



ARTIGO 15

ESTRATÉGIA PARA O ECODSIGN DA PRODUÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA

DOI 10.47402/ed.ep.c202218331520

Renata de Araújo e Silva
Ana Iraidy Santa Brígida
Morsyleide de Freitas Rosa
Raimundo Marcelino da Silva Neto
Wilma Aparecida Spinosa
Ednaldo Benício de Sá Filho
Maria Cléa Brito de Figueirêdo

RESUMO

A celulose bacteriana (CB), obtida a partir da fermentação microbiana, é um produto com inúmeras aplicações e em pleno processo de desenvolvimento tecnológico, com inúmeras rotas de produção atualmente disponíveis em escala laboratorial. A integração sistemática de avaliações de desempenho ambiental nesse estágio inicial do desenvolvimento desses processos é importante para permitir escolhas e realizar melhorias que resultem em melhor desempenho ambiental desse produto quando produzido em escala industrial. Esse trabalho apresenta e aplica uma estratégia para o ecodesign da produção de CB, baseada na realização de duas ACVs para seleção de rotas e implementação de melhorias em rota específica. Parte-se da avaliação de três rotas alternativas de produção de CB (melaço de soja hidrolisado - MSH, melaço de soja diluído - MSD, suco de caju suplementado SCS) em comparação a uma rota de referência (meio sintético Hestrin&Schramm - HS), todas em escala laboratorial. Essa avaliação permitiu selecionar a rota MSH como mais promissora, assim como a troca de reagentes para redução de impactos. Em seguida, as rotas MSH e HS foram simuladas em escala industrial e novamente comparadas, reforçando o melhor desempenho da rota MSH. Os resultados obtidos nesse estudo permitiram indicar a rota MSH para implementação em planta piloto, assim como otimizar a estratégia de ecodesign originalmente proposta. Essa estratégia pode ser adaptada para inserção da avaliação ambiental no processo de desenvolvimento de outras tecnologias.

PALAVRAS-CHAVE: ecodesign; celulose bacteriana; ACV.

INTRODUÇÃO

O ecodesign traz a avaliação de desempenho ambiental para o processo de concepção e desenvolvimento tecnológico, antecipando possíveis impactos ambientais negativos e melhorando o desempenho ambiental de novas rotas e produtos. O ecodesign vem sendo promovido por instituições governamentais em todo o mundo, como a União Europeia com a Diretiva para o Ecodesign (EU, 2009), por gerar otimizações nos processos produtivos, melhorando a eficiência no uso dos recursos, reduzindo poluentes, e gerando novos produtos com menor impacto ambiental.



Nesse contexto, a celulose bacteriana (CB), obtida a partir da fermentação microbiana, é um exemplo de produto com processo de produção em investigação, visando ampliação de escala (JANG *et al.*, 2017). A produção de CB em escala piloto, a um custo acessível, é um desafio perseguido por equipes de pesquisa e desenvolvimento em todo mundo (GULLO *et al.*, 2017). Atualmente, o elevado custo do processo de produção de CB em meio estático, utilizando meio fermentativo sintético, inibe sua produção em escala industrial.

A diversidade de meios e sistemas de cultivo promissores para produção de CB requerem uma decisão sobre qual processo empregar para que os potenciais impactos ambientais da CB sejam menores ou pelo menos iguais aos de produtos similares. A realização de avaliações ambientais durante o processo de desenvolvimento tecnológico pode auxiliar a escolha sobre materiais e rotas de produção mais promissoras para investimentos em plantas piloto.

Esse trabalho apresenta e aplica uma estratégia para o ecodesign da produção de CB, baseada na realização de avaliação de ciclo de vida (ACV), para seleção de rotas e implementação de melhorias em rota específica em escala laboratorial e simuladas industrialmente. Os resultados da aplicação são empregados para otimização da estratégia de ecodesign de processos de produção de CB, podendo ser adaptada para o ecodesign de outras tecnologias em estágio inicial de desenvolvimento.

METODOLOGIA

ESTRATÉGIA PARA O ECODESIGN de processos de produção de CB

A estratégia proposta para o ecodesign de processos de produção de CB abrange a realização de avaliações técnicas e ambientais, na fase de experimentação do processo de desenvolvimento tecnológico. Inicialmente, são identificadas as rotas que produzem CB em quantidade e qualidade próxima à obtida por rota identificada como de referência por meio de revisão da literatura.

