UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS

RENATA DE ARAÚJO E SILVA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA EM DIFERENTES MEIOS DE CULTIVO

FORTALEZA – CEARÁ
2019

RENATA DE ARAÚJO E SILVA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA EM DIFERENTES MEIOS DE CULTIVO

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Naturais. Área de concentração: Monitoramento de Recursos Naturais.

Orientador (a): Prof.ª Drª Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

FORTALEZA – CEARÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Silva, Renata de Araujo.
Avaliação do ciclo de vida da produção de celulose bacteriana em diferentes meios de cultivo [recurso eletrônico] / Renata de Araujo Silva. - 2018.
1 CD-ROM: il.; 4 ¾ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico com 98 folhas, acondicionado em caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Recursos Naturais, Fortaleza, 2018.
Área de concentração: Monitoramento de Recursos Naturais.
Orientação: Prof.ª Ph.D. Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

1. Avaliação de Impactos ambientais. . 2. Komagataeibacter xylinus. . 3. Meio de cultura alternativo. . I. Título.

RENATA DE ARAÚJO E SILVA

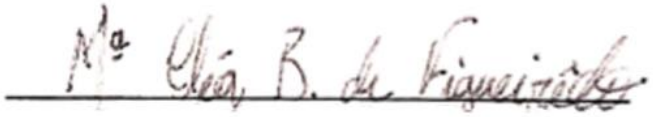
AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA EM DIFERENTES MEIOS DE CULTIVO

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Naturais. Área de concentração: Monitoramento de Recursos Naturais.

Orientador (a): Prof.ª Drª Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

Aprovada em: 14 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

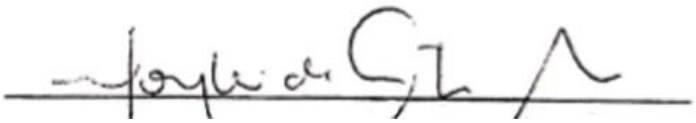


PhD Maria Cléa Brito de Figueirêdo (Orientadora)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

PhD Ana Iraidy Santa Brígida

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



PhD Morsyleide de Freitas Rosa

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por renovar a minha força nos momentos difíceis e assim me permitir concluir esta importante etapa da minha vida.

Aos meus amados pais, Roberto Vieira e Maria Vânia, e a minha irmã e cunhado, Roberta de Araújo e Júnior Freire, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até aqui. Dedico a eles esta e todas as demais conquistas da minha vida.

À minha orientadora Drª Maria Cléa Brito de Figueirêdo e minha co-orientadora (de coração) Drª Viviane da Silva Barros e aos membros da banca Drª Ana Iraidy Santa Brígida e Drª Morsyleide de Freitas Rosa pelo suporte, pelas correções, incentivos e confiança.

Aos professores Dr. Oriel Herrera Bonilla e Dr. Eliseu Marlônio Pereira de Lucena, por terem me auxiliado desde o início dessa jornada.

Aos meus amigos da ACV, do Mestrado Acadêmico em Ciências Naturais, do Laboratório de Microbiologia de Alimentos da Embrapa e do Laboratório de Tecnologia em Processos Ambientais do IFCE Maracanaú pelos ensinamentos, pelas risadas e por todos os momentos que compartilhamos.

À Universidade Estadual do Ceará, pelo espaço e pela capacitada equipe docente que possibilitou mais uma progressão na minha formação profissional.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Agroindústria Tropical, por ter proporcionado a oportunidade de fazer parte da sua equipe que muito contribuiu para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos Layanne Mesquita, Kueirislene Amâncio, Jorgiane Pires, Raissa Barroso, Rebecca Barreto, Larissa Saraiva, Gabriela Rodrigues, Ilana Magalhães, Eduarda Santos, que compartilharam momentos incríveis e me ajudaram a tornar essa jornada mais fácil e prazerosa.

“Não deixar que a vida passe em vão sem que eu possa errar também, sem que eu saiba o que fazer. Não deixar que a vida passe sem que eu possa enlouquecer.”

(Charlie Brown Jr.)

RESUMO

A celulose bacteriana (CB) sintetizada por algumas espécies de bactérias é um biopolímero com amplas possibilidades de aplicações. No entanto, o custo de produção deste biopolímero é elevado, principalmente devido ao uso de meios de cultura sintéticos. Nos últimos anos, tem sido buscada a redução dos custos do por meio do uso de meios de cultura alternativos desenvolvidos a partir de resíduos ou coprodutos agroindustriais. Entretanto, embora a produção de celulose via fermentação microbiana seja considerada sustentável por não envolver processos químicos complexos como os empregados na extração da celulose vegetal, não se sabe os impactos ambientais que podem estar associados ao processo. Portanto, inicialmente o objetivo desse estudo foi apresentar um levantamento sobre os recentes avanços referentes as rotas de produção de CB, contextualizando os principais aspectos e os potenciais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida desse produto, sendo apresentado na forma de um roteiro que serviu como base para a execução do estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de quatro rotas desenvolvidas em escala laboratorial para produção de CB, uma no meio sintético de referência Hestrin-Schramm (HS) e as outras três em meios alternativos, sendo duas rotas utilizando o melaço de soja (MS) como meio de cultura e a outra utilizando suco de caju suplementado. Diante disso, utilizou-se a metodologia de ACV, conforme as normas NBR ISO 14040 e 14044 para identificar os potenciais impactos ambientais das rotas de produção de CB desde a extração e produção dos insumos até a disponibilização do produto final no portão da unidade de produção. Os impactos ambientais identificados são relacionados a produção de 1g de CB por dia. Ao adotar essa unidade funcional foi possível comparar as quatro rotas e identificar qual delas apresenta melhor desempenho ambiental. As duas rotas de produção em MS foram identificadas como as melhores rotas em termos ambientais. Uma análise mais detalhada permitiu estabelecer que as etapas mais críticas dessas rotas são o preparo do meio de cultivo e o cultivo estático. Além disso, foram propostos os cenários de substituição da fonte de energia elétrica, substituição do meio HS por MS nas etapas de pré-ativação e ativação e a purificação com NaOH 2% e H_2O_2 1%. Essa análise revelou que os cenários propostos não levaram a melhorias ambientais nas rotas avaliadas.

Palavras-chave: Avaliação de Impactos ambientais. *Komagataeibacter xylinus*. Meio de cultura alternativo.

ABSTRACT

The bacterial cellulose (CB) synthesized by some species of bacteria is a biopolymer with wide possibilities of applications. However, the cost of producing this biopolymer is high, mainly due to the use of synthetic culture media. In recent years, variations in the process have been made through the use of alternative culture media developed from waste or agro-industrial co-products. However, although CB production is considered sustainable because it does not involve complex chemical processes such as those used in the extraction of vegetable cellulose, it is not known the environmental impacts that may be associated to the process. Therefore, initially the objective of this study was to present a survey about the recent advances regarding the production routes of CB, contextualizing the main aspects and the potential environmental impacts related to the life cycle of this product, being presented in the form of a roadmap that served as base for the execution of the Life Cycle Assessment (LCA) study of four routes developed in laboratory scale for CB production, one in the synthetic medium of reference (HS) and the other three in alternative means, two routes using molasses of soybean (DM) as culture medium and the other using cashew juice supplemented. Therefore, the LCA methodology was used, in accordance with NBR ISO 14040 and 14044 standards, to identify the potential environmental impacts of CB production routes from the extraction and production of the inputs to the final product at the gate of the production unit. The identified environmental impacts are related to the production of 1g CB per day. By adopting this functional unit it was possible to compare the four routes and to identify which one presents better environmental performance. The two production routes in MS were identified as the best routes in environmental terms. A more detailed analysis allowed to establish that the most critical stages of these routes are the preparation of the culture medium and the static culture. In addition, the scenarios of substitution of the electric energy source, replacement of the HS medium by MS in the preactivation and activation stages and purification with 2% NaOH and 1% H2O2 were proposed.

Keywords: Environmental Impact Assessment. *Komagataeibacter xylinus*. Alternative culture medium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de um estudo de ACV..... 27

Quadro 1 – Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo..... 22

ARTIGO SUBMETIDO 1

Figura 1 – Sistema de produto genérico para a produção de celulose bacteriana..... 44

Quadro 1 – Artigos selecionados e revisados de acordo com os critérios da revisão sistemática..... 41

Quadro 2 – Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo..... 45

Quadro 3 – Produção de CB..... 47

Quadro 4 – Categorias de impactos e principais aspectos relacionados..... 50

ARTIGO 2

Figura 1 – Sistema de produto genérico para a produção de celulose bacteriana..... 61

Quadro 1 – Descrição da produção de CB em diferentes meios de cultivo..... 63

Tabela 1 – Inventário da rota HS para 1g/dia..... 64

Tabela 2 – Inventário da rota MSD para 1g/dia..... 67

Tabela 3 – Inventário da rota MSH para 1g/dia..... 68

Tabela 4 – Inventário da rota SCS para 1g/dia..... 69

Tabela 5 – Fontes secundárias do estudo..... 70

Figura 2 – Comparação dos impactos ambientais das rotas em estudo..... 73

Figura 3 – Análise do cenário de substituição do açúcar na rota MSD..... 74

Figura 4 – Análise do cenário de substituição do açúcar na rota MSH..... 74

Figura 5 – Análise de incerteza das rotas MSD e HS..... 75

Figura 6 – Análise de incerteza das rotas MSH e HS..... 76

Figura 7 – Análise de incerteza das rotas SCS e HS..... 77
Figura 8 – Análise de incerteza das rotas MSD e MSH..... 78
Figura 9 – Contribuição dos processos unitários para os impactos ambientais da produção de 1g/dia de CB em melaço de soja diluído, em escala de laboratório..... 79
Figura 10 – Contribuição dos processos unitários para os impactos ambientais da produção de 1g/dia de CB em melaço de soja hidrolisado, em escala de laboratório..... 81
Figura 11 – Comparação da rota MSD com o mix de energia brasileiro e energia solar..... 82
Figura 12 – Comparação da rota MSH com o mix de energia brasileiro e energia solar..... 83
Figura 13 – Comparação da rota MSD com as etapas de pré-ativação e ativação em meio HS e em meio a base de melaço de soja..... 84
Figura 14 – Comparação da rota MSH com as etapas de pré-ativação e ativação em meio HS e em meio a base de melaço de soja..... 84
Figura 15 – Comparação da rota MSD com etapa de purificação com NaOH 2% e com NaOH 2% + H_2O_2 1%..... 85
Figura 16 – Comparação da rota MSH com etapa de purificação com NaOH 2% e com NaOH 2% + H_2O_2 1%..... 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de impactos de ciclo de vida
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB	Celulose Bacteriana
HS	Hestrin & Schramm
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IMCOPA	Importação, Exportação e Indústria de Óleos S.A. Araucária
ISO	Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico
RCP	Regras de Categoria de Produto
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)
SICV	Brasil Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 16

