

## **BLOCO: BIOCOMBUSTÍVEIS**

# QUAIS OS DESAFIOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO COM O USO DE BIOMASSAS LIGNOCELULÓSICAS

*Data de aceite: 02/06/2023*

**Carlos Eduardo Fernandes Corrêa**

Escola de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Daniel de C.L. Penalva Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

**Flavia Chaves Alves**

Escola de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro

**José Vitor Bomtempo**

Escola de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro

**ABSTRACT:** Using residual biomass to produce biofuels requires compliance with some conditions that have proven challenging for developing production processes based on renewable resources. The first second-generation ethanol (2GE) production units, implemented in the first decades of the 2000s, brought some warnings about obstacles that still need to be faced for the large-scale conversion of lignocellulosic residual biomass into biofuels. Even after years of research to develop technological packages, the first 2GE production plants could not operate continuously within

project conditions, generating a significant breach of expectations in the market. Based on information obtained from professionals who have experienced these plants, this work identified some challenges in using these new types of biomasses in projects, including technological discontinuities or the construction of pioneer plants. The results indicate that the lack of technological mastery for the use of lignocellulosic biomass may have been responsible for the relative operational failure of the pioneer 2GE production plants and that the use of these new types of raw materials should give rise to new strategies for developing innovations to produce advanced biofuels. The conclusions of the work suggest that filling this knowledge gap and understanding these new models and patterns can be fundamental to the success of the innovation processes necessary for the implementation of pioneer plants within the scope of the bioeconomy.

**KEYWORDS:** Biofuels, biorefineries, second-generation ethanol, pioneer plants, lignocellulosic biomass.

## 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 gerar 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 que despertou o interesse pela busca de fontes alternativas para geração de energia. A partir daí, grandes flutuações no preço do óleo somadas a especulações sobre sua escassez continuaram a estimular a busca por fontes alternativas de combustível. Mesmo a partir de 2008, com a reversão na tendência de crescimento dos preços do petróleo e a diminuição das especulações sobre sua escassez, as demandas pela substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis continuaram estimuladas por pressões sociais e regulatórias para a diminuição da carga de emissão de carbono na atmosfera (Calderon & Arantes, 2019). Com isso, um século depois do início da liderança do petróleo, o mundo caminharia para uma nova mudança em sua base energética.

Por ser o biocombustível mais utilizado no mundo, o etanol foi o candidato natural a ser a alternativa aos combustíveis derivados de petróleo, para veículos automotores leves. O etanol já vinha sendo fabricado, principalmente, a partir de matérias-primas à base de açúcar e amido (principalmente cana-de-açúcar e milho), mas com um volume de produção 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 e de questões ligadas ao manuseio e uso da terra, a introdução de novas fontes para produção de etanol se tornou fundamental para viabilizar o aumento de seu volume de produção. Um dos caminhos para esse aumento foi aberto com o desenvolvimento de inovações para produzir de etanol também a partir de biomassas lignocelulósicas residuais que, além de não competirem com a produção de alimentos, eram consideradas como abundantes e de baixo custo (Cherubini, 2010; Calderon & Arantes, 2019). O etanol que já era 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 vinham sendo desenvolvidas desde os anos 1970 e esbarravam tanto em aspectos técnicos quanto econômicos, até que seus estágios de desenvolvimento tecnológico levaram à construção da primeira planta pioneira de produção do E2G, na Itália, em 2013. Tal iniciativa foi seguida por duas outras plantas construídas no Brasil e três nos Estados Unidos (Calderon & Arantes, 2019). Entretanto, logo após a entrada em operação dessas plantas, dificuldades técnicas e operacionais impediram que elas conseguissem estabilizar sua produção. Poucos anos depois – já 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 (Calderon & Arantes, 2019).

A partir desse contexto, e da premissa que o crescimento do uso de biomassa em escala industrial faz parte dos processos de transição energética em curso nos últimos anos, esse artigo analisa os obstáculos operacionais enfrentados pelas plantas de produção do E2G e seus impactos potenciais em novos projetos de plantas inovadoras que venham a utilizar biomassas lignocelulósicas como matéria-prima.

## **2 . METODOLOGIA**

A investigação dos desafios da utilização de biomassas lignocelulósicas em plantas inovadoras, se deu a partir de uma revisão bibliográfica sobre o crescimento do uso do etanol como combustível, desde os anos 1970 até os dias atuais, visando conhecer o contexto sobre o qual as plantas pioneiras do E2G foram projetadas e construídas. As informações colhidas pela revisão bibliográfica foram combinadas com entrevistas realizadas com profissionais que participaram dos projetos dessas plantas (Corrêa, 2023) e com pesquisas de patentes sobre o desenvolvimento de equipamentos para manuseio e alimentação de biomassa em escalas industriais (Corrêa et. al, 2022).

