Poet	Emmetsburg, IA, USA	Corn stover
Abengoa	Hugoton, KS, USA	Corn stover
DuPont	Iowa, Nevada, USA	Corn stover

“SIEV*” were utilized, in order to correlate those with the types of biomass handled, including also the words HANDLING and TRANSPORT.

Stage 2 – Specific Biomass: Since several issues concerning the handling of specific types of biomass were indicated throughout the references, the next step of the research sought to yield separate results for each of the specific types of biomass utilized in cellulosic ethanol plants – i.e., corn, wheat, cane and *Arundo*.

Stage 3 – IPC Filter: Despite of all the keywords used as filters, the results showed patents dedicated to several technological areas of interest, covering a much wider range than the originally intended focus.

The third Stage aimed to limit the results to the technological field of interest as defined by the research utilizing filters taken from the International Patent Classification – IPC. When published, patent applications are framed by their IPC technology area. Thus, starting from the Main IPC Code, it is possible to find the focus of interest of patented technologies [42] and to have more specific limits for the identification of a set of patents which represent more strictly the research objectives.

IPC classifies patent documents per sections, classes, subclasses, groups and subgroups. The eight sections refer to human necessities (A); performing operations and transporting (B); chemistry and metallurgy (C); textiles and paper (D); fixed constructions (E); mechanical engineering, lighting, heating, weapons, and blasting (F); physics (G); electricity (H).

Technological developments concerning the use of biomass in general are not new:

- The food industry masters the handling of grains, fibers and other types of biomass for industrial use. The same happens with tobacco production. The pulp & paper industry handles wood in various forms, also for industrial use. The sugar-alcohol industry in Brazil already masters the handling of sugarcane bagasse for the energy generation. However, none of these developments' fields deal with handling of the specific types of biomass used in cellulosic ethanol plants installed between 2013 and 2015.

It is worth mentioning that supposed similarities between wood and other lignocellulosic biomasses may have been responsible for the belief that equipment suppliers already possess technologies capable of solving the problems that were to be faced [17,30].

- The animal feed production industry uses lignocellulose as the feed of livestock in dairy. There are well-established facilities for biomass transportation. Europe and Asia use agricultural residues such as corn stover, rice straw, and wheat straw as fuel to generate electricity and their transportation systems are well established. However, these sectors are not as sensitive to the uniformity of flow and characteristics of raw materials as a continuous process chemical plant.

To avoid the contamination of the final results of this research by technological developments made in the above-mentioned fields - thus, giving the false impression that the existence of technology domain to handle any kind of biomass - the patents applications framed in sections of the IPC con-

cerning food, tobacco, wood, animal feed, and power generation were excluded from this Stage on.

Thus, all applied patents indicating a focus of interest in section “A” - which concerns agriculture, production of foodstuffs and tobacco, besides personal and domestic articles - were excluded by the IPC Filter. Following the same premise, the IPC Filter also excluded applications made in section “D” (textiles and paper). The same happened with applied patents indicating a focus of interest in section “C” – (Chemistry and Metallurgy), in order to avoid those developments made in the chemical conversion processes may be mixed in the final results – which must deal exclusively with the handling of specific types of biomass.

Sections “E” (fixed constructions), “G” (physics) e “H” (electricity) concern other types of technological developments and, thus, applied patents with focus of interest in these sections were also excluded from this stage.

Therefore, in order to select only applied patents with focus of interest in equipment for handling, transport and processing of solids, the final search was limited to applied patents with focus of interest in sections “B” (performing operations and transporting) and “F” (mechanical engineering, lighting, heating, weapons and blasting) – with the exception of the following classes: B21 (dealing with metallic materials); B27 (wood and similar materials); B28 (ceramics); B31 (paper); B4 (printing); B82 (nanotechnology); F2 (lighting and heating); and F4 (weapons and blasting).

Stage 4 – Qualitative selection: The fourth and last stage consisted of analyzing qualitatively the content of patent documents obtained in the previous stage. This stage allowed both for a better understanding of the invention contents, as well as to eliminate documents which did not fit the scope of the present study – thus, arriving at the desired final set. This final set was also used to identify the main countries by number of patents application and to analyze patent application over the years.

To analyze the targeted technologies, information was extracted about the development of technologies, patents applications over time, and about the countries that concentrated those applications.