Identificadas as rotas de produção de CB em escala laboratorial, iniciam-se as avaliações ambientais comparativas dessas rotas com a de referência. Essas avaliações são baseadas nas normas NBR ISO 14040 (2014a) e 14044 (2014b) que estabelecem etapas e critérios de qualidade para estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV).

A primeira ACV proposta é baseada em inventários de processos de produção de CB testados em laboratório e é indicada para o caso de muitas rotas de produção terem sido



identificadas e precisarem serem selecionadas. A produção de CB pode ocorrer em diferentes meios de cultura, incluindo efluentes ricos em açúcares e disponíveis em diversas regiões, gerando-se muitas rotas de produção alternativas e o dilema sobre qual rota privilegiar para elevação da sua maturidade tecnológica. Assim, essa avaliação inicial tem como objetivo selecionar a rota tecnológica cujo desempenho ambiental seja significativamente melhor que o das demais rotas avaliadas, incluindo uma de referência, mais consolidada na literatura.

Para que a rota selecionada possa avançar no processo de desenvolvimento tecnológico ela precisa ser simulada em escala industrial, adaptando-se equipamentos e fontes de energia para a produção industrial. A definição de novos equipamentos costuma alterar o consumo energético e de água, além do tempo de produção (HETHERINGTON *et al.*, 2014; PICCINNO *et al.* 2016), modificando o desempenho ambiental das rotas avaliadas em escala laboratorial.

Assim, propõe-se realizar uma segunda ACV comparativa entre rotas, utilizando dados de inventário de uma planta simulada em escala industrial. Como na primeira avaliação, propõe-se que a segunda ACV também analise os pontos críticos da rota alternativa, modelada em escala industrial. É possível que outras etapas dessa rota, diferentes das apontadas na ACV 1, passem a ser relevantes nessa escala de produção, como apontado por Piccinno *et al.* (2016). Assim, essa análise permite a identificação de outros pontos críticos e novas investigações visando a melhoria de desempenho ambiental.

APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ECODESIGN

A estratégia de ecodesign foi aplicada na escolha de rotas tecnológicas em desenvolvimento nos laboratórios de Tecnologia da Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical e de Análise de Alimentos da Universidade Estadual de Londrina, no Brasil. De acordo com a literatura (ÇAKAR *et al.*, 2014), a rota mais utilizada de produção de CB, considerada referência nesse trabalho, foi a de produção em meio sintético Hestrin;Schramm (HS), composto por uma mistura de glicose, peptona, extrato de levedura, ácido cítrico e fosfato de sódio (HESTRIN; SCHRAMM, 1954).

As seguintes rotas foram investigadas: melaço de soja hidrolisado (MSH), melaço de soja diluído (MSD) e suco de caju suplementado (SCS). Além de utilizarem diferentes meios de cultivos, essas rotas diferem nos seguintes aspectos: tipo de bactéria, quantidade de inóculo, suplementação, tempo de cultivo, concentração de reagente e condições de secagem.