2.1 GERAL 16

2.2 ESPECÍFICOS 16

3 REVISÃO DE LITERATURA 17

3.1 CELULOSE BACTERIANA 17

3.1.1 Propriedades e aplicações 17

3.1.2 Produção de celulose bacteriana 19

3.1.3 Meios alternativos para a produção de CB 20

3.1.3.1 O melaço de soja 25

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 26

3.2.1 Objetivo e escopo 27

3.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV) 28

3.2.3 Avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) 28

3.2.4 Interpretação de um estudo de ACV 29

3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida de polímeros de origem natural 29

3.2.6 Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de Celulose Bacteriana 31

4 RESULTADOS 32

4.1 ARTIGO SUBMETIDO 1 32

4.1.1 Introdução 34

4.1.2 Fundamentação teórica 36

4.1.2.1 Celulose bacteriana 36

4.1.2.2 Avaliação do ciclo de vida 38

4.1.3 Métodos de pesquisa 40

4.1.4 Análise e discussão dos resultados 41
4.1.4.1 Objetivo e escopo 41
4.1.4.2 Inventário 46
4.1.4.3 Avaliação de impactos do ciclo de vida 49
4.1.4.4 Interpretação 50
4.1.5 Considerações finais 51
4.2 ARTIGO 2 58
4.2.1 Introdução 59
4.2.2 Metodologia 60
4.2.2.1 Objetivo, unidade funcional e fronteiras do sistema 60
4.2.2.2 Descrição das rotas de produção de CB em diferentes meios de cultivo 61
4.2.3 Coleta de dados de inventário 65
4.2.3.1 Dados primários 65
4.2.3.2 Dados secundários 70
4.2.3.3 Alocação 70
4.2.4 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida 71
4.2.4.1 Análise de erro ou incerteza 71
4.2.4.2 Análise de sensibilidade 72
4.2.4.3 Análise de cenários 72
4.2.5 Resultados e discussão 72
4.2.5.1 Análise comparativa das rotas para obtenção de CB 72
4.2.5.2 Análise de sensibilidade 73
4.2.5.3 Análises de incerteza 74
4.2.5.3.1 Análise das rotas em MSD e HS (referência) 75
4.2.5.3.2 Análise das rotas em MSH e HS (referência) 75
4.2.5.3.3 Análise das rotas SCS e HS (referência) 76

4.2.5.3.4 Análise das rotas MSD e MSH 77
4.2.5.4 Análise de processos críticos nas rotas menos impactantes 78
4.2.5.4.1 Análise da rota MSD 78
4.2.5.4.2 *Análise da rota MSH* 80
4.2.5.5 Análise de cenários 81
4.2.5.5.1 Energia solar 82
4.2.5.5.2 Pré-ativação e ativação do microrganismo em meio a base de melaço de soja ... 83
4.2.5.5.3 Purificação com NaOH 2% e H_2O_2 1% 85
4.2.6 Conclusão 86
REFERÊNCIAS 89

1 INTRODUÇÃO

A celulose bacteriana (CB) é um polissacarídeo extracelular sintetizada por algumas espécies de bactérias que desde sua descoberta tem se mostrado como um biopolímero com amplas possibilidades de aplicações, principalmente devido a características como a biodegradabilidade, pureza e biocompatibilidade que permitem sua aplicação em diversas áreas (KESHK, 2014).

Na última década vários estudos têm demonstrado o potencial da aplicação da CB em diversas áreas, como na indústria de cosméticos (BOONME; AMNUAIKIT; CHUSUIT, 2011), no desenvolvimento de componentes eletrônicos (LEGNANI et al., 2008), na área ambiental para o tratamento de resíduos (CHEN et al., 2009), além da área biomédica que é apontada como a mais promissora. Alguns exemplos de biomateriais desenvolvidos a partir de CB para uso nessa área são os curativos bioativos, implantes orais e implantes cardiovasculares (BARUD et al., 2016).

Entretanto, alguns gargalos estão relacionados a produção de celulose bacteriana em larga escala, como o alto custo dos meios de cultivo e os baixos rendimentos obtidos nos sistemas de cultivo. Assim, diversos meios de cultivo vêm sendo propostos e avaliados tecnicamente. Vários autores (CARREIRA et al., 2011; JOZALA et al., 2014; LESTARI et al., 2014) vem apostando que uma alternativa viável tanto economicamente quanto ambientalmente para a produção de celulose bacteriana com o uso de resíduos agroindustriais ou coprodutos como substrato para a fermentação, uma vez que estes contêm fontes de carbono e nitrogênio que podem ser utilizadas para produção de CB.

O melaço de soja, um coproduto obtido durante o processamento da soja para fabricação de farelo e óleo, começou a ser utilizado como substrato na fermentação microbiana para produção de CB por ser uma das fontes de carbono econômica e que tem rendimento comparável ao da produção com o meio HS, por exemplo (CHAGAS, 2018; GOMES, 2017). Embora o uso de resíduos agroindustriais ou coprodutos, como o melaço de soja tenha se mostrado como um meio viável para a produção de CB, ainda não há artigos científicos publicados sobre a avaliação ambiental do processo de produção de CB em meios alternativos, como o melaço de soja.

Diante da relevância deste biomaterial para o cenário atual e a perspectiva de crescimento da demanda do mesmo, o presente estudo teve como objetivo avaliar o processo de produção de CB em meios à base de melaço de soja em escala laboratorial, para identificar as etapas críticas do processo, além de compará-los com os processos de produção no meio

convencional HS e em suco de caju suplementado, através da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Esse conhecimento permitirá a identificação de opções com melhor desempenho ambiental, assim como oportunidades de melhoria no processo, que auxiliarão nas tomadas de decisões relacionadas a prototipagem do processo dando base para os estudos de escalonamento de produção.

Por fim, é importante ressaltar que a ACV é uma ferramenta que permite estimar os potenciais impactos do processo e que os resultados e conclusão são aplicáveis apenas para os processos avaliados e em escala laboratorial. Além disso, a substituição dos dados secundários como por exemplo o da energia elétrica pode alterar os resultados da avaliação de impacto, uma vez que esses dados representam a matriz energética de países específicos que não deve ser aplicada para países com matriz energética diferente.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar o desempenho ambiental da celulose bacteriana (CB) produzida em diferentes meios de cultivo, utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

2.2 ESPECÍFICOS

a) identificar as principais rotas de produção de CB e os impactos ambientais potenciais associados, por meio de revisão da literatura;
b) inventariar e avaliar os impactos de dois processos de obtenção de CB a partir de meio à base de melaço de soja;
c) comparar os impactos ambientais da produção de CB usando melaço de soja com a produção utilizando os meios HS e suco de caju;
d) analisar os principais desafios do escalonamento do processo com menor impacto ambiental.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CELULOSE BACTERIANA

A celulose é um polímero de fórmula molecular $C_6H_{10}O_5$ (n) considerado como o composto orgânico mais abundante na natureza e produzido por diversos organismos, como plantas, algumas espécies de bactérias, e em menores proporções, em fungos (*Saprolegnia*), algas (*Valonia*) e animais marinhos (tunicados) (KLEMM *et al*., 2001; LAVOINE *et al*., 2012; TYAGI; SURESH, 2013).

O estudo de Brown (1886) foi o primeiro a relatar a presença de uma membrana gelatinosa crescendo ocasionalmente sobre a superfície de um caldo de fermentação de vinagre com bactérias acéticas (BROWN, 1886). Sabe-se agora que essa membrana gelatinosa é, na verdade, celulose sintetizada como parte do metabolismo normal de várias espécies de bactérias dos gêneros *Agrobacterium*, *Aerobacter*, *Achromobacter*, *Azotobacter*, *Salmonella*, *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Sarcina*, *Komagataeibacter* (anteriormente *Gluconacetobacter*) e *Gluconacetobacter* (anteriormente *Acetobacter*) (CAMPANO *et al*., 2016; SHODA; SUGANO, 2005).

O papel da celulose bacteriana (CB) no meio ambiente ainda não é totalmente compreendido. Entretanto, acredita-se que ela seja responsável por manter a bactéria em um ambiente aeróbio, além de facilitar as interações entre hospedeiro e bactéria e conferir proteção fisiológica ao microrganismo contra o estresse ambiental causado pela radiação ultravioleta ou dessecamento (AUGIMERI; VARLEY; STRAP, 2015; KLEMM et al., 2001; RÖMLING; GALPERIN, 2015).

3.1.1 Propriedades e aplicações

As bactérias do gênero *Komagataeibacter* sintetizam celulose de forma quimicamente pura, diferentemente da celulose extraída de plantas que é associada à lignina, hemicelulose e outras substâncias. Além da natureza pura da CB, destacam-se: a alta cristalinidade, a forte resistência mecânica e à tração, a nanoestrutura única, o elevado grau de polimerização, a alta capacidade de retenção de água e insolubilidade, a biodegradabilidade e biocompatibilidade (CAMPANO *et al*., 2016; CHENG *et al*., 2017; DONINI *et al*., 2010). Estas propriedades tornam a CB um biomaterial com amplas possibilidades de aplicações (KESHK, 2014).

O uso mais conhecido da CB é na indústria alimentícia para a produção de nata de coco, nata de abacaxi e chá de kombucha (GALLEGOS *et al*., 2016) ou ainda como agente espessante, estabilizante ou gelificante (PAXIMADA *et al*., 2016). Outros usos potenciais vêm sendo investigados atualmente para a CB nas áreas de:

a) cosmética: as fibras de CB são utilizadas como estabilizante de emulsões óleo-em-água (O / W) (PAXIMADA *et al*., 2016), para a produção de máscaras faciais (BOONME; AMNUAIKIT; CHUSUIT, 2011), esfoliantes (HASAN; BIAK; KAMARUDIN, 2012) e formulações cosméticas (NYMPHEAS INTERNATIONAL CORP., 2015);
b) eletrônica: a CB é aplicada na preparação de películas opticamente transparentes (LEGNANI *et al*., 2008);
c) tratamento de efluentes: utilizada no tratamento de resíduos e efluentes (CHEN *et al*., 2009; REZAEE *et al*., 2005);
d) biomédica: a CB também vem sendo empregada na área biomédica devido as suas propriedades de elasticidade, transparência, capacidade de retenção de água, porosidade e, principalmente, biocompatibilidade. Essas propriedades vêm sendo investigadas para o desenvolvimento de curativos bioativos (QIU *et al*., 2016), pele artificial (BIO FILL PRODUTOS BIOTECHNOLOGICOS S.A, 1990), como suporte para engenharia de tecidos (WANG *et al*., 2018), vasos sanguíneos artificiais (KLEMM *et al*., 2001) e para a administração de fármacos (TROVATTI *et al*., 2012).