2.3. Analysis strategy

For quantitative analysis, analytical tools of the *Business Software Questel Orbit Intelligence* were used, which even allowed the identification of the Technology Domains of the PDs [43]. The IPC codes have been grouped in 35 technology fields and 5 group fields to identify the diversity or the specificity of an applicant's patent portfolio and enables users to identify the core business of the player very quickly being studied. More than one technology domain can be declared in the same patent. This enabled both a better understanding of the set of patents at each Stage, and it could guide searches for the technological fields that this research focuses on.

Quantitative analyzes were carried out in stages 1 to 3, and in the fourth stage a qualitative analysis of the content of PDs was necessary. It was possible to carry out both the qualitative selection, identifying those that deal with equipment for handling solids aimed at specific types of biomasses used in cellulosic ethanol plants, as well as the qualitative analysis, typifying and classifying the equipment identified.

3. Results and analysis

The results of the 16 Surveys carried out were grouped according to the four strategic Stages, as follows:

- Stage 1 (Surveys 1 to 4): from 17,856,875 to 63,226 PD
- Stage 2 (Surveys 5 to 8): to 8,085 PD
- Stage 3 (Surveys 9 to 12): to 813 PD
- Stage 4 (Surveys 13 to 16): to 151 PD

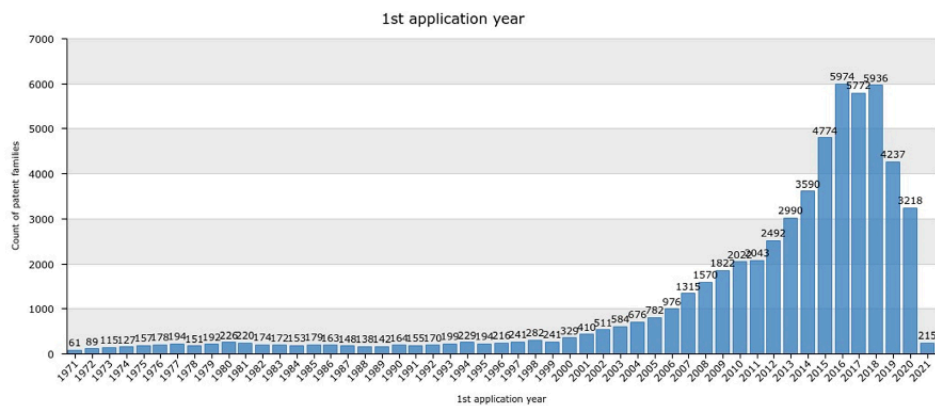
From the most general selection of patents dealing with biomass, equipment, and fuels (Stage 1) to research carried out on the use of specific types of biomass in solids handling equipment for the fuel sector (Stage 4). Among more than 17 million PDs dealing with solid handling equipment, the first stage selected 63,226 dealing with equipment related to biomass handling for the energy industry. Only 0.35% of patents applied on solid handling equipment deal with biomass in its various forms and only 1% of the patents on fuels also deal with biomass. Figures that may indicate that biomass is still not a relevant topic, neither for the inventors and patent assignees who deal with this kind of equipment. In relation to patents applied on biomass in general, 8% deal with its use together with equipment for handling solids and fuels. Despite being a much higher percentage than the previous ones, it also indicates that the combination of biomass with solid handling equipment and fuel is not a major theme among inventors and assignees.

The evolution over the years of the 63,226 patent applications (see Fig. 1) shows a continuous increase since 2001, peaking between 2016 and 2018. The fall from 2019 may have been influenced by the relative failure of 2GE plants, but certainly, with significant influence of the drop in oil prices. The year 2020 cannot be evaluated yet due to the publication period of the PDs, which is 18 months.

In the Stage 2, the word biomass was removed, and the research focused on specific types of biomass combined with equipment and fuels and the following four surveys (5th 6th 7th and 8th) add up to 8,085 patent applications. When comparing these results to the above 63,226, combining biomass in general with handling equipment and fuels, it indicates that only 1.3 out of each 10 families of patents applied for the industrial handling of biomass had considered the specificities of each type.

Patents applied on corn added up 4,093 – 50% of the total, indicating that is the most relevant raw material among the 5 types surveyed. Result that is justified since half of the 6 implemented plants reported the use of corn stover. Considering that two other plants were installed in Brazil and used cane residues as raw material, it was expected that the patents applied on cane would be the second priority of depositors. However, patents on wheat are more than double the patents on cane (2,917x 1,045). This apparent inversion may be since Beta Renewables plant, the first one installed, declared that it would also use wheat in addition to *Arundo donax*, as well as the possibility of researchers and inventors studying the use of wheat straw to replace or to complement corn stover for the plants installed in the US.