As entrevistas foram realizadas tendo por base um questionário que buscou confrontar as expectativas das empresas no início dos projetos, com os desafios efetivamente enfrentados. 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 das plantas quanto nas buscas de solução para os problemas técnicos decorrentes. Além das entrevistas, foram visitadas plantas de produção de E2G e E1G, fábricas de equipamentos de movimentação de sólidos e uma planta de produção do setor de papel & celulose, assim como participação em congressos e workshops

relacionados à produção de etanol. A pesquisa de patentes buscou por pedidos de patentes relacionando tipos específicos de biomassa com equipamentos de movimentação, transporte e processamento de sólidos, visando encontrar conhecimento tecnológico que poderia ajudar na solução de parte dos problemas técnicos vividos pelas plantas pioneiras do E2G. As informações extraídas das fontes acima foram analisadas à luz de conceitos clássicos que tratam dos processos de inovação.

Esse confronto entre conceitos teóricos e experiências práticas visa discutir os modelos e padrões dos processos de inovação vividos pelas pioneiras do E2G, assim como suas abordagens frente aos desafios encontrados. Os resultados dessas análises tratam das possíveis consequências (positivas ou negativas) dessas estratégias e abordagens sobre os resultados dos projetos pioneiros do E2G e seus possíveis impactos sobre novos projetos que se utilizem de biomassas lignocelulósicas como matéria-prima.

### **3 . AS PLANTAS PIONEIRAS DE PRODUÇÃO DO E2G**

#### **3.1 Contexto histórico**

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 etapas.

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). 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).

Após os esforços dispendidos, ao redor do globo, no desenvolvimento tecnológico para converter biomassas lignocelulósicas em etanol, em 2013, a Beta Renewables (Itália) anunciou ter completado a construção da primeira planta comercial de produção de E2G, 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. Logo no ano seguinte, a segunda planta de produção do E2G foi anunciada pela POET-DSM Advanced Biofuels, uma *joint venture* entre Royal DSM (Holanda) e POET, LLC (EUA), em operação associada a uma planta tradicional de etanol de milho em Emmetsburg, Iowa, EUA com capacidade de produção de 94,5 milhões de litros de etanol por ano à base de palha de milho. A primeira planta de produção de E2G no hemisfério sul foi a da GranBio, projetada para produzir 82 milhões de litros de etanol por ano a partir da palha de cana-de-açúcar, que entrou em operação em setembro de 2014, em Alagoas. 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. 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. 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 (Calderon & Arantes, 2019; Novacana, 2016; Santos, 2023).

Entretanto, após aproximadamente um ano de operação, nenhuma das plantas pioneiras havia conseguido estabilizar sua produção nas condições de projeto, em função de diversos problemas operacionais. Alguns desses problemas já eram esperados, mas outros parecem não ter sido previstos. As dificuldades de manuseio e alimentação contínua de biomassa celulósica, por exemplo, parecem ter sido subestimadas. A maioria dos equipamentos dos sistemas que alimentavam as primeiras etapas de processo 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).

A primeira planta a encerrar suas operações foi a da Abengoa, ainda em 2016, depois de experimentar dificuldades financeiras. 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 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) – redução que seria revertida anos depois.

Problemas de estabilização em plantas industriais pioneiras com uso de biomassa não se restringiram aos casos do E2G. Outras biorrefinarias também enfrentaram 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 de melhor caracterização de materiais sólidos.

Apesar das expectativas iniciais para o desenvolvimento de plantas inovadoras a partir de biomassas lignocelulósicas terem sido positivas, sua realidade operacional se mostrou mais complexa, reforçando o papel da incerteza nos processos de inovação. Tanto mudanças nos aspectos macroeconômicos quanto no desenvolvimento tecnológico reforçam a necessidade de uma visão de longo prazo combinada com políticas consistentes, também de longo prazo, para lidar com períodos de progressos lentos e incertos (Furtado, Hekkert & Negro, 2020), como, em geral, se caracterizam os processos inovadores.

### **3.2 O que aconteceu com as plantas**

As entrevistas mostraram que as empresas que decidiram enfrentar os desafios 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. Todas eram oriundas dos setores de química, petroquímica e energia e todas 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. As empresas sabiam que as tecnologias a serem utilizadas em suas plantas pioneiras ainda não haviam sido comprovadas em nível industrial (o que indicava um nível de maturidade de TRL 7 ou 8). Mesmo assim, de maneira geral, optaram por tecnologias que fossem mais simples, de baixo custo e que pudessem ser 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.