Kwak e colaboradores (2015) investigaram o efeito terapêutico das membranas de CB em feridas causadas por queimaduras em pele de ratos com base nas propriedades físico-químicas e de toxicidade. Os resultados mostraram que as membranas de celulose promoveram uma melhora significativa dos sintomas da ferida, na reconstituição do epitélio e na angiogênese sem apresentar efeitos tóxicos.

Cavalcanti e colaboradores (2017) verificaram que curativos de CB podem ser eficazes no tratamento de úlceras venosas de membros inferiores. Os curativos de CB utilizados nesse estudo foram produzidos a partir do melaço de cana-de-açúcar, que possui natureza renovável e baixo custo.

Alguns produtos desenvolvidos a partir de CB já estão disponíveis comercialmente. Dentre esses produtos, pode-se destacar os curativos para feridas Nexfill®, Biofill®, BioProcess® (Fibrocel Produtos Biotechnológicos - Brasil), Bionext® (Bionext Produtos

Biotecnológicos), Securian® (Xylos - USA), Suprasorb® (Lohmann & Rauscher - Alemanha), DermaFill™ (Cellulose Solutions – USA), o implante vascular artificial BASYC® (POLYMET Jena - Alemanha), e o implante dentário Gengiflex® (Fibrocel Produtos Biotechnológicos - Brasil) (CZAJA *et al*., 2007; LUDWICKA *et al.*, 2016).

3.1.2 Produção de celulose bacteriana

A produção de CB, bem como a sua composição, morfologia e propriedades estão diretamente relacionadas com as condições de cultivo, tais como o pH, a temperatura, a disponibilidade de oxigênio, o tempo de incubação, o tipo e tamanho do reator (área de superfície), o tipo de cultivo (estático ou agitado), o volume do inóculo, a cepa utilizada, a composição do meio de cultura e os tipos de suplementos utilizados (CAMPANO *et al*., 2016; RUKA; SIMON; DEAN, 2012).

Sabe-se que a redução do pH ao longo da fermentação é resultado do metabolismo respiratório das bactérias do gênero *Komagataeibacter* que oxidam etanol a ácido acético e convertem a glicose em ácido glucônico. Embora o pH ótimo para a produção de CB dependa da cepa utilizada, maiores rendimentos são observados quando o pH varia entre 4.0 e 6.0, uma vez que valores abaixo desse intervalo dificultam o crescimento da bactéria e levam a uma redução na produtividade de CB.

Da mesma forma, maiores rendimentos são obtidos quando a temperatura é mantida entre 28º e 30ºC. Çoban (2011) avaliou a influência de diferentes valores de pH e temperatura para a produção de CB em meio HS e em melaço de beterraba, observando que o rendimento foi maior em pH 6.5, para os dois meios de cultivos avaliados, e com a temperatura em 30ºC (CHAWLA *et al*., 2009; KONGRUANG, 2008).

Além do pH e da temperatura, a concentração de oxigênio dissolvido (OD) no meio de cultura e o tipo de cultivo também são fatores inter-relacionados que são fundamentais na produção de CB.

A produção de CB pode ser realizada em condições estática e agitada. No cultivo estático, há baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD). Assim, a síntese de CB ocorre na interface ar/meio de cultivo, proporcionando maior facilidade para separar e coletar a celulose produzida, uma vez que essa é produzida na superfície do meio de cultivo. Nessas condições, menos trabalho manual e monitorização são requeridas ao longo do tempo de fermentação. No entanto, o cultivo estático exige uma grande área de superfície e longo tempo de cultivo, que são fatores que podem limitar a produção em grande escala.

No cultivo agitado, o OD está presente em maiores concentrações, favorecendo a produção de ácido glucônico que, por sua vez, minimiza a produção de CB. No cultivo agitado, o tempo de fermentação é reduzido, porém esse tipo de cultivo favorece a conversão de células produtoras de celulose em mutantes não produtoras de celulose, por isso menos celulose é produzida. Outra desvantagem é que a CB produzida sob agitação apresenta-se na forma de pellet ou como um emaranhado de fibras que possuem baixa resistência mecânica, podendo limitar sua aplicação em algumas áreas (DONINI *et al.*, 2010; JUNG *et al*., 2010).

Além desses fatores, a composição do meio de cultura também pode limitar a produção de CB em larga escala e sua aplicação em algumas áreas. O meio de cultura mais utilizado é o meio HS, que é assim denominado por ter sido elaborado por Hestrin e Schramm (1954). O meio HS é composto por 20 g/L de glicose, 5 g/L de peptona, 5 g/L de extrato de levedura, 1,15 g/L ácido cítrico e 2,7 g/L de fosfato dissódico (Na_2HPO_4). O extrato de levedura e a peptona também são tradicionalmente utilizados como fontes de nitrogênio (JOZALA *et al*., 2016; JUNG *et al.*, 2010).

No que se refere as cepas utilizadas na produção de CB, as bactérias que apresentam as maiores taxas de produção de celulose pertencem ao gênero *Komagataeibacter* (anteriormente *Gluconacetobacter*) e a espécie *K. xylinus* tem sido considerada um organismo modelo nos estudos sobre genética e bioquímica dos microrganismos produtores de celulose. Além da *K. xylinus*, a maioria das cepas de *K. intermedius* e algumas cepas de *K. hansenii* e *K. europaeus* também sintetizam celulose (AUGIMERI; VARLEY; STRAP, 2015; KESTERS *et al*., 2006; PACHECO *et al*., 2004; RÖMLING; GALPERIN, 2015; SHODA; SUGANO, 2005).

3.1.3 Meios alternativos para a produção de CB

Embora o meio HS consiga suprir a demanda de nutrientes requeridas pelo microrganismo para sintetizar celulose com eficiência, o custo relativamente elevado deste pode limitar a produção industrial de CB. Pesquisas têm relatado que o meio de cultura e a fonte de carbono podem ser responsáveis por mais de 65% do total do custo de produção de CB. Essa problemática tem levado a uma intensa investigação sobre meios de cultivo no qual se tenha um bom rendimento e custo viável para que se possa alcançar uma produção mais barata em escala industrial (ver Quadro 1) (DONINI *et al.*, 2010; JOZALA *et al*., 2016; JUNG *et al*., 2010).

Nos últimos anos alguns resíduos agrícolas e industriais têm sido utilizados para desenvolver meios de cultura que favoreçam o aumento da produção de CB e, ao mesmo tempo,

reduzam os custos do processo. Além disso, outra vantagem de usar resíduos agrícolas ou industriais como meio de cultivo é que não só fornece uma redução dos custos de produção, mas também reduz os impactos ambientais causados pela deposição deste resíduo no ambiente (CACICEDO *et al*., 2016; FAN *et al*., 2016).

Quadro 1– Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo

(continua)

Substrato	Suplemento	Microrganismo	Período de incubação (dias)	Condição de crescimento	Rendimento em g/L	Referência
Extrato hidrolisado de alfarroba e feijão branco	Ácido cítrico e fosfato dissódico (Na_2HPO_4)	*K. xylinus* ATCC 700178	9	estático	1.8	Bilgi *et al*. (2016)
Melaço de cana hidrolisado	-	*K. xylinus* FC01	10	estático	1.0	Çakar *et al*. (2014)
Lodo de fibra residual provenientes do processamento com sulfato (SFA) e sulfito (SFI)	Extrato de levedura e triptona	*G. xylinus*	7	estático	SFA 11 SFI 10	Cavka *et al*. (2013)
Melaço de soja hidrolisado	etanol	*K. xylinus* (ATCC 53582)	10	estático	7	Chagas (2018)
Palha de trigo	-	*G. xylinus* (ATCC 23770)	7	estático	8.3	Chen *et al*. (2013)
Licor de milho	bacto-peptona, extrato de levedura, d-manitol, sulfato de magnésio e etanol anidro	*A. xylinum*	7	estático	2.86	Cheng *et al*. (2017)
Melaço de cana e glicose acetilada	Ácido cítrico, fosfato de sódio e licor de milho	*K. hansenii* UCP1619	10	estático	0.9	Costa *et al*. (2017)
Casca e bagaço de frutas cítricas	Extrato de levedura, etanol e peptona	*K. xylinus* CICC 10529	8	estático	5.7	Fan *et al*. (2016)
Melaço de soja	Etanol	Cepa isolada da indústria de vinagre	14	estático	10.0	Gomes (2017)
Resíduo de moinho de azeite seco	Fosfato monopotássico e Sulfato de amônio	*G. sacchari*	4	estático	0.81	Gomes *et al*. (2013)
Água residuária de fermentação lipídica	-	*K. xylinus* CH001	5	estático	0.7	Huang *et al.* (2016)

Quadro 2– Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo

(continuação)

Substrato	Suplemento	Microrganismo	Período de incubação (dias)	Condição de crescimento	Rendimento em g/L	Referência
Efluente de destilaria	Licor de milho/Sacarose	*K. oboediens*	8	estático	8.5	Jahan *et al*. (2018)
Frutas apodrecidas (FA) e soro de leite (SL)	-	*G. xylinus*	4	estático	SL 5.9 FA 60.2	Jozala *et al*. (2014)
Melaço e licor de milho tratado com H_2SO_4 e $Ca3(PO_4)_2$		Acetobacter sp. V6	3	estático	H_2SO_4 - 1.93 $Ca3(PO_4)_2$ - 2.09	Jung *et al*. (2010)
Melaço cinta preta e melaço de crvejaria	-	*K. hansenii* ATCC 23769	9	Estático (E) e agitado (A)	E – 2.9 A – 3.05	Khattak *et al*. (2015)
Extrato de açúcares da madeira extraídos com água quente	-	*K. hansenii* ATCC 23769	10	estático	0.2	Kiziltas *et al*. (2015)
Águas residuais de jujuba cristalizada	Citrato de amônio, fosfato de sódio, carbonato de cálcio	*G. xylinum* (CGMCC 2955)	6	estático	2.25	Li *et al*. (2015)
Líquido de sisal	Extrato de levedura e/ou sulfato de amônia	*K. hansenii* ATCC 23769	10	estático	3.4	Lima *et al.* (2017)
Resíduos de levedura de cerveja	-	*K. hansenii* CGMCC 3917	14	estático	7.0	Lin *et al*. (2014)
Extrato de algaroba	Extrato de levedura	*K. hansenii* ATCC 23769	5		1.2	Nascimento *et al*. (2016)
Suco de abacaxi (SA) e amido de milho hidrolisado (AM)	-	*K. xylinus* DFBT	14	estático	SA 9.1 AM 3.48	Neera, Ramana e Batra (2015)
Extrato de casca de café	Licor de milho	*G. hansenii*	14	estático	6.24	Rani, Rastogi e Anu Appaiah (2011)
Glicerol bruto e farinha de girassol	-	*K. sucrofermentans* DSM 15973	15	estático	13.3	Tsouko *et al.* (2015)
Melaço de cana-de-açúcar		*G. intermedius* SNT-1	10	estático	12,6	Tyagi e Suresh (2016)

Quadro 3– Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo

(conclusão)

Substrato	Suplemento	Microrganismo	Período de incubação (dias)	Condição de crescimento	Rendimento em g/L	Referência
Extrato de lichia	-	*K. xylinus* CH001	14	estático	2.5	Yang *et al*. (2016)
Maple syrup	Sulfato de amônio e fosfato monopotássico	*A. xylinum* BPR 2001 (ATCC 700178)	7	agitado	1.51	Zeng, Small e Wan (2011)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3.1 O melaço de soja

O Brasil é o segundo produtor mundial de soja, atrás apenas dos Estados Unidos, com produção estimada de 118,9 milhões de toneladas para a safra 2017/18 (CONAB, 2018). Desse montante, cerca de 43,6 milhões de toneladas devem ser processadas para a obtenção de farelo e óleo de soja, segundo as projeções da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE).