Objetivo e escopo das ACVs

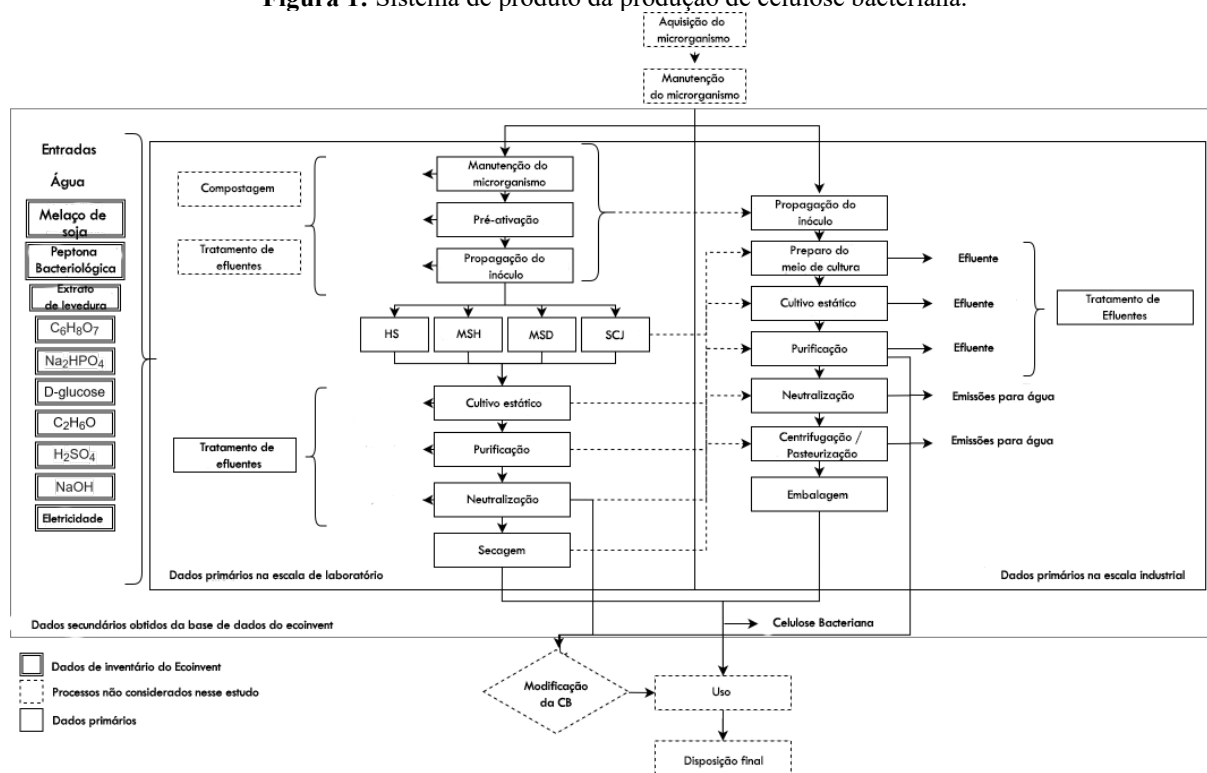
Na ACV 1 (escala laboratorial), foram comparadas as rotas alternativas MSH, MSD e SCS com a rota HS. Na ACV 2 (modelagem na escala industrial), a rota de menor impacto (selecionada na ACV 1) foi comparada com a rota de referência HS. Ambas ACVs (1 e 2) foram do berço ao portão, incluindo as etapas de extração de matérias-primas, produção de insumos e produção de CB. O transporte de insumos até a unidade de produção de CB foi desconsiderado nesse trabalho devido não haver estudos que mostrem a possível localização dessa unidade produtiva nesse nível de desenvolvimento da tecnologia.

A unidade funcional empregada na ACV 1 foi a produção de 1 g de CB, em 35 dias. Na ACV 2, a unidade funcional foi a produção de 1 kg de CB (80% de umidade), considerando 1 ano de produção.

Nas ACVs 1 e 2, as seguintes etapas de produção de CB foram consideradas: manutenção do microrganismo, pré-ativação, propagação do inóculo, preparo do meio de cultivo, cultivo estático, purificação, neutralização e secagem das películas, e tratamento de efluentes (Figura 1). A compostagem de resíduos sólidos foi realizada apenas na ACV 2, uma vez que a quantidade de resíduos sólido na escala laboratorial foi desprezível. O escopo das ACVs se diferenciou devido à: i) agregação na ACV2 das etapas de manutenção do microrganismo, pré-ativação e propagação do inóculo separadas na ACV1 e ii) consideração na ACV 2 da etapa de embalagem de CB em plástico laminado.



Figura 1: Sistema de produto da produção de celulose bacteriana.



Fonte: elaborada pelos autores.

Coleta de dados de inventário

Dados Primários

Na ACV 1, a quantificação dos insumos, efluentes e produção das rotas HS, SCS e MSH foi realizada entre 2016 e 2018. A descrição detalhada da produção de CB nas rotas HS e MSH está em (CHAGAS, 2018), na rota MSD em (GOMES, 2017) e na rota SCS, em (PINHEIRO, 2016).

Na ACV 2, a rota com menor impacto ambiental (identificada na ACV 1) e a rota de referência (HS) foram modeladas no software SuperPro Designer®, versão 10 (Intelligen Inc. - New Jersey, US). Os dados referentes as condições de fermentação para a produção de CB em escala laboratorial, relacionados a temperatura e tempo de reação, quantidade de insumos em cada etapa, e produção de CB por litro de meio de cultivo foram utilizados nessa modelagem. O projeto conceitual para o processo de produção em escala industrial de CB elaborado por Dourado *et al.* (2016) serviu como base para escolha da capacidade de produção da planta.