Analyzing these 8,085 documents by the technology domains declared in patents, the research found that Chemistry, stand out as predominating over the others: 74% domain declared among all those patents was referred to Chemistry; 20% to Mechanical engineering; 2% to other fields and 1% for Electrical engineering and Instruments each. Results aligned with the content of the literature review focused on the conversion processes, especially until 2016. Such a focus could have been one of the main causes of the possible blind spot which “hid” the handling of biomass as a technology field to be developed. Fig. 2 shows the distribution of Technology



© Questel 2021

Fig. 1 First application year (Stage 1) Note: For the sake of clarity on the information presented, this graph only shows the period between 1971 and 2021, but the first patent on the subject was applied in 1885 in the USA. Between 1885 and 1970, the average was approximately 50 patent applications per year.

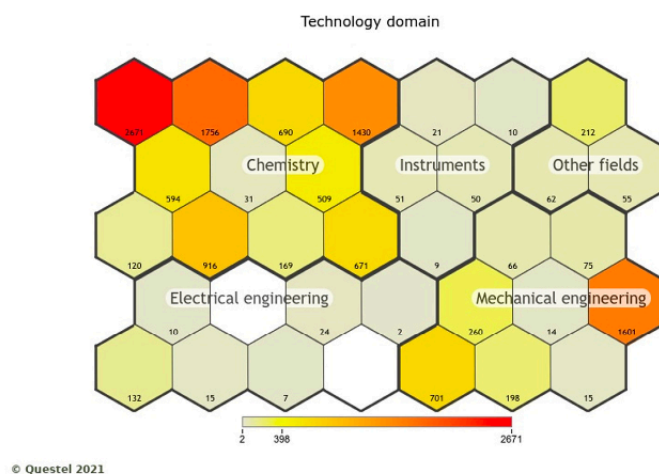


Fig. 2 Patents Technology Domain (Stage 2).

Domains for the patents resulting from the Stage 2, clearly indicating the significant predominance in Chemistry.

From that point onward, the research advanced to Stage 3, by using the IPC Filter, selecting only patents applied under sections (B) and (F) – excluding the classes outlined in the methodology section. This stage yielded 813 patent documents: 410 with corn as raw material, 272 with wheat, 129 with cane and 2 with *Arundo donax*. Fig. 3, shows the technology domain fields of the patents selected after the IPC filters (before the qualitative selection). Despite all the filters directing the searches to the areas of mechanical engineering/equipment

(the focus of this research), there is still a significant predominance of patents applied in the field of Chemistry, reinforcing that the direction of the developments still pointed to the biochemical processes of converting biomass into bioproducts.

In the last stage (Qualitative selection), all 813 patents of each of the four raw materials were qualitatively analyzed for their contents to identify those dealing specifically with new technologies for solids-handling equipment aimed for specific types of biomass used in cellulosic ethanol plants. This selection found 198 documents: 107 from corn, 48 from wheat, 43 from cane, and none from *Arundo*. As some patents

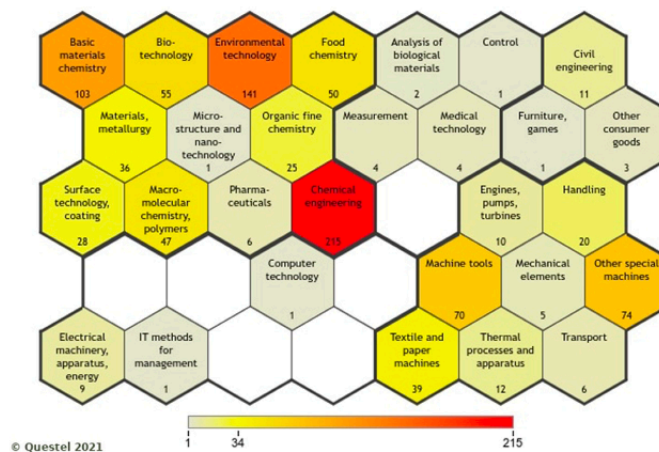


Fig. 3 Patents Technology Domain (after Stage 3).

appeared in more than one raw material (mainly for corn and wheat), the repeated documents were excluded, leaving only 151 patent documents applied for solid industrial handling, presenting equipment designs. It means that, from 813 documents, 47 were repeated in different raw material selection and the great majority, 612 patents, dealt with methods or process flows describing stages, unit operations, or separation processes.

These 612 patents are dedicated to production methods or processes dealing with the main process stages developed to produce 2GE and several others. About 15% of them addressing solutions for the main processes stages to produce 2GE - pretreatment, enzymatic hydrolysis, or fermentation. The others have the most diverse approaches. Or they are dealing with the processes of converting biomass into a product without highlighting the unitary operations involved or approaching other process stages such as gasification, liquefaction, pyrolysis, oxidation, among others.