Embora o farelo e o óleo sejam os principais produtos, durante o processamento da soja são geradas grandes quantidades de coprodutos. Entre os coprodutos está o melaço de soja, que é um tipo de xarope viscoso de cor amarronzada e de sabor agridoce, composto principalmente de carboidratos solúveis, proteínas, lipídios e cinzas (LOMAN; JU, 2016). Os componentes majoritários do melaço de soja em termos de carboidratos são sacarose (26%), estaquiose (16%) e rafinose (12%) (ROMÃO *et al*., 2012).

Até poucos anos atrás esse coproduto era considerado como um resíduo que causava bastante preocupação para as indústrias de beneficiamento de soja devido a poluição causada pela sua deposição no ambiente. A IMCOPA, empresa brasileira, localizada no estado do Paraná, obtém cerca de 650 toneladas de melaço de soja por dia que é aproveitado para geração de energia e produção de bioetanol para a própria empresa, e também para a produção de fertilizantes, aumentando os rendimentos da empresa (SCHOPF; ERBINO; PUVOGEL, 2013).

Siqueira e colaboradores (2008) produziram etanol a partir da fermentação do melaço de soja por *Saccharomyces cerevisiae*. Eles conseguiram um rendimento de 169,8 L de etanol absoluto por tonelada de melaço seco na escala de laboratório, de 163,6 L em escala piloto e 162,7 L em escala industrial. Já Romão e colaboradores (2012) produziram 50.1 g/L de etanol a partir de melaço de soja hidrolisado com ácido nítrico.

Além de ser utilizado para a produção de biocombustíveis, o melaço de soja também vem sendo utilizado como fonte de carbono e nutrientes para a produção de biopolímeros como a CB. Gomes (2017) utilizou o melaço de soja como substrato para a produção de CB e ácido acético por bactérias do ácido acético (BAA) isoladas de indústrias de vinagres. Para uma das cepas isoladas, a produção em melaço de soja suplementado com 2% de etanol foi aproximadamente 3 vezes maior do que a produção obtida no meio HS, para o mesmo microrganismo.

Diante disso, pode-se afirmar que o melaço de soja é um coproduto promissor devido a facilidade de obtenção em grandes volumes, o seu baixo custo e sua aplicabilidade na indústria de produtos de alto valor agregado.

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

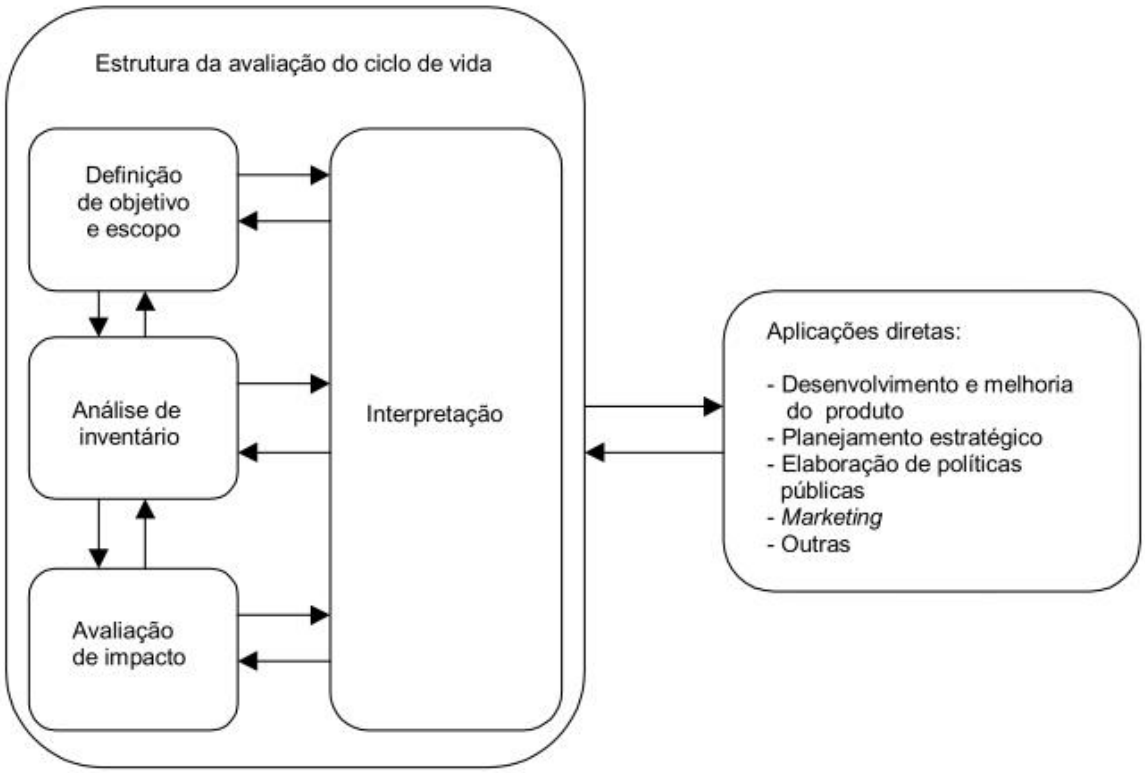
A atual definição para a ACV foi estabelecida pelas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) como a "compilação e avaliação das entradas e saídas e os potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida".

Os primeiros estudos baseados no conceito da ACV foram desenvolvidos em meados da década de 70, período correspondente à crise do petróleo e ao despertar da sociedade para o esgotamento dos recursos naturais (COLTRO, 2007). A Coca-Cola foi uma das empresas precursoras na quantificação das entradas e saídas e impactos associados a diferentes embalagens da bebida produzida pela empresa em 1969. Seguindo a iniciativa da Coca-Cola, outras empresas também começaram a aplicar o conceito da ACV, embora a nomenclatura desse tipo de estudo ainda não fosse a que conhecemos hoje (COLTRO, 2007; GUINÉE *et al*., 2011).

Embora esses estudos iniciais fossem baseados no ponto de vista da análise do ciclo de vida muitos estudos sobre um mesmo objeto chegavam a conclusões distintas devido à falta de uma metodologia padrão (COLTRO, 2007). Somente na década de 90 que a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC) e a Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization – ISO) começaram a focar na harmonização e padronização da metodologia (GUINÉE *et al*., 2011).

Hoje, a ACV é normatizada pela série de normas ISO 14040 (2006) que trata dos seus princípios e estrutura. Segundo esta norma, a metodologia de ACV está estruturada em quatro partes, conforme a figura 1. A normatização também estabeleceu as aplicações diretas de um estudo de ACV.

Figura 1− Etapas de um estudo de ACV



Fonte: ABNT (2009).

A ACV pode ser utilizada para o desenvolvimento e melhoria de produtos, para o planejamento estratégico, para a elaboração de políticas públicas, marketing e outras aplicações (ISO, 2006).

Para Kralisch, Ott e Gericke (2015) esta ferramenta é útil principalmente nas etapas iniciais do desenvolvimento de um produto, pois permite avaliar os possíveis impactos ambientais do produto, identificar as etapas críticas de sua produção, comparar com outros produtos ou processo, além de propor melhorias para o objeto em estudo.

3.2.1 Objetivo e escopo

A primeira etapa de um estudo de ACV é a definição do objetivo e do escopo do estudo. Esta etapa fornece uma descrição do sistema do produto, na qual se inclui a aplicação e razão de se conduzir o estudo e para quem e como os resultados devem ser comunicados (REBITZER *et al*., 2004).

Além disso, também devem ser claramente descritos nesta etapa: a função do sistema de produto; a unidade funcional a ser adotada; os limites do sistema de produto; os

métodos de alocação; os tipos de impactos e metodologias de avaliação de impactos; as suposições e limitações do estudo (ABNT, 2009; COLTRO, 2007; HELLWEG; CANALS, 2014; KRALISCH; OTT; GERICKE, 2015).

Segundo a ABNT (2009) também devem ser descritos nessa etapa a forma de obtenção dos dados, os requisitos da qualidade desses dados, bem como o tipo de análise crítica e o formato de relatório do estudo.

3.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

A segunda etapa de um estudo de ACV consiste na compilação, tabulação e análise preliminar de todas as trocas ambientais (emissões, consumos de recursos, etc.) (HELLWEG; CANALS, 2014; KRALISCH; OTT; GERICKE, 2015; REBITZER *et al*., 2004). Nessa etapa é elaborado um fluxograma dos processos dentro do ciclo de vida e dos processos associados ao sistema em estudo, o qual todas as entradas (consumo de recursos) e saídas (emissões) de e para o ambiente devem ser relacionadas à uma unidade funcional. É válido ressaltar que a unidade funcional estabelecida na etapa anterior é um elemento fundamental em um estudo de ACV, pois permite que bens ou serviços alternativos sejam comparados e analisados (COLTRO, 2007; REBITZER *et al*., 2004).

3.2.3 Avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV)

A AICV fornece indicadores e a base para analisar as possíveis contribuições das extrações ou consumo de recursos e dos resíduos e emissões compilados em um inventário para um número de impactos ambientais potenciais (REBITZER *et al*., 2004).

De acordo com a ISO (2006) e Coltro (2007), a AICV é constituída por várias etapas. A primeira delas é a seleção das categorias de impacto, nas quais os dados do inventário serão atribuídos e que devem ser selecionadas de acordo com o objetivo e o escopo do estudo. Na etapa seguinte há a caracterização dos dados do inventário, que consiste na multiplicação desses dados por fatores de caracterização para cada categoria de impacto selecionada na primeira etapa. E, por fim, os resultados dessa modelagem são somados e se obtém o resultado da categoria de impacto.

O resultado da AICV considerando várias categorias de impactos (como mudanças climáticas, depleção hídrica e de recursos minerais, uso da terra, etc.), sendo chamados métodos de ponto médio, e, em alguns casos, em uma forma agregada (recursos naturais, impactos na

saúde humana, qualidade do ecossistema), chamados métodos de ponto final (PENNINGTON *et al*., 2004; REBITZER *et al*., 2004).