Dados secundários

Os inventários de produção do meio HS, produção do suco de caju, produção do suco de caju suplementado e produção do melão de soja foram construídos a partir de dados de literatura, assim como utilizando as bases de dados ecoinvent v.3.0 (WEIDEMA *et al.*, 2013) e Agri-footprint v. 1.0 (Blonk Agri-footprint BV 2014).

Os inventários do suco de caju suplementado e da rota SCS foram obtidos de Pinheiro *et al.* (2017). Já o inventário da produção agrícola de caju foi oriundo de Figueirêdo *et al.* (2016). Os inventários agrícola e de produção do melão de soja foram provenientes da base de dados do Agri-footprint v. 1.0 (Blonk Agri-footprint BV 2014). Os inventários relacionados à produção dos insumos utilizados nas rotas avaliadas, assim como tratamento de efluentes, foram obtidos na base de dados ecoinvent v.3.0 (WEIDEMA *et al.*, 2013).

Avaliação de impactos ambientais

Os métodos escolhidos para a avaliação de impactos nas ACVs 1 e 2 foram o ILCD 2011 Midpoint V1.05, considerando 7 categorias de impacto (mudança climática, acidificação do solo, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana câncer e não câncer, eutrofização de água doce e marinha) e AWARE V1.00 para a categoria de escassez hídrica. Essa avaliação foi realizada no software SimaPro® versão 9.0.0.35 (PRÉ-CONSULTANTS, 2019).

Análise de incerteza

O método de Monte Carlo foi utilizado para análise de incerteza na comparação entre rotas de produção de CB. Considerou-se que os dados de inventário possuem distribuição log-normal. O desvio padrão de cada dado de inventário foi calculado utilizando-se a matriz Pedegree (GOEDKOOOP *et al.*, 2013).

Na comparação entre duas rotas ou produtos (A e B), calculou-se quantas vezes o produto A apresentou menor impacto ambiental que B, avaliando-se o impacto de $A - B < 0$ em 1000 simulações (GOEDKOOOP *et al.*, 2016). Se $A - B < 0$ em pelo menos 95% das simulações, concluiu-se que A causou impacto significativamente menor que B.

RESULTADOS e DISCUSSÕES

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DE CB

Todas as rotas pré-selecionadas (MSH, MSD e SCS) foram consideradas tecnicamente viáveis por produzirem CB em quantidade e qualidade similares a CB oriunda da rota HS,

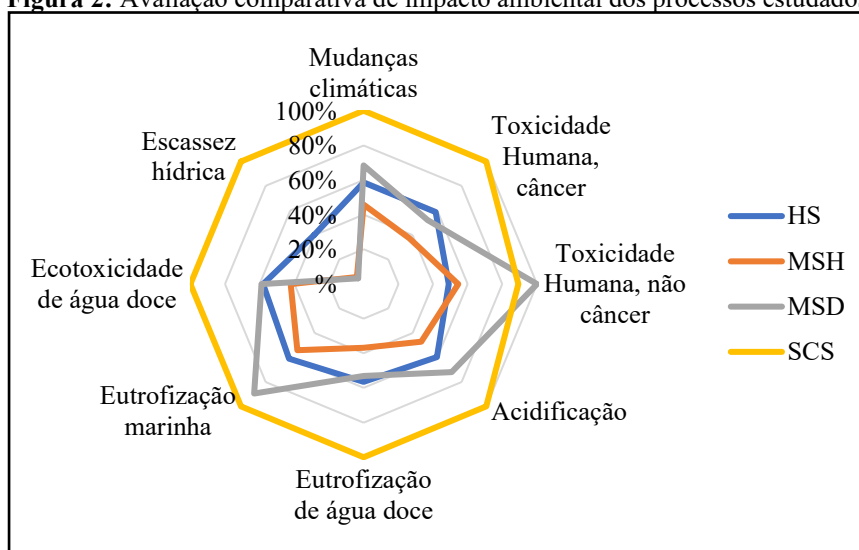


credenciando-as a aplicações típicas desse biopolímero natural (TROVATTI *et al.*, 2011; TSOUKO *et al.*, 2015).