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 quase sempre acontece em projetos inovadores, os projetos de engenharia sofreram diversas alterações ligadas aos processos de conversão, mas nesses casos, aconteceram com quantidade e frequência muito acima do esperado, na visão dos entrevistados. 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 startup dentro de uma faixa de tempo dentro das expectativas. O que não estava previsto foi, a partir daí, 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 significativas trocas de experiência ou de informações entre elas, as entrevistas apontaram para problemas operacionais bem semelhantes e, principalmente ligados ao manuseio da biomassa. Segundo as entrevistas, as empresas seguiram a estratégia de não compartilhar seus desafios prevendo uma competição por um mercado potencial de venda de tecnologia: a primeira empresa a ter sua tecnologia operando 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 os setores químico e petroquímico estão habituados. 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 nos projetos das plantas do E2G. 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. 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 plantas que se utilizarem dessas matérias-primas, poderão seguir 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.

### **3.3 As buscas por patentes**

O objetivo das buscas de patentes foi identificar se, fora do universo de conhecimento das operadoras do E2G, havia alguma tecnologia já desenvolvida e patenteada com projetos de equipamentos especialmente dimensionados para os tipos de biomassa lignocelulósicas utilizados nas plantas pioneiras do E2G.

As buscas foram realizadas em 2021, compreendendo uma janela de tempo entre 1970 e 2020 e encontraram 58.198 depósitos de patentes ligados ao uso de biomassas nos 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 todos as patentes depositadas sobre projetos de equipamentos para uso em biomassa tratavam dos tipos específicos usados nas plantas de E2G. O passo seguinte foi dirigir a busca para patentes que tratassem de equipamentos de movimentação e transporte de sólidos – excluindo, portanto, equipamentos tipicamente ligados aos processos de conversão da biomassa, como reatores, queimadores e outros equipamentos. Os resultados dessa etapa levaram a 171 patentes. Em uma última etapa, os conteúdos de todas as 171 patentes

foram lidos na íntegra, selecionando, por fim, apenas as que 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 sendo que, nenhuma das 4 trata de equipamentos projetados para um dos tipos específicos de biomassa usados em plantas do E2G. Todas consideravam que um mesmo projeto poderia manusear diferentes tipos de biomassa (Correa et al., 2022).

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 os projetos de equipamentos, até então conhecidos 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, pesquisas e estudos anteriores (DOE, 2016, Corrêa et al., 2022, Corrêa, 2023 & Corrêa et al., 2023) encontraram dados que indicam 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 fluídos, sendo apenas 13% dedicados a materiais sólidos. E mesmo entre estes 13%, 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. A potencial entrada, em grande escala, das biomassas lignocelulósicas residuais nos processos produtivos de fabricação de produtos e de geração de energia, 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.

Os desafios enfrentados pelas pioneiras do E2G com o uso de biomassas lignocelulósicas, além de levantar questões técnicas sobre seu manuseio, também devem

suscitar debates a respeito de suas consequências potenciais em outras indústrias que venham a se utilizar desse tipo de matéria-prima, com impactos sobre: estratégias de inovação das empresas; práticas de gerenciamento de projetos; expectativas sobre retorno dos investimentos; relação com fornecedores de equipamentos e importância das políticas públicas sobre o início dos investimentos privados em projetos inovadores (Corrêa et al., 2023).

#### 4 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

As empresas que projetaram e operaram as plantas pioneiras do E2G, parecem não ter antevisto que o manuseio e a alimentação das biomassas lignocelulósicas poderiam oferecer desafios técnicos que ainda não haviam sido 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 fermentação. Esse desnível tecnológico parece ter impedido que as plantas conseguissem operar continuamente. Os estudos que basearam esse artigo indicam, 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. Não considerar questões ligadas ao manuseio de matérias-primas sólidas entre as prioridades para desenvolvimentos tecnológicos, 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 revisto. 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 atenção sobre a importância do manuseio da biomassa dentro dos desafios tecnológicos que ainda precisam ser vencidos para o sucesso operacional de novas plantas pioneiras que venham a utilizar biomassas lignocelulósicas.

## 5 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

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.

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

CORRÊA, C.E.F., **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. Available from: <http://objdig.ufrj.br/61/teses/937878.pdf>

CORRÊA, C.E.F., SANTOS, D.d.C.L.P., BOMTEMPO, J.V. and ALVES, F.C. **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>

CORRÊA, C.E.F., SANTOS, D.d.C.L.P., BOMTEMPO, J.V. and ALVES, F.C. **The challenges of using lignocellulosic biomass in pioneer industrial plants**. Biofuels, Bioprod. Bioref. 2023.<https://doi.org/10.1002/bbb.2583>

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>.

DOE. **Bioenergy Research Centers** – An Overview of the Science. Feb. 2008. [genomicsgtl.energy.gov/centers/brcbrochure.pdf](http://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

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>

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.

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>.

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

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>

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](http://www.oecd.org/futures/bioeconomy/2030)

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

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>

SANTOS, D.C.J.P. 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>.

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