Assim, a AICV facilita a compreensão da magnitude e da importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema ou produto ao longo do ciclo de vida e identifica qual o processo ou entradas e saídas que mais contribuem para que determinado impacto ambiental possa ocorrer (CURRAN, 2016; KRALISCH; OTT; GERICKE, 2015).

3.2.4 Interpretação de um estudo de ACV

A fase final de um estudo de ACV é a interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impacto, o qual deve responder aos objetivos propostos no estudo de ACV em avaliação (HELLWEG; CANALS, 2014). A interpretação é uma etapa obrigatória que ocorre em todas as etapas e é fundamental para obter conclusões e recomendações robustas (REBITZER *et al*., 2004; ZAMPORI *et al*., 2016).

Nessa fase é feito um resumo dos resultados da análise de inventário e da avaliação de impacto obtidos no estudo e segundo a norma ISO 14043 (2000), deve incluir a identificação dos impactos ambientais significativos; uma avaliação do estudo em relação a sua completeza, sensibilidade e consistência; e as conclusões, limitações e recomendações de implementação de melhorias com a finalidade de reduzir os impactos ambientais significativos (COLTRO, 2007).

3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida de polímeros de origem natural

A pesquisa e o desenvolvimento de polímeros obtidos a partir de matérias-primas renováveis vêm ganhando bastante destaque nas últimas décadas devido a crescente preocupação com as questões ambientais. Essas pesquisas têm desenvolvido uma gama de produtos a partir da biomassa vegetal e de outras matérias-primas de origem biológica, como os microrganismos, por exemplo. E aos poucos os resultados dessas pesquisas atingem a escala comercial e competem pelo mercado atualmente ocupado por produtos de origem não renováveis, tendo o petróleo como principal matéria prima (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2002).

Stevens (2002) sugere que embora os produtos tenham origem em uma matéria-prima renovável, e por este motivo sejam chamados frequentemente de produtos sustentáveis e ditos mais ecológicos do que os polímeros convencionais atualmente disponíveis no mercado, o caráter ecológico do produto não deve ser considerado como um fato. Ainda, para Xu e

colaboradores (2008) um produto que tem origem a partir de matérias-primas naturais, pode não ser necessariamente igual a um produto ecologicamente favorável. A garantia de que um produto é realmente sustentável em termos ambientais pode ser obtido por meio da metodologia de avaliação do ciclo de vida, que analisa os processos fundamentais de todo o ciclo de vida de um produto, desde as etapas de extração, fabricação, uso e descarte (XU *et al*., 2008).

Nesse contexto, vários estudos avaliaram a ecoeficiência da síntese e processo de manufatura de materiais lignocelulósicos, incluindo fibras naturais e nanofillers (fibras e nanocristais de celulose) por meio da avaliação do ciclo de vida. Figueirêdo e colaboradores (2012) analisaram dois sistemas de obtenção de nanofibras de celulose extraídas de fibras de coco verde e de fibras de algodão branco e concluíram que a obtenção a partir deste último tem melhor desempenho ambiental, pois neste sistema menos energia e água são requeridas no processo, além de apresentar menores emissões de cargas potencialmente poluidoras. Este estudo contribui para o entendimento de que o uso de matérias-primas renováveis não garante por si só a sustentabilidade de um produto ou processo, sendo necessária uma avaliação aprofundada para que se possa conhecer o nível de sustentabilidade do objeto em estudo.

Piccino e colaboradores (2015) desenvolveram e realizaram uma avaliação do ciclo de vida de uma nova tecnologia para a obtenção de nanofibras de celulose a partir de resíduos de cenoura. Os resultados da análise de impactos do ciclo de vida mostraram que a eletricidade foi o principal contribuinte para os impactos ambientais da tecnologia avaliada. Os autores compararam ainda o sistema desenvolvido com os utilizados nos estudos de Figueirêdo e colaboradores (2012) e Li e colaboradores (2013) e concluíram que a tecnologia desenvolvida tem o potencial de se tornar uma alternativa competitiva do ponto de vista ambiental.

Já Nascimento e colaboradores (2016) utilizaram as conclusões do estudo de Figueirêdo e colaboradores (2012) para sugerir alternativas para o processo de extração de nanofibras a partir da fibra do coco verde e conseguiu uma melhora significativa em todas as categorias avaliadas. O autor avaliou também a comparação da metodologia melhorada por ele com o a dos estudos desenvolvidos por Piccino e colaboradores (2015), Li e colaboradores (2013), Arvidsson e colaboradores (2015) e Braid e colaboradores (2015).

Diante do exposto, a avaliação do ciclo de vida tem um papel fundamental não só para se conhecer e garantir o desempenho ambiental de um produto seja ele de origem natural ou não, ou de um processo, mas também como subsídio para melhorias e comparação com outros já existentes, permitindo a escolha da rota tecnológica ou produto mais vantajoso em termos ambientais.

3.2.6 Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de Celulose Bacteriana

As rotas tecnológicas para a obtenção de polímeros de origem natural, como a celulose, quitina e amido, incluem quase sempre uma etapa de extração, pois estes não são encontrados em sua forma pura (VILAPLANA; STRÖMBERG; KARLSSON, 2010). Diante disso, novas rotas de obtenção vêm sendo pesquisadas e desenvolvidas nos últimos anos, dentre elas a de obtenção de celulose a partir da síntese bacteriana. Entretanto, a obtenção de polímeros de origem microbiana, assim como o de outras fontes naturais, precisa ser avaliada em termos de sustentabilidade.

Até o presente momento, poucos estudos têm sido publicados no que concerne a avaliação ambiental de compósitos celulósicos sintetizados pelo metabolismo bacteriano. Dois estudos usaram a ACV para avaliar o impacto ambiental da extração, em escala laboratorial, da produção de celulose bacteriana.

Pinheiro e colaboradores (2016) avaliaram a produção de celulose bacteriana, em escala laboratorial, em meio à base de suco de caju suplementado. Por meio da ACV foi possível identificar que as etapas que mais contribuíram para os impactos ambientais (mudança climática, eutrofização de águas doces, eutrofização marinha, acidificação do solo, depleção hídrica, toxicidade humana câncer, toxicidade humana não-câncer e ecotoxicidade de águas doces) foram o cultivo estático e a purificação das películas de CB. Os autores propuseram, ainda, uma análise de cenários onde foi testada a adição de peróxido de hidrogênio 1% (v/v) no processo de purificação convencional das películas de CB em laboratório e constataram que houve uma redução de 14% em média para a maioria das categorias de impactos, exceto para categoria toxicidade humana câncer (3%).

Na mesma perspectiva, Castro e colaborares (2016) também avaliaram a produção de CB, em escala laboratorial, mas utilizando o meio de cultivo HS, o qual é considerado como meio sintético padrão para a obtenção de celulose bacteriana. Assim como no estudo de Pinheiro e colaboradores (2016) as etapas que mais contribuíram para os impactos foram o cultivo estático e a purificação. No entanto, a análise de cenários proposta (cenário 1, purificação com NaOH 2% + H_2O_2 1%; cenário 2, purificação com NaOH 4% + H_2O_2 1%, e cenário 3, redução do volume de água usada na neutralização, com aumento do tempo de permanência das películas em água) não indicou redução significativa dos impactos para a maioria das categorias avaliadas, exceto para as categorias eutrofização marinha e acidificação do solo, nas quais o cenário 2 mostrou-se significativamente menos impactante que os demais cenários avaliados.

4 RESULTADOS

4.1 ARTIGO SUBMETIDO 1

Revista: Revista de Gestão Social e Ambiental.

ISSN: 1981-982X.

Área de Avaliação: Interdisciplinar.

Classificação qualis CAPES: B2.

Srta Renata de Araújo e Silva,

Agradecemos a submissão do trabalho "CELULOSE BACTERIANA: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO" para a revista Revista de Gestão Social e Ambiental.
Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão: https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/author/submission/1827
Login: renata-araujo93

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Jacques Demajorovic
Revista de Gestão Social e Ambiental

Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA
ISSN: 1981-982X
http://revistargsa.org

RGSA
Revista de Gestão Social e Ambiental

CELULOSE BACTERIANA: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO

RESUMO

A celulose bacteriana (CB), produzida por algumas espécies de bactérias, é uma iguaria alimentar e tem se mostrado um biomaterial promissor, principalmente devido a sua pureza, biocompatibilidade e sustentabilidade. Entretanto, ainda não há estudos publicados que abordem os impactos ambientais associados ao processo de produção de CB. Assim, este artigo tem como objetivo apresentar um levantamento sobre os recentes avanços referentes a produção de CB, contextualizando os principais aspectos e impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida desse produto, assim como apresentar um roteiro para a realização de futuros estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática adotando os seguintes critérios: artigos científicos publicados nos últimos 5 anos que tivessem as palavras-chave "celulose bacteriana/microbiana", "processo de produção" e "impactos ambientais", em português e/ou inglês, disponíveis na plataforma de buscas do portal da CAPES. O levantamento de dados ocorreu no mês de setembro de 2018 tendo sido selecionados 35 artigos, os quais foram analisados sobre a perspectiva da avaliação ambiental. A partir da análise e da construção do roteiro foi possível demonstrar que embora os estudos de ACV de produtos em desenvolvimento tenha algumas limitações, esta pode ser uma ferramenta vantajosa para o estabelecimento comercial do produto e seu processo produtivo com melhor desempenho ambiental.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida [ACV]; Biomaterial; Desempenho ambiental; Estudo prospectivo.

BACTERIAL CELLULOSE: POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PRODUCTION

ABSTRACT

The bacterial cellulose (BC) produced by some species of bacteria is has shown to be a promising biomaterial mainly because of its purity, biocompatibility, and sustainability. However, there are still no reports of studies that address the environmental impacts associated with the BC production process. Thus, this article aimed to present a brief survey on the recent advances regarding BC production, contextualizing the environmental aspects of the process through a guide for future Life Cycle Assessment (LCA) studies of the process. For this, a systematic bibliographic review was carried out adopting the following criteria: scientific articles published in the last 5 years with the keywords, bacterial or microbial cellulose, production process, and environmental impacts, in Portuguese and in English and available on the CAPES portal. The data collection took place in September 2018. We selected 35 articles, which were analyzed from the perspective of the environmental assessment. From the analysis and construction of a guide, it was possible to demonstrate that although the LCA studies of developing processes have some limitations, this can be an advantageous tool to establish the process with better environmental performance.

Key words: Life cycle assessment [LCA]; Biomaterial; Environmental performance; Prospective study.