It is essential to highlight that, for methodological reasons, this sample universe adhered to the types of biomasses used by the 2GE production plants installed between 2013 and 2016, excluding other types, such as paddy straw, that, even if of equal strategic importance for the future of biofuels production were not used in those units. This study recognizes this limitation, opening space for future research in this field.

Only 151 patent documents – i.e., 0.24% of the 63,226 patents were applied to present new equipment designs for solids materials. It should be highlighted that knowing about the efficiency or functioning details of each equipment is outside the limits of this study.

After IPC filter and qualitative selection, patents applied on corn still appear in top, followed by wheat, cane and *Arundo*. It can be said that in these selection stages, the patents applied on *Arundo donax* are statistically negligible. Possibly due to the early stop of the Crescentino plant operation.

The great majority of these 151 patents was applied in Asia (67,5%), with great predominance for China (see Fig. 4). About 18% of the total was applied in the United States, and about 13% in Europe. Only 2 out of these 151 patents applied in Brazil where two of the six cellulosic ethanol plants were installed. Recently published research showed that, despite being the country that most uses biomass in the world, Brazil does not perform among the main countries developers

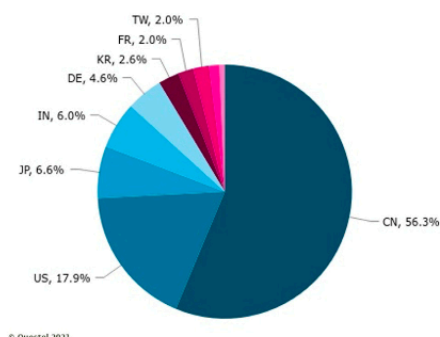


Fig. 4 Patent families per priority country.

of technologies related to the use of biomass as a raw material for biofuel production [44,45].

The main highlight is China, with more than 50% of the total patents filed, despite not operating any 2GE biorefinery until now. However, this relatively large number of patents is not restricted to the case of cellulosic ethanol or the energy or alternative energy sector. According to the National Bureau of Statistics of China, patent applications, in general, increased from 25,000 to 300,000 between 2000 and 2010 in the country. An average annual growth rate of over 30%. This growth is due to R&D investments made in the country and mainly to a cumulative effect: amendments made in patent and private property legislations in China, patent subsidy programs initiated by Chinese provincial and foreign direct investment in patent applications. Important to emphasize that experts claim that this sum of effects can also disproportionately stimulate the application of low-quality patents to receive the benefits [46].

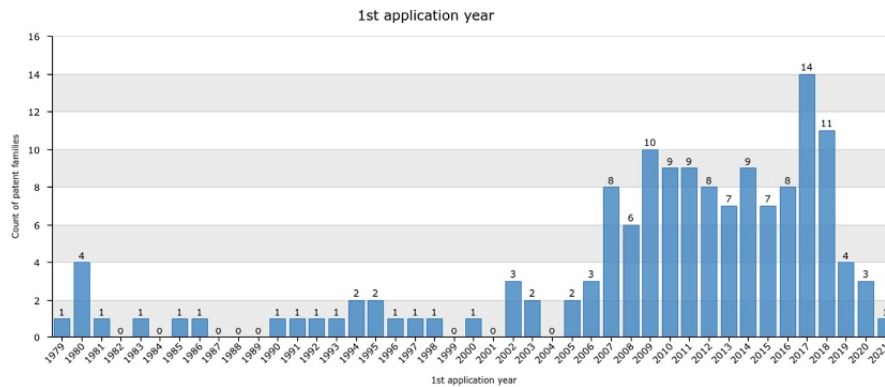
The first patent from those 151 was applied in 1979, and over the years, the evolution of the 151 patents application – as shown in Fig. 5 – registered a remarkable growth from 2015 to 2017, during the construction completion period and start operation of the 2GE pioneer plants. The drop in the patent application happens in 2018 after the production plants' problems and when the oil prices dropped down. This significant growth may represent a response to the demand for new technologies for use of renewable raw material, which may solve lignocellulosic biomass handling issues. Comparing to others published patent research into renewable energy fields, the growth pattern is observed in many developed countries, mainly from 2006 onward [47,48].