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DAS ROTAS NA ESCALA LABORATORIAL (ACV 1)

Ao comparar as rotas de produção de CB, observa-se que a MSH é potencialmente a menos impactante em todas as categorias de impacto avaliadas, enquanto a SCS é a mais impactante (Figura 2). O maior impacto da rota SCS decorre principalmente do menor rendimento de CB obtida por volume de meio de cultivo utilizado (4.6 g L^{-1}). A rota MSH foi a que apresentou melhor rendimento em relação as demais (11.7 g L^{-1}).

Figura 2: Avaliação comparativa de impacto ambiental dos processos estudados.



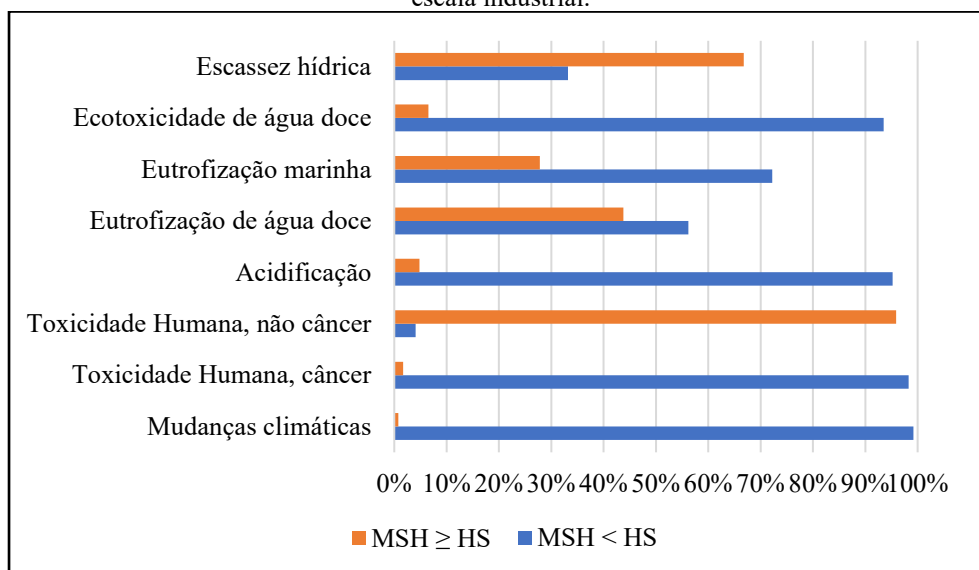
Fonte: Elaborada pelos autores.

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DAS ROTAS MODELADAS EM ESCALA INDUSTRIAL (ACV 2)

A comparação dos potenciais impactos ambientais decorrentes da produção de 1 kg de CB na rota MSH (selecionada na ACV 1) e na HS (referência), ambas simuladas em escala industrial, mostra que a rota MSH apresentou menor impacto ambiental significativo nas categorias mudanças climáticas e toxicidade humana câncer (Figura 3). A rota HS apresentou menor impacto ambiental significativo apenas para a categoria toxicidade humana não câncer, considerando um índice de confiança de 95%. Para as demais categorias não houve diferença significativa entre as rotas avaliadas.



Figura 3: Comparativo dos potenciais impactos ambientais da produção de 1 kg de CB na rota MSH e na HS em escala industrial.