4.1.1 Introdução

A atual preocupação acerca da problemática ambiental tem demandado ações voltadas para a sustentabilidade por parte das indústrias para redução dos impactos ambientais tanto na fábrica como ao longo do ciclo de vida de seus produtos e serviços. Essas ações incluem tanto a avaliação ambiental de processos que busca identificar os pontos-críticos que podem ser otimizados, sejam através do reaproveitamento de resíduos, da melhoria na eficiência do consumo de energia, como o desenvolvimento de biomateriais que possam substituir aqueles produzidos a partir de matérias-primas não-renováveis, causando menores impactos ao longo do seu ciclo de vida (HERVY et al., 2015).

Nesse contexto, a celulose sintetizada por algumas espécies de bactérias (CB) é um uma iguaria, bastante utilizada em países asiáticos (SHI et al., 2014). Atua também como agente espessante e estabilizante na indústria de alimentos (PAXIMADA et al., 2016).

Além desses usos, nos últimos anos, a CB vem sendo considerada um biopolímero promissor. As propriedades únicas desse biopolímero (pureza, alta cristalinidade, forte resistência mecânica etc.) conferem vantagens sobre os materiais atualmente disponíveis,

podendo substitui-los ou, ainda, permitir o desenvolvimento de novos produtos em novas aplicações (GULLO et al., 2018).

Atualmente, a CB é utilizada na formulação de inúmeros produtos. Destacam-se os biomateriais para indústria de cosméticos (LIN et al., 2015), de equipamentos eletrônicos (PINTO et al., 2015), de dispositivos médicos como os curativos bioativos (QIU et al., 2016), de scaffold para a engenharia de tecidos (WANG et al., 2018), e de sistemas de liberação controlada de fármacos (MULLER et al., 2013).

Além dos benefícios funcionais que promove, a CB também é reconhecida pela possível vantagem ambiental quando comparada a celulose tradicional. Vários estudos têm demonstrado que as bactérias capazes de sintetizar celulose conseguem utilizar uma variedade de substratos, incluindo alguns resíduos e coprodutos de processos agrícolas e industriais (LIN; DUFRESNE, 2014). Essa capacidade contribui para a redução da poluição causada pelo tratamento e descarte desses resíduos.

Ainda, apesar de não haver estudos que avaliem os impactos ambientais do processo de obtenção, a CB gerada por microrganismos é considerada um processo limpo quando comparado ao processo de obtenção de celulose a partir da madeira, que requer uma maior área para as florestas plantadas, e uma série de tratamentos químicos, biológicos e mecânicos para sua extração, gerando resíduos sólidos e emissões de poluentes para a água e o ar (REINIATI; HRYMAK; MARGARITIS, 2017).

Neste sentido, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), estabelecida pelas normas NBR ISO 14040 (2009a) e NBR ISO 14044 (2009b), é uma ferramenta importante para estimar os possíveis impactos ambientais e desempenho ambiental de um produto, processo ou serviço em relação a substitutos no mercado. A ACV quantifica os possíveis impactos de aspectos ambientais associados em todo o ciclo de vida de um produto (HELLWEG; CANALS, 2014). No caso de tecnologias emergentes, como a CB e seu processo de obtenção, a aplicação da ACV pode identificar os pontos-críticos e buscar alternativas que melhorem o seu desempenho ambiental durante a fase de desenvolvimento tecnológico (HETHERINGTON et al., 2014).

Assim, o objetivo dessa revisão é apresentar os recentes avanços sobre a produção desse biopolímero, destacando quais informações são necessárias para avaliar o desempenho ambiental da CB, quais dessas informações estão atualmente disponíveis, e quais precisam ser levantadas por pesquisadores responsáveis pelo desenvolvimento desse biopolímero. Esse trabalho apresenta um roteiro para nortear a execução de futuros trabalhos de ACV de CB.

4.1.2 Fundamentação teórica

Essa seção apresenta o estado da arte da produção da celulose bacteriana e os princípios e estrutura da metodologia de avaliação do ciclo de vida.

4.1.2.1 Celulose bacteriana

A celulose é um polímero de fórmula molecular $C_6H_{10}O_5$ (n), considerado como o composto orgânico mais abundante na natureza. É produzido por diversos organismos, como plantas, algumas espécies de bactérias, e em menores proporções, em fungos (*Saprolegnia*), algas (*Valonia*) e animais marinhos (tunicados) (JORFI; FOSTER, 2015).

O estudo de Brown (1886) foi o primeiro a relatar a presença de uma membrana gelatinosa crescendo ocasionalmente sobre a superfície de um caldo de fermentação de vinagre com bactérias acéticas. Sabe-se agora que essa membrana gelatinosa é, na verdade, celulose sintetizada como parte do metabolismo normal de várias espécies de bactérias dos gêneros *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Sarcina* e, principalmente, dos gêneros *Komagataeibacter* (criado a partir da subdivisão do gênero *Gluconacetobacter*) e *Gluconacetobacter* (anteriormente *Acetobacter*). Esses dois últimos gêneros são reconhecidos como os organismos capazes de sintetizar CB em maiores quantidades (CAMPANO et al., 2016).

Atualmente, duas rotas de produção de CB são investigadas, uma em condição estática e outra sob agitação. A escolha da rota depende principalmente do propósito da aplicação, uma vez que formas distintas de celulose são produzidas em cada rota (RAJWADE; PAKNIKAR; KUMBHAR, 2015; REINIATI; HRYMAK; MARGARITIS, 2017).

A rota tipicamente utilizada para a produção de CB é a estática, a qual produz celulose em forma de películas que crescem na superfície ar-líquido. Este tipo de cultivo pode levar a uma produtividade baixa (7 g/L, em média) e tempo de cultivo longo (9 dias, em média) em uma futura escala industrial, quando comparado com a rota de produção sob agitação (7 g/L com tempo de cultivo de 3 dias, em média) (LIN et al., 2013).

No cultivo agitado, a celulose é produzida na forma de pelotas, massas irregulares ou em estrutura fibrilar. Esse tipo de cultivo demanda maior quantidade de energia que o cultivo estático. Embora esta rota seja considerada como a mais promissora para a produção em escala industrial, a formação de células mutantes não produtoras de celulose, a qual ainda é uma limitação a ser superada em escala laboratorial (GULLO et al., 2018; KESHK, 2014).

Atualmente, os principais gargalos que precisam ser superados para o escalonamento da produção da CB se referem ao meio de cultivo e a seleção de cepas (GULLO et al., 2018). A fonte de carbono tradicionalmente empregada na produção de CB é o meio sintético HS (descrito por Hestrin & Schramm, 1954), de alto custo. A seleção de cepas bacterianas capazes de sintetizarem maiores quantidades de celulose também é um importante passo para se obter maior produtividade.

Nos últimos anos, diversos substratos alternativos como os resíduos e coprodutos industriais e agroindustriais, bem como alguns alimentos foram estudados quanto a viabilidade de produção de CB. O suco de abacaxi e de sua casca, tem se mostrado como um substrato bastante promissor para a produção de CB. Algar et al. (2015) avaliaram a produção de CB a partir do suco da casca do abacaxi e de cana de açúcar tanto por meio do cultivo estático quanto sob agitação. A produtividade no meio alternativo foi superior ao do cultivo no meio convencional (HS) nas duas rotas de cultivo. Além disso, as propriedades físico-químicas da CB produzida em suco de abacaxi foram similares as das películas obtidas no meio convencional. De modo semelhante, Kumbhar, Rajwade, & Paknikar (2015) utilizaram cascas de abacaxi e de melancia e tiveram um rendimento de três a quatro vezes maior do que cultivando a mesma cepa no meio HS, em condições estáticas. As películas de CB produzidas nesses meios apresentaram qualidade superior àquela produzida em HS.

Com relação a escolha de cepas mais produtivas, assim como a rota de cultivo, depende da aplicação pretendida. Essa escolha depende também do meio de cultura, podendo uma mesma cepa produzir mais ou menos CB em diferentes meios (VELÁSQUEZ-RIAÑO; BOJACÁ, 2017). Outra estratégia apontada para aumentar a produtividade de CB é por meio da modificação genética das cepas de bactérias capazes de sintetizar celulose (CAMPANO et al., 2016; ISLAM et al., 2017).

Embora a produção de CB ainda esteja em fase de desenvolvimento, esse biopolímero já se mostrou bastante promissor em diversas áreas. Uma das primeiras aplicações da CB foi para a produção de nata de coco, nata de abacaxi e chá de kombucha (GALLEGOS et al., 2016). Ela também é utilizada na indústria alimentícia como agente espessante, estabilizante ou gelificante (PAXIMADA et al., 2016).

O uso de fragmentos de CB na formulação de diversos tipos de cosméticos foi patenteado recentemente (LIN et al., 2015). O seu uso como estabilizante de emulsões óleo-em-água também vem sendo investigado (PAXIMADA et al., 2016).

Entretanto, é a aplicação na área biomédica que mais tem se destacado. As propriedades tais como a elasticidade, transparência, capacidade de retenção de água,

porosidade e, principalmente, biocompatibilidade são requisitos que permitem que a CB seja utilizada no desenvolvimento de curativos bioativos (QIU et al., 2016).

Alguns produtos com aplicação nessa área já estão disponíveis no mercado. Pode-se destacar os curativos para feridas Nexfill®, Biofill®, BioProcess® (Fibrocel Produtos Biotecnológicos - Brasil), Bionext® (Bionext Produtos Biotecnológicos), Securian® (Xylos - USA), Suprasorb® (Lohmann & Rauscher - Alemanha), DermaFill™ (Cellulose Solutions – USA), o implante vascular artificial BASYC® (POLYMET Jena - Alemanha), e o implante dentário Gengiflex® (Fibrocel Produtos Biotecnológicos - Brasil) (LUDWICKA et al., 2016).

4.1.2.2 Avaliação do ciclo de vida

A definição para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a "compilação e avaliação das entradas e saídas e os potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida" (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2009a). Entradas sem referem a todos os insumos utilizados em um processo produtivo, enquanto saída são as emissões produtos e coprodutos do processo. As entradas e saídas são os aspectos ambientais que podem gerar impactos no meio ambiente.

Já o sistema de produto se refere ao conjunto de processos relacionados a extração de matérias-primas e energia, produção, uso e fim-de-vida de um produto que são considerados em um estudo de ACV. Esse sistema pode ser do “berço-ao-portão”, quando o foco da avaliação é o processo de produção de um determinado produto, abrangendo os processos de extração de materiais e energia, seu processamento e produção do produto. O sistema de produto também pode ser completo, ou do “berço-ao-túmulo”, quando o foco da avaliação é a etapa de uso do produto em estudo, abrangendo todos os processos do ciclo de vida do produto, da extração de materiais e energia ao fim-de-vida do produto.

A metodologia da ACV é normatizada internacionalmente pela série de normas NBR ISO 14040 (2009a) e 14044 (2009b) que tratam dos seus princípios e estrutura. Segundo estas normas, um estudo de ACV está estruturada em quatro partes: objetivo e escopo, inventário, avaliação de impactos, e interpretação.