Fig. 6 shows the IPC section indicated in each of the 151 patents applied. Each patent may contain more than one IPC section. It is important to note that, even after all filters, their contents still have a significant concentration in the field of Chemistry (section "C"). Scientific research using patent information in a broader spectrum such as "the use of biomass" and "biofuel production" also points to the predominance of chemical processes related to section "C", more specifically the "torrefaction of biomass" [35,45].

3.1. Patents final selection

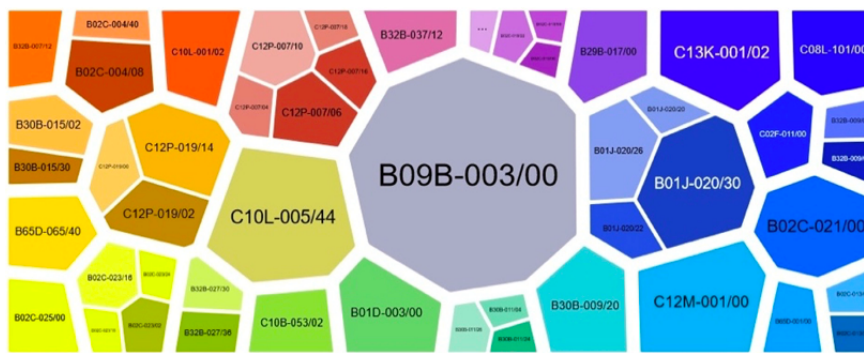
The 151 patent documents selected were classified by types of equipment as follows (see Table 2):

- Equipment for pellets or briquets production or boiler feeding. Not directly related to the continuous biomass feeding processes in industrial plants.
- Equipment that deals with liquid–solid or gas–liquid–solid separation and does not focus on the handling of solid materials.
- Equipment for first-generation ethanol production. Despite included in 2GE processes are equipment with known technology.
- Equipment used between the stages of harvesting biomass and storing it in bales to be fed in industrial units.
- Equipment used after de-baling, for continuous biomass feeding in industrial plants and
- Miscellaneous equipment and materials: all those not classified above.



© Questel 2021

Fig. 5 First application year (151 patents application).



© Questel 2021

Fig. 6 IPC sessions cluster (151 patents application).

Equipment Types	Patents
Pellets/briquets/boilers	22
Liquid-solid/gas-liquid-solid	13
First generation Ethanol (1EG)	15
Harvesting – de-baling	15
Continuous feeding	11
Miscellaneous equipment and materials	75
Total	151

Among Miscellaneous equipment and materials, a wide variety of patents have been found from straws made from biodegradable materials to patents dealing with applying other materials (metals, plastics) in processes involving biomasses. It was also be found complete sets for processing plants, fans,

solvent extraction columns, gasifiers, pneumatic systems, among many others. Whenever the patent referred to equipment, energy, and biomass, the methodology selected it. Only in the qualitative selection, it was possible to identify them. More than half of the 151 final patents are related to different equipment and materials, with no focus on the biomass feeding process.

The other 5 classifications show a balanced division among them, indicating no targeting for biomass feeding systems. Some patents dealt with pellets or briquets production for burning in boilers, and others dealt with liquid-solid or gas-liquid-solid separation equipment — no focus on handling solid materials.

Almost 10% of patents dealt with equipment used in the 1G ethanol production. Although some 2GE plants have been installed into the 1G plants, the equipment for handling and feeding biomass must have different construction characteris-

tics since raw materials are also different. Except for the 2GE Raizen plant installed in Brazil: the only one that uses sugarcane bagasse as raw material.

There were also patents (10%) that dealt with biomass harvesting and transportation equipment. These are significant developments, as they work with the specific types of biomass used in plants but do not require continuous operation. The purpose of this equipment is to collect and transport material for storage. Any interruptions due to clogging, or even a drop by transportation rate, do not result in any production loss.

The equipment that works from unpacking to the entry of physical-chemical processing units is essential to ensure the constant pace of raw material feeding in industrial plants [19]. Without a continuous, stable, and homogeneous supply, it is not possible to guarantee that process plants operate under the designed conditions. And if they were even able to optimize their operation to achieve optimum levels of energy or raw material consumption or even to attain industrial productivity expected in the project. These are the target equipment of this research. Those are feeders, conveyors, mills, sieves, and others that guarantee the separation of impurities, classification of size and shape, and stable feeding so that the pre-treatment stage can correctly feed all the following steps to convert biomass into bioproducts.

As a final result, in 63,226 patents, combining biomass in general with handling equipment and fuels, only 11 (0.017%) deal with this stage of the biorefinery process. A tiny number that may indicate that biomass feeding process for biorefineries is not receiving attention enough from equipment manufacturers.