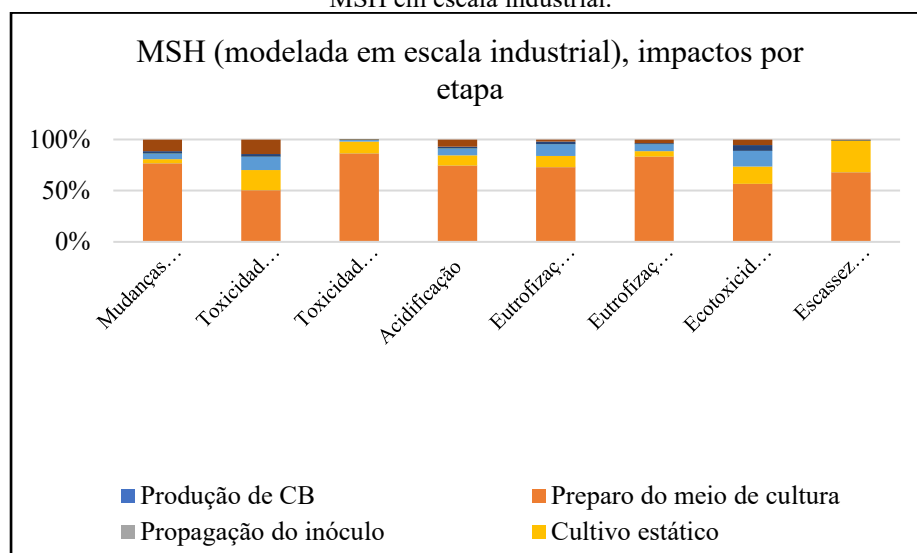


Fonte: Elaborada pelos autores.

Análise de pontos críticos e oportunidades de redução de impactos

Analisando a contribuição das etapas na rota MSH, observa-se que o preparo do meio de cultivo foi a etapa mais relevante em todas as categorias de impactos (Figura 4). Na avaliação de contribuição dos insumos, observou-se a importância do melão de soja, etanol e NaOH.

Figura 4: Contribuição das etapas do processo para os impactos ambientais da produção de 1kg de CB na rota MSH em escala industrial.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os impactos foram devidos principalmente ao melão de soja, com produção de soja afetando quase todas as categorias. Também se observou impactos devido ao etanol e ao hidróxido de sódio (NaOH), com maior contribuição de impacto na escassez hídrica. Com base



nesses resultados, avaliaram-se possibilidades de mudanças nos processos críticos junto à equipe de P, D;I.

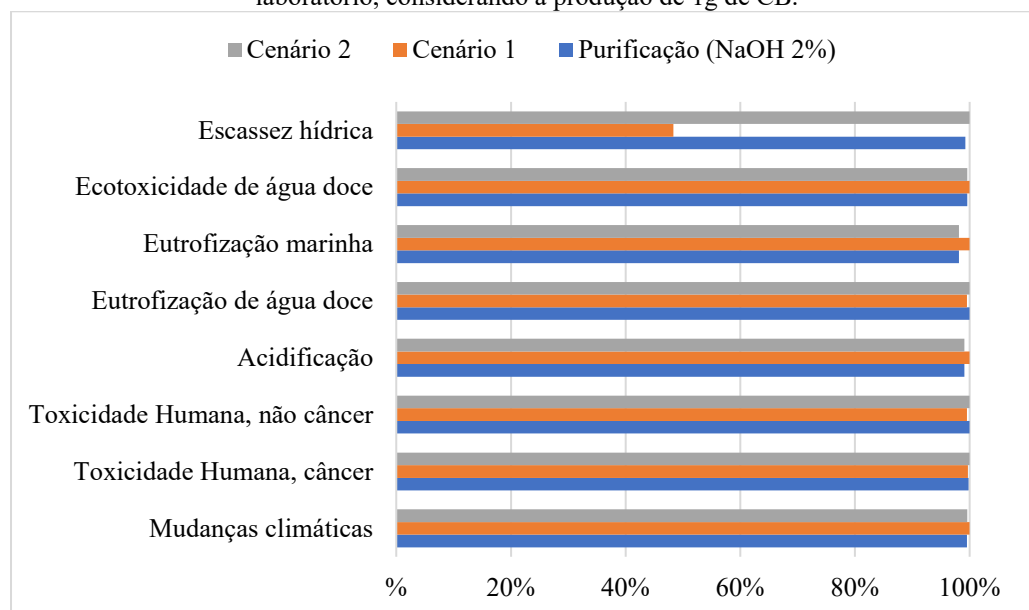
A quantidade de melaço de soja e o binômio tempo e temperatura já haviam sido otimizados em laboratório na rota MSH. Assim, não foi encontrada possibilidade de redução desse insumo na etapa de preparo do meio de cultivo.

Foram realizados experimentos em laboratório para avaliar a possibilidade de redução ou eliminação do etanol. Observou-se que sem a adição de etanol, ocorreu redução de aproximadamente 54% na produção de CB, assim, não houve possibilidade de redução desse insumo.

Por fim, investigou-se a possibilidade de troca do NaOH na etapa de purificação. Dois cenários foram propostos para a etapa de purificação por pesquisadores responsáveis pela experimentação: 1) substituição do NaOH 2% (v/v) por KOH na mesma concentração e quantidade e 2) inserção do H₂O₂ 1% (v/v) na primeira lavagem com NaOH 2% (v/v), a fim de diminuir a quantidade de lavagens básicas nas CBs.