A primeira etapa é a definição do objetivo e do escopo do estudo. Essa etapa fornece uma descrição do sistema do produto, na qual se inclui a aplicação e razão de se conduzir o estudo e para quem e como os resultados devem ser comunicados (REBITZER et al., 2004). Além disso, também devem ser claramente descritos nesta etapa: i) a função do sistema de produto, ou seja, a função do produto para o consumidor; ii) a unidade funcional a ser adotada

(quantidade de produto gerado, quando a função é de produção, ou quantificação da sua funcionalidade para o consumidor final); iii) a forma de obtenção dos dados; iv) os requisitos da qualidade desses dados; v) os limites do sistema de produto; vi) os métodos de alocação dos aspectos e impactos para processos que geram mais de um produto; vii) as categorias de impactos e métodos de avaliação desses impactos que serão utilizados; e, viii) as suposições e limitações do estudo, bem como o tipo de análise crítica e o formato de relatório do estudo (ABNT, 2009; Kralisch, Ott, & Gericke, 2015). É válido ressaltar que a unidade funcional estabelecida na etapa anterior é um elemento fundamental em um estudo de ACV, pois permite que bens ou serviços alternativos sejam comparados e analisados em relação a um unidade funcional comum aos bens comparados (MOURAD et al., 2007; REBITZER et al., 2004).

Exemplificando, no estudo de uma geladeira, a unidade funcional pode ser produção de 1000 geladeiras no mês, caso o interesse seja um estudo do berço-ao-portão. Caso o interesse do estudo seja o ciclo de vida completo desse produto, a unidade funcional poderia ser a conservação de 20 kg de alimentos, em temperatura máxima de 10 ^{o}C, durante 10 anos. Essa definição permite que geladeiras de diversas marcas sejam comparadas e avaliadas em termos de seus impactos ambientais potenciais.

Na segunda etapa de um estudo de ACV, inicialmente, elabora-se um fluxograma dos processos unitários que demandarão coleta de dados primários dentro do ciclo de vida. Para cada processo, elencam-se as entradas (consumo de recursos) e saídas (emissões).

Em seguida, realiza-se o inventário ambiental com coleta de dados primários e secundários em bases de dados existentes. Os processos principais relacionados ao produto em estudo requerem o levantamento de dados primários. Exemplificando, no estudo de uma geladeira, quantificam-se as entradas e saídas dos processos de produção da geladeira, uso em residências e descarte-final. As entradas e saídas dos processos de extração e produção de metais, plásticos e outros materiais necessários à produção da geladeira podem ser levantadas em bases de dados existentes como a suíça Ecoinvent (FRISCHKNECHT et al., 2005) e a brasileira SICV Brasil - Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (IBICT, 2018). Por último, todas as entradas e saídas são relacionadas a unidade funcional definida.

A etapa seguinte é a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) que fornece indicadores e a base para analisar as possíveis contribuições das entradas e saídas compilados em um inventário (extrações ou consumo de recursos e as emissões) para ocorrência de um impactos ambientais (REBITZER et al., 2004). Exemplos de categorias de impacto usualmente consideradas em estudos AICV são aquecimento global, escassez hídrica e de outros recursos

minerais, mudança e ocupação da terra, eutrofização, acidificação, depleção da camada de ozônio e toxicidade.

De acordo com a ABNT (2009a) e Mourad et al. (2007), a AICV é constituída por várias etapas. A primeira delas é a seleção das categorias de impacto de acordo com o objetivo e o escopo do estudo. Na etapa seguinte, há a caracterização dos dados do inventário, que consiste na multiplicação desses dados por fatores de caracterização para cada categoria de impacto selecionada na primeira etapa. Esses fatores denotam o potencial que a extração de recursos ou as emissões têm de causar impactos em uma categoria. Por fim, os resultados dessa modelagem são somados e se obtém o resultado da categoria de impacto.

O resultado da AICV pode ser calculado considerando categorias de impactos de ponto médio (como mudanças climáticas e escassez hídrica) ou de ponto final (depleção de recursos naturais, impactos na saúde humana, e na qualidade do ecossistema) em uma cadeia de causa e efeito ambiental (PENNINGTON et al., 2004; REBITZER et al., 2004). Assim, a AICV facilita a compreensão da importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto, ao longo do ciclo de vida, permitindo identificar qual o processo, recurso, e emissão mais contribuem para ocorrência de cada categoria de impacto avaliada (CURRAN, 2016; KRALISCH; OTT; GERICKE, 2015).

A fase final de um estudo de ACV é a interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impacto. Nessa etapa, avalia-se se os objetivos propostos no estudo foram atendidos, assim como as incertezas dos resultados (HELLWEG; CANALS, 2014). Essa etapa é obrigatória, sendo fundamental para obtenção de conclusões e recomendações robustas (REBITZER et al., 2004; ZAMPORI et al., 2016). Ao final dessa etapa, deve-se apresentar a identificação dos impactos ambientais significativos; possíveis alternativas para redução dos impactos; uma avaliação do estudo em relação a sua completeza, sensibilidade e consistência; e as conclusões, limitações e recomendações de mudanças com a finalidade de reduzir os impactos ambientais significativos (MOURAD et al., 2007).

4.1.3 Métodos de pesquisa

O levantamento da literatura referente aos impactos ambientais da produção de CB baseou-se no método de revisão bibliográfica sistemática. Os critérios adotados foram a seleção de artigos científicos publicados nos últimos 5 anos que tivessem as palavras-chave “celulose bacteriana/microbiana”, “processo de produção” e “impactos ambientais” em português e/ou inglês e que estivessem disponíveis na plataforma de buscas do portal da CAPES (Coordenação

de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). O levantamento de dados ocorreu no mês de setembro de 2018. A partir da busca sistemática verificou-se que até o presente momento não foram publicados estudos que tivessem como foco os impactos ambientais do processo de produção de CB.

Procedeu-se uma segunda busca sistemática seguindo os mesmos critérios, excluindo apenas o termo "impactos ambientais", na qual foram selecionados 35 artigos. O objetivo da segunda busca foi: i) analisar e identificar quais dados são relatados nos estudos de produção de CB que possam ser úteis para a realização de um estudo de avaliação de impactos ambientais pela metodologia de ACV, e ii) quais dados e informações ainda são necessárias para viabilizar a condução desse tipo de estudo. Além disso, desenvolveu-se um roteiro para nortear a execução de avaliações futuras de impacto ambiental de CB, observando-se as etapas de um estudo ACV (objetivo e escopo, inventário, AICV e interpretação).

4.1.4 Análise e discussão dos resultados

Conforme os critérios da segunda revisão sistemática, foram selecionados 35 artigos, os quais são apresentados conforme seus objetivos no quadro 1.

Quadro 1 – Artigos selecionados e revisados de acordo com os critérios da revisão sistemática.

Objetivo dos artigos	Referência
Avaliar meios de cultivo alternativos para a produção de CB	(Algar et al., 2015; Bilgi, Bayir, Sendemir-Urkmez, & Hames, 2016; Çakar, Özer, Aytekin, & Şahin, 2014; Cheng, Yang, Liu, Liu, & Chen, 2017; Costa, Almeida, Vinhas, & Sarubbo, 2017; Erbas Kiziltas, Kiziltas, & Gardner, 2015; Fan et al., 2016; Huang et al., 2016; Jahan, Kumar, & Saxena, 2018; Jozala et al., 2014; Khattak, Khan, Ul-Islam, Wahid, & Park, 2015; Kumbhar et al., 2015; Li, Wang, Hua, Jia, & Zhang, 2015; Lima et al., 2017; Machado et al., 2018; Neera;, Ramana, & Batra, 2015; Tyagi & Suresh, 2016; Velásquez-Riaño & Bojacá, 2017; Yang et al., 2016)
Melhorar a produção de CB	(ÇAKAR et al., 2014; CAMPANO et al., 2016; ISLAM et al., 2017; LIN et al., 2013)
Aplicações da CB	(GALLEGOS et al., 2016; GULLO et al., 2018; JORFI; FOSTER, 2015; KESHK, 2014; LIN et al., 2015; LUDWICKA et al., 2016; MULLER et al., 2013; PAXIMADA et al., 2016; PINTO et al., 2015; QIU et al., 2016; RAJWADE; PAKNIKAR; KUMBHAR, 2015; REINIATI; HRYMAK; MARGARITIS, 2017; WANG et al., 2018)

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.4.1 Objetivo e escopo

De acordo com a ABNT (2009a), na definição do objetivo de um estudo de ACV deve-se declarar a aplicação pretendida, a razão para conduzir o estudo e para quem os

resultados do estudo serão comunicados. Para um estudo de ACV de produtos tecnológicos em desenvolvimento, no qual as possíveis aplicações do produto ainda estão sendo investigadas, como é o caso da produção de CB, um objetivo inicial é avaliar o processo principal de obtenção de CB para conhecer quais etapas causam os principais impactos ambientais.

A partir dessa avaliação, é possível identificar as etapas críticas associadas ao ciclo de vida do processo principal de obtenção de CB, e buscar melhorias em termos de produtividade, custo e viabilidade, em conjunto com o critério ambiental. Por se tratar de um processo e produto em escala laboratorial, as melhorias podem ser implantadas mais facilmente e com menor recurso financeiro, uma vez que os maiores investimentos ocorrem na montagem da linhas de produção em escala piloto e industrial (HETHERINGTON et al., 2014).

Além de ampliar o conhecimento do desempenho ambiental de um processo específico de obtenção de CB, outro objetivo pode ser a comparação desse processo com outros alternativos para identificar as vantagens ambientais de um em relação aos outros. É importante ressaltar que deve-se comparar processos com escalas semelhantes de produção para se tomar decisões corretas sobre qual processo deve ser promovido (HETHERINGTON et al., 2014).

Quando o processo de obtenção de CB já se encontra em escala piloto e as características da CB obtida já se encontram melhor estabelecidas para uma aplicação pretendida, pode-se priorizar a comparação da CB com outro produto que apresente função semelhante quando utilizado pelo consumidor. Nesse momento, deve-se considerar uma função mais ampla que a de produção, relacionada a aplicação pretendida. Aqui, os processos de uso da CB e fim-de-vida devem ser considerados.