“A current issue facing biorefineries is that a significant reliance has been put on vendor testing of equipment” [17]. Commercial-scale plants need to operate continuously and for long periods that cannot be simulated, either on a laboratory or on a pilot scale. As a result, the conditions under which materials are tested do not reveal the real conditions of continuous operations. To properly transfer the tests developed on smaller scales to commercial scale, in addition to several physical-chemical tests, the replication of storage and operating conditions is required. Large investments in test facilities would be required, which are hardly financed by equipment suppliers alone. The trend is to take advantage of existing equipment designed for “similar” materials and test them on a commercial scale, over time, just as it did for decades with wood chips, tobacco, and grains [17].

4. Conclusions

Considering patent documents as one of the most important open sources to reveal development of new technologies and to identify technological trends, the main objective of this paper was to identify whether the attentions of equipment manufacturers, inventors and patents assignees, who dealt with the industrial use of biomass, had been directed to feed specific types of biomass into industrial facilities to produce bioproduct, as cellulosic ethanol.

The huge difference between the number of patents dealing with the industrial use of biomass in general (63,226) and the tiny number of patents (151) dealing with industrial equipment projects for different types of biomass, suggests that biomass handling and feeding systems had not been seen as an

important issue in the development of biorefineries. Mainly, considering that only 11, among the 151 patents selected at the end of the research, deal with equipment design to feed biomass into industrial units. All of them should contribute with the knowledge to be accumulated to handle this new type of industrial raw material. But they do not form enough critical mass to solve the problems that biorefineries have been facing.

The absence of a significant number of patents does not state, per se, that there are not enough technologies to feed biomass stably into biorefineries. But if they are not in patents, where are they? And, if they exist, why are biorefineries failing to solve these problems?

The challenges to improve biochemical conversion processes from biomass into bioproducts present a much greater degree of complexity and should continue to dominate technology developers' concerns. However, suppose biomass feeding systems do not keep up with these developments. In that case, biorefineries will be at the risk of solving the most complex problems and being prevented from running because they have underestimated technologically more straightforward issues, such as biomass feeding.

Continuous process plants for chemical conversion needs the guarantee of stable raw material feeding that enables them to operate for more extended periods. And it is this continuous operation that will allow the stabilization of their different unitary processes. Without stable feed, it will not be possible to define technology maturity degrees of biomass conversion technologies, energy consumption, or even the plant's effective productivity.

Biomass feeding systems can be the weakest link in the biorefineries production chain. It needs to be solved together with other vital issues such as the drop of enzyme prices, the development of new yeasts, and pretreatment systems' optimization.

This study focused on the stages of industrial handling and feeding of specific types of biomass used in the six 2GE production plants installed between 2013 and 2016 and opened the way for new studies involving other types of biomass and different phases of the operational process.