Observou-se que o cenário 1 levou ao decréscimo de 50% do impacto na escassez hídrica. Embora tenha aumentado o impacto em outras categorias, a mudança foi insignificante. O cenário 2 não acarretou mudança nos impactos (Figura 5). Assim, a mudança de reagente proposta no cenário 1 foi implementada na rota MSH.

Figura 5: Análises de cenário da substituição de reagentes químicos no processo de purificação em escala de laboratório, considerando a produção de 1g de CB.



Fonte: Elaborada pelos autores.



PRINCIPAIS MUDANÇAS COM O ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO

O escalonamento da produção de CB do laboratório para a planta industrial alterou o consumo de água e energia, assim como a magnitude dos impactos em todas as categorias avaliadas da rota MSH. Além disso, alterou a identificação das etapas críticas. Os insumos mais impactantes se mantiveram em ambas as escalas de avaliação.

Com relação à energia, observou-se redução total de 79% na rota MSH. Essa redução ocorreu apesar do aumento de 100% do consumo nas etapas de neutralização (realizada manualmente em laboratório) e empacotamento (desconsiderado no laboratório). Os reatores empregados no preparo do meio de cultura foram responsáveis pela maior elevação do consumo de energia (94.32%) nessa rota. A redução no consumo total de energia com o escalonamento da produção foi também observado por Hetherington *et al.* (2014), Piccinno *et al.* (2018b) e Bartolozzi *et al.* (2019).

Com relação ao consumo de água, ocorreu aumento de 86% no volume total utilizado em MSH, quando se passou da escala laboratorial para a industrial. O alto consumo de água observado na etapa de neutralização mostra a necessidade de caracterização do efluente gerado e definição de tratamento que permita reuso da água nessa mesma etapa.

No que se refere a magnitude dos impactos, os valores dos impactos relacionados à produção de 1 kg de CB também diminuiram com a mudança de escala, em todas as categorias avaliadas. Piccinno *et al.* (2018b), avaliando a produção de nanocelulose, e Bartolozzi *et al.* (2019), a de nanoesponjas de celulose, também observaram redução significativa nos valores dos impactos quando compararam a produção em escala laboratorial com a simulada em escala piloto.

ANÁLISE DA ESTRATÉGIA DE ECODSIGN PROPOSTA

Analisando a estratégia de ecodesign proposta, aspectos positivos e oportunidades de simplificação afloram. Um aspecto positivo dessa estratégia foi a seleção de rota tecnológica na escala laboratorial. Essa ação reduziu substancialmente os recursos necessários nas próximas etapas, relacionadas ao estudo de mudanças em pontos críticos e modelagem em escala industrial. Além disso, a modelagem de processos em escala industrial é fundamental para identificação de etapas críticas, devido as mudanças principalmente relacionadas a maior eficiência do uso de energia e água na produção modelada em escala industrial, com redução da importância desses aspectos ambientais na avaliação de impactos. O escalonamento da



produção também permite a comparação da CB com celulose vegetal, amplamente utilizada na indústria de papel e celulose.

Uma questão que deve ser analisada nesse modelo é o elevado tempo e recursos tecnológicos demandados para relação de duas ACVs previstas nessa abordagem de ecodesign. Uma possibilidade para minimizar esse tempo é a utilização de abordagens simplificadas para comparação de rotas tecnológicas em escala laboratorial, utilizando ferramentas simplificadas de avaliação baseadas no pensamento de ciclo de vida, mas não na ACV tradicional, como proposta na abordagem de ecodesign desse trabalho (ACV1). Hung *et al.* (2018) propuseram uma estratégia para desenvolvimento de avaliação simplificada de ciclo de vida de tecnologias em estágio inicial de desenvolvimento. Entretanto, não foram identificadas ferramentas ágeis disponíveis, baseadas nessa estratégia, que pudessem ser empregadas na comparação de rotas para obtenção de CB ou de outros produtos em desenvolvimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou uma estratégia para o ecodesign da produção de CB baseada na realização de duas ACVs. Essa estratégia foi aplicada em estágio inicial do processo de desenvolvimento de rotas de produção de CB, considerando levantamentos realizados em escala laboratorial e simulados em escala industrial.