CRedit authorship contribution statement

Carlos Eduardo Fernandes Corrêa: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft. **Daniel de C.L. e Penalva Santos:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft. **José Vitor Bomtempo:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision. **Flavia Chaves Alves:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision. **Cristina Gomes Souza:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision. **Ronney A. Mancebo Boloy:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- [1] S.J. Bennett, P.J.G. Pearson, From petrochemical complexes to biorefineries? The past and prospective co-evolution of liquid fuels and chemicals production in the UK, *Chem. Eng. Res. Des.* 7 (2009) 1120–1139, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.02.008>.
- [2] O.R. Calderon, V. Arantes, *A review on commercial – scale high – value products that can be produced alongside cellulosic ethanol*, *Biotechnol. Biofuels* (2019), ISBN 1306801915291.
- [3] J. Philp, The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers, *N. Biotechnol.* 40 (2018) 11–19, <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.04.004>.
- [4] M.B. Viswanathan, *Technoeconomic analysis of fermentative-catalytic biorefineries : model improvement and rules of thumb*, Iowa State University, 2015.
- [5] F. Calise, M. Vicidomini, M. Costa, Q. Wang, P.A. Østergaard, N. Duić, Toward an efficient and sustainable use of energy in industries and cities, *Energies* 12 (2019) 1–28, <https://doi.org/10.3390/en12163150>.
- [6] F. Cherubini, The biorefinery concept : Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals, *Energy Convers. Manag.* 51 (2010) 1412–1421, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.
- [7] R. Gustafsson, O. Kuusi, M. Meyer, Examining open-endedness of expectations in emerging technological fields: The case of cellulosic ethanol, *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 91 (2015) 179–193, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.02.008>.
- [8] Carlos Ricardo Socol, Satinder Krau Brar, C.R.L.P. Fauds, *Green Fuels Technology: biofuels*, Springer, Curitiba, Brazil; Québec, Canada; Marseille, France, 2016; ISBN 978319302034.
- [9] A. García, M.G. Alriols, J. Labidi, Evaluation of different lignocellulosic raw materials as potential alternative feedstocks in biorefinery processes, *Ind. Crop. Prod.* 53 (2014) 102–110, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.019>.
- [10] N. Akhtar, K. Gupta, D. Goyal, A. Goyal, Recent advances in pretreatment technologies for efficient hydrolysis of lignocellulosic biomass, *Environ. Progress Sustain. Energy* 35 (2016) 489–511, [doi:10.1002/ep](https://doi.org/10.1002/ep).
- [11] S. Kang, S. Selosse, N. Maži, Strategy of bioenergy development in the largest energy consumers of Asia (China, India, Japan and South Korea), *Energy Strateg. Rev.* 8 (2015) 56–65, <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2015.09.003>.
- [12] R.-C. E4tech, W. From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals 2015.
- [13] Violeta Sánchez Nogué, K. Karhumaa, Xylose fermentation as a challenge for commercialization of lignocellulosic fuels and chemicals, *Biotechnol. Lett.* (2014), <https://doi.org/10.1007/s10529-014-1756-2>.
- [14] K. Karimi, *Lignocellulose-Based Bioproducts*, Springer International Publishing, Switzerland, 2015, ISBN 978-3-319-14032-2.
- [15] Energy, U.S.D. of Bioenergy Technologies Office: Multi-Year Program Plan, 2016.
- [16] Y. Wang, S. Liu, Kinetic modeling of ethanol batch fermentation by *Escherichia coli* FBWHR using hot-water sugar maple wood extract hydrolyzate as substrate, *Energies* 7 (2014) 8411–8426, <https://doi.org/10.3390/en7128411>.
- [17] Energy, U.S.D. of Biorefinery Optimization Workshop Summary Report; Chicago, 2016.
- [18] B. Dale, A sober view of the difficulties in scaling cellulosic biofuels, *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 11 (2017) 5–7, <https://doi.org/10.1002/bbb>.
- [19] Biomass Research & Development The Bioeconomy Initiative: Implementation Framework 2018.
- [20] E.W. Merrow, K. Phillips, C.W. Myers, *Understanding Cost Growth and Performance Shortfalls in Pioneer Process Plants*; Santa Monica, CA, 1981.
- [21] Z. Abbas, L. Yong, Y. Li, R. Wang, Patent-based trend analysis for advanced thermal energy storage technologies and their applications, *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 5093–5116, <https://doi.org/10.1002/er.5148>.
- [22] J.O. Lanjouw, A. Mody, Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology 1, *Res. Policy* 25 (1996) 549–571, [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(95\)00853-5](https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00853-5).
- [23] T.J. Nameroff, R.J. Garant, M.B. Albert, Adoption of green chemistry: An analysis based on US patents, *Res. Policy* 33 (2004) 959–974, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.03.001>.
- [24] A. Gusakov, V Cellulases and hemicellulases in the 21st century race for cellulosic ethanol, *Biofuels* 4 (6) (2015) 567–569, <https://doi.org/10.4155/bfs.13.55>.
- [25] C.E. Wyman, Biomass ethanol: technical progress, opportunities, and commercial challenges, *Annu. Rev. Energy Environ.* 24 (1999) 189–226.
- [26] Leandro Vieira dos Santos, Maria Carolina de Barros Grassi, Jéssica Carolina Medina Gallardo, Renan Augusto Siqueira Pirrola, Luíge Llerena Calderón, Osmar Vaz de Carvalho-Neto, Lucas Salera Parreiras, Eduardo Leal Oliveira Camargo, G.A. G. Angela Drezza, Second-generation ethanol: the need is becoming a reality, *Ind. Biotechnol.* 12 (2016) 40–57, <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0017>.
- [27] Mary J. Bidy, C.K.C. Scarlata, Chemicals from Biomass : A Market Assessment of Bioproducts with Near-Term Potential, *Natl. Renew. Energy Lab. NREL*, 2016.
- [28] Laura J. Vimmerstedt, Ethan S. Warner, D. Stright, Effects of Deployment Investment on the Growth of the Biofuels Industry: 2016 Update National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [29] K. Sanford, G. Chotani, N. Danielson, J.A. Zahn, ScienceDirect Scaling up of renewable chemicals, *Curr. Opin. Biotechnol.* 38 (2016) 112–122, <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.01.008>.
- [30] Miguel Valdivia, Jose Luis Galan, Joaquina Laffarga, J.-L. Ramos, Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials, *Microb. Biotechnol.* 9 (2016) 585–594, <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>.
- [31] M. Padella, A. O'connell, M. Prussi, What is still limiting the deployment of cellulosic ethanol? Analysis of the current status of the sector, *Appl. Sci.* 9 (2019), <https://doi.org/10.3390/app9214523>.
- [32] J. Ellis, Poet awaits arbitration in \$33 million ethanol dispute Available online: <https://www.argusleader.com/story/news/2018/02/22/poet-awaits-arbitration-33-million-ethanol-dispute/361789002/> (accessed on Nov 8, 2019).
- [33] STORY, R.W. Andritz Inc. v. M&G Finanziaria S.R.L., *Biochemtex S. P.A.* 546 (2016) 1–13.
- [34] Ramos, C.S. Ida e vindas de um projeto inovador Available online: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2018/12/27/as-idas-e-vindas-de-um-projeto-inovador.ghtml> (accessed on Dec 14, 2019).
- [35] M. Dehghani Madvar, A. Aslani, M.H. Ahmadi, N.S. Karbalaie Ghomi, Current status and future forecasting of biofuels technology development, *Int. J. Energy Res.* 43 (2019) 1142–1160, <https://doi.org/10.1002/er.4344>.
- [36] C. Huang, A. Notten, N. Rasters, Nanoscience and technology publications and patents: A review of social science studies and search strategies, *J. Technol. Transf.* 36 (2011) 145–172, <https://doi.org/10.1007/s10961-009-9149-8>.
- [37] C.A. de Melo, M.P. da Silva, R. da Silva Benedito, Renewable energy technologies: patent counts and considerations for energy and climate policy in Brazil, *Clim. Dev.* (2020) 1–14, <https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1848778>.
- [38] INPI Busca de patentes Available online: <http://www.inpi.gov.br/menu-servicos/informacao/busca-de-patentes> (accessed on Apr 28, 2020).

- [39] A. Messeni Petruzzelli, D. Rotolo, V. Albino, Determinants of patent citations in biotechnology: An analysis of patent influence across the industrial and organizational boundaries, *Technol. Forecast. Soc. Change* 91 (2015) 208–221, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.02.018>.
- [40] Adelaide Maria de Souza Antunes, Viviane Masseran Antunes Parreiras, M. Cristina Quintela, N.M. Ribeiro, Métodos de prospecção tecnológica, inteligência competitiva e foresight: principais conceitos e técnicas, in: Coleção PROFNIT série Prospecção Tecnológica; Ribeiro, N.M., Ed.; IFBA: Salvador, 2018 ISBN 978-85-67562-24-7.
- [41] Questel Orbit Intelligence: business intelligence software Available online: <https://www.questel.com/business-intelligence-software/orbit-intelligence/> (accessed on Jun 2, 2021).
- [42] WIPO Guide to the International Patent Classification. World Intellectual Prop. Organ. 2018.
- [43] Questel Technology Domain Available online: <https://static.orbit.com/orbit/help/1.9.8/en/index.html#Documents/technologydomain.htm> (accessed on Jun 3, 2021).
- [44] EPE, E. de P.E. Balanço Energético Nacional Available online: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/RelatórioSíntese2018-ab2017vff.pdf> (accessed on Sep 23, 2019).
- [45] B.G. Martins, D.C.L.P. Santos, C.G. Souza, R.A.M. Boloy, R. G. Barbastefano, C.E.F. Corrêa, Technological Prospecting about the Biomass Use as a Source of Energy from the Bibliometric Analysis of Patents, in: Proceedings of the 5th CIEEMAT - Ibero-American Congress on Entrepreneurship, Energy, Environment and Technology; IPP - Instituto Politécnico de Bragança, 2019, pp. 331–337.
- [46] Z. Chen, J. Zhang, Types of patents and driving forces behind the patent growth in China, *Econ. Model.* 80 (2019) 294–302, <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.11.015>.
- [47] Y. Chen, B. Lin, Decomposition analysis of patenting in renewable energy technologies: From an extended LMDI approach perspective based on three Five-Year Plan periods in China, *J. Clean. Prod.* 269 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122402>.
- [48] C. Böhlinger, A. Cuntz, D. Harhoff, E. Asane-Otoo, The impact of the German feed-in tariff scheme on innovation: Evidence based on patent filings in renewable energy technologies, *Energy Econ.* 67 (2017) 545–553, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.09.001>.