A primeira avaliação ambiental de rotas alternativas de produção de CB em comparação a rota sintética de referência mostrou que a rota MSH apresentou melhor desempenho ambiental na produção de CB em cultivo estático.

A modelagem das rotas MSH e HS em escala industrial permitiu uma segunda comparação de desempenho ambiental dessas rotas que reforçou o melhor desempenho da rota MSH. Observou-se que o escalonamento reduziu consideravelmente o consumo de energia e a magnitude dos impactos ambientais em todas as categorias avaliadas da rota MSH. Entretanto, ocorreu aumento do consumo de água na produção de CB.

Essas conclusões permitem indicar a rota MSH para produção em planta piloto. Para que o desenvolvimento de tecnologias de produção de CB ocorra com máximo desempenho ambiental, indica-se realizar ACV em escala de laboratório (TRL 4) para selecionar rota tecnológica menos impactante. Em seguida, deve-se modelar a melhor rota de laboratório em escala industrial para realização de nova ACV com o objetivo de identificar as etapas críticas, melhorando a eficiência no consumo de água e energia nessas etapas.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b. 46 p.

BARTOLOZZI, I.; *et al.* Life cycle assessment of emerging environmental technologies in the early stage of development: a case study on nanostructured materials. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 101-115, 2020.

BLONK AGRI-FOOTPRINT BV **Agri-Footprint, Part 2: description of data—version 1.0**. Gouda: Blonk Agri-footprint BV, 2014. 174 p.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

ÇAKAR, F.; *et al.* Improvement production of bacterial cellulose by semi-continuous process in molasses medium. **Carbohydrate Polymers**, v. 106, n. 1, p. 7–13, 2014.

DOURADO, F.; *et al.* Process modeling and techno-economic evaluation of an industrial bacterial nanocellulose fermentation process. **Bacterial Nanocellulose: From Biotechnology to Bio-Economy**, p. 199–214, 2016.

EUROPEAN COMMISSION, E ENVIRONMENT DIRECTORATE-GENERAL. **ECO-INNOVATION: The key to Europe's future competitiveness**. Publications Office, 2013. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/4155>

EUROPEAN UNION (2019) Brief on the use of Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate environmental impacts of the bioeconomy. European Commission. Disponível em: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109817/lca_brief_final_online.pdf.

EUROPEAN UNION (EU). Directive 2009/125/EC of the European parliament and of the council establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. European Union, 2009.

GOEDKOOP, M.; *et al.* **Introduction to LCA with SimaPro**. San Francisco, California: Pré-consultants, 2016. 80 p.

GULLO, M.; *et al.* Increased production of bacterial cellulose as starting point for scaled-up applications. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 101, p. 8115–8127, 2017.

HETHERINGTON A. C.; *et al.* Use of LCA as a development tool within early research: challenges and issues across different sectors. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 130–143, 2014.

HESTRIN, S.; SCHRAMM, M. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*. II. Preparation of freeze-dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose. **Biochemical Journal**, v. 58, n. 2, p. 345–352, 1954.



HUNG, C. R.; ELLINGSEN, L. A. W.; MAJEAU-BETTEZ, G. L: A framework for early-stage life cycle screening of emerging technologies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 26-37, 2018.

JANG, W. D., *et al.* Opinion Bacterial cellulose as an example product for sustainable production and consumption. **Microbial Biotechnology**, v. 10, p. 1181–1185, 2017.

PICCINNO, F.; *et al.* From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1085-1097, 2016.

PICCINNO, F.; *et al.* Eco-efficient process improvement at the early development stage: identifying environmental and economic process hotspots for synergetic improvement potential. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 10, p. 5959–5967, 2018a.

PICCINNO, F.; *et al.* Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: application of the life cycle assessment scale-up framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 283-295, 2018b.

TROVATTI, E.; *et al.* Gluconacetobacter sacchari: An efficient bacterial cellulose cell-factory. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, p. 1417–1420, 2011.

TSOUKO, E.; *et al.* Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, p. 14832–14849, 2015.

WEIDEMA, B. P.; *et al.* **Overview and methodology:** Data quality guideline for the ecoinvent database. 3 ed. St. Gallen: The Ecoinvent Centre, 2013. 169 p.