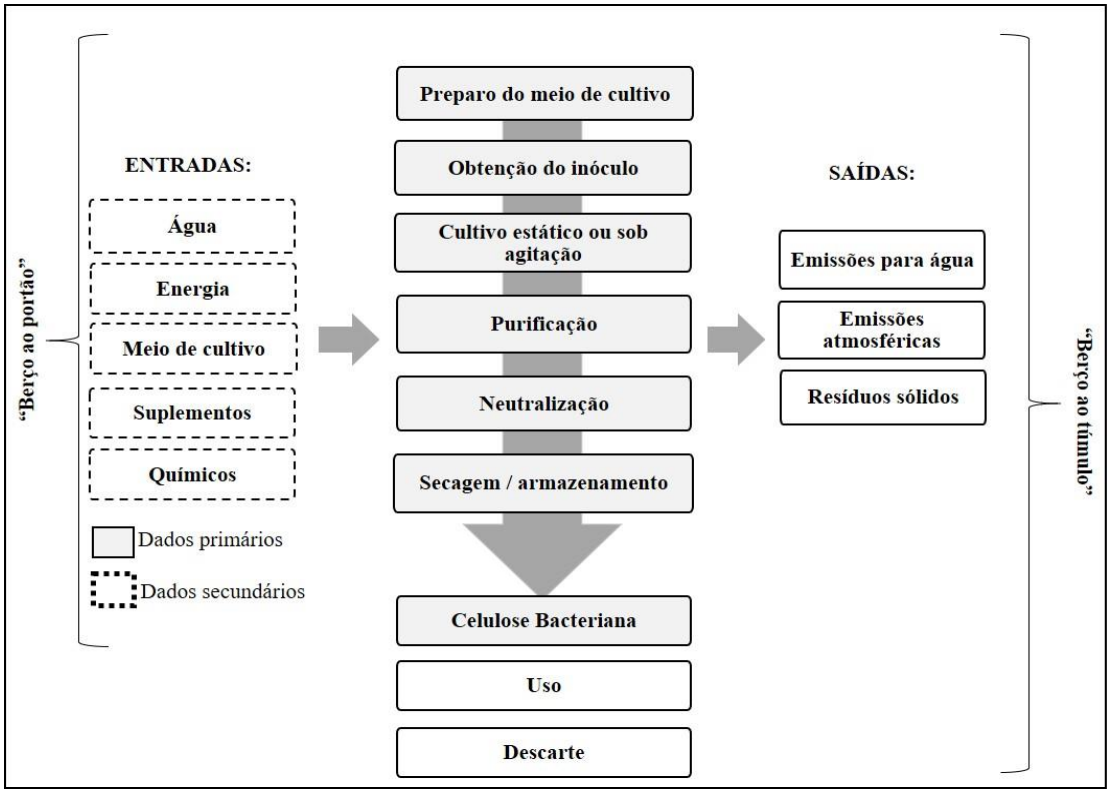
Com relação a comunicação dos resultados, estudos de CB em estágio inicial de desenvolvimento são usualmente comunicados apenas internamente, apoiando discussões relacionadas a possíveis melhorias no processo. Já estudos de CB com processo de produção em escala industrial muitas vezes buscam a obtenção de certificação ambiental de produto. Porém, a estrutura do estudo e sua comunicação já podem ser feitas no formato de uma publicação externa, observando-se os requerimentos da norma NBR ISO 14025 (2015) e as regras de categoria de produto (RCP).

O escopo de um estudo de ACV quando bem definido, assegura que a abrangência e o nível de detalhamento consiga atender ao objetivo do estudo (ABNT, 2009a). Quando o objetivo mais indicado para a produção de CB é identificar pontos críticos e comparar processos alternativos, o escopo deve ser minucioso para o macroprocesso de produção de CB, considerando-se cada etapa desse processo como processo unitário, com levantamento de

entradas e saídas. Esse detalhamento permite a identificação de etapas críticas e realização de alterações específicas visando redução dos impactos.

O sistema de produto para cada tipo de estudo de CB está representado de forma genérica na Figura 1. Assim como para outros produtos emergentes, o escopo mais apropriado para estudos de ACV de CB em desenvolvimento é do tipo “berço ao portão”. Para estudos de CB já em escala piloto ou industrial ou para comparar com outros produtos com aplicação semelhante, o sistema mais abrangente do “berço ao túmulo” deve ser priorizado.

Figura 1 – Sistema de produto genérico para a produção de celulose bacteriana.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto a unidade funcional, esta é o desempenho quantificado da função de um produto. Todas as entradas e saídas do inventário, assim como os resultados da avaliação de impacto, são relacionadas ou relativas a esta unidade (MOURAD et al., 2007). Assim, a função do sistema de produto de CB deve ser quantificada na unidade funcional.

Quando a função é de produção, a unidade aplicada é a massa de produto gerada no tempo. Os artigos sobre a produção de CB em escala de laboratório fornecem o rendimento do processo em gramas (g) de CB por litro (L) de meio de cultivo (Quadro 2), assim como o tempo de produção. Assim, é possível levantar informações nesses estudos para a unidade funcional de produção de 1 g de CB /dia. Essa unidade é adequada para identificações de etapas críticas no processo de produção como para comparação de processos alternativos de produção, utilizando diferentes meios de cultura.

Em um estudo ACV de CB, um dos processos considerados na avaliação é o de produção do meio de cultivo. O impacto potencial da produção de diferentes meios também é diferente, não sendo necessariamente menor o impacto da produção de 1 L de meio HS em relação a 2 L de suco de abacaxi. Assim, em uma avaliação ambiental é mais importante avaliar

como unidade funcional a produção de CB no menor tempo do que a produção com um menor volume de meio de cultura.

Outros atributos referentes a qualidade da CB obtida podem também ser considerados na unidade funcional, como porosidade e capacidade de retenção de água entre outros. Entretanto, esses atributos são definidos quando se estabelece a aplicação pretendida, devendo ser inseridos em estudos em escala piloto ou industrial. Por exemplo, a aplicação de CB como sistema de administração prolongada de fármacos para a revascularização de tecido lesionado desenvolvido por (WANG et al., 2018), pode ter como unidade funcional o período mínimo de liberação do fármaco para que se obtenha um determinado nível de revascularização do tecido lesado.

Quadro 2 – Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo.

(continua)

Substrato	Origem do substrato	Suplemento	Microrganismo	Incubação (dias)	Condição de crescimento	Rendimento em g/L	Referência
Extrato hidrolisado de alfarroba e feijão branco	Produtos	Ácido cítrico e fosfato dissódico (Na_2HPO_4)	*K. xylinus* ATCC 700178	9	estático	1.8	(BILGI et al., 2016)
Melaço de cana hidrolisado	Coproduto	-	*K. xylinus* FC01	10	estático	1.0	(ÇAKAR et al., 2014)
Licor do caule do milho	Resíduo	bacto-peptona, extrato de levedura, d-manitol, sulfato de magnésio e etanol anidro	*A. xylinum*	7	estático	2.86	(CHENG et al., 2017)
Melaço de cana e glicose acetilada	Coprodutos	Ácido cítrico, fosfato de sódio e licor de milho	*K. hansenii* UCP1619	10	estático	0.9	(COSTA et al., 2017)
Casca e bagaço de frutas cítricas	Resíduo	Extrato de levedura, etanol e peptona	*K. xylinus* CICC 10529	8	estático	5.7	(FAN et al., 2016)
Água residuária de fermentação lipídica	Resíduo	-	*K. xylinus* CH001	5	estático	0.7	(HUANG et al., 2016)
Efluente de destilaria	Resíduo	Licor de milho/ Sacarose	*K. oboediens*	8	estático	8.5	(JAHAN; KUMAR; SAXENA, 2018)

Quadro 3 – Produção de celulose bacteriana em diferentes substratos e tipos de cultivo.

(conclusão)

Substrato	Origem do substrato	Suplemento	Microrganismo	Incubação (dias)	Condição de crescimento	Rendimento em g/L	Referência
Frutas apodrecidas (FA) e soro de leite (SL)	Resíduo	-	*G. xylinus*	4	estático	SL 5.9 FA 60.2	(JOZALA et al., 2014)
Melaço cinta preta e melaço da unidade de condensação da indústria cervejeira	Produto e resíduo	-	*K. hansenii* ATCC 23769	9	Estático (E) e agitado (A)	E – 2.9 A – 3.05	(KHATTAK et al., 2015)
Extrato de açúcares da madeira extraídos com água quente	Resíduo	-	*K. hansenii* ATCC 23769	10	estático	0.2	(ERBAS KIZILTAS; KIZILTAS; GARDNER, 2015)
Águas residuais de jujuba cristalizada	Resíduo	Citrato de amônio, fosfato de sódio, carbonato de cálcio	*G. xylinum* (CGMCC 2955)	6	estático	2.25	(LI et al., 2015)
Líquido de sisal	Resíduo	Extrato de levedura e/ou sulfato de amônia	*K. hansenii* ATCC 23769	10	estático	3.4	(LIMA et al., 2017)
Suco de abacaxi (SA) e amido de milho hidrolisado (AM)	Produtos	-	*K. xylinus* DFBT	14	estático	SA 9.1 AM 3.48	(NEERA; RAMANA; BATRA, 2015)
Melaço de cana-de-açúcar	Produto	-	*G. intermedius* SNT-1	10	estático	12,6	(TYAGI; SURESH, 2016)
Extrato de lichia	Produto	-	*K. xylinus* CH001	14	estático	2.5	(YANG et al., 2016)

Fonte: Elaborado pelos autores

4.1.4.2 Inventário

A análise de inventário inclui a coleta de dados e a quantificação das entradas (insumos) e saídas (emissões, produto e coprodutos) associadas aos processos unitários de um sistema de produto ou processo (ABNT, 2009a). Assim, nessa etapa, geralmente se elabora um fluxograma do sistema em estudo indicando os insumos e emissões de cada processo unitário com levantamento de dados primários. Em seguida, realiza-se a

quantificação dos fluxos de matéria-prima, energia e emissões nesses processos. Após a quantificação é realizado o cálculo desses fluxos com relação a unidade funcional definida na etapa anterior da ACV.

A coleta de dados de processos que estão em desenvolvimento é uma atividade laboriosa, pois artigos científicos apresentando esses processos não geram os dados detalhados que são necessários para a construção do inventário e a consequente avaliação ambiental. Exemplificando, na tabela 1 são apresentadas as informações relativas as entradas de cada etapa da produção de CB dos estudos de Machado et al. (2018) e Kumbhar, Rajwade, & Paknikar (2015) e quais ainda são necessárias para que se possa realizar a avaliação ambiental do processo.

Observa-se que normalmente a quantificação dos dados referentes a consumo de água e energia não são mencionados nos estudos. assim como de alguns reagentes químicos. Outra informação inexistente nos artigos de CB é relativa as emissões. Não há dados sobre quantidade de sólidos resíduos, volume de efluentes líquidos e a carga ambiental gerada no processo.

Quadro 3 − Produção de CB.

(continua)

Processo unitário	(KUMBHAR; RAJWADE; PAKNIKAR, 2015)		(MACHADO et al., 2018)	
	Dados disponíveis	Dados necessários	Dados disponíveis	Dados necessários
Preparo do meio de cultivo	100g de casca de abacaxi, 100g de casca de melancia; 100mL de água destilada; 5% de açúcar de mesa; 0,7% de sulfato de amônia; 0,02% de cicloheximida; NaOH 0.1M e HCl 0.1M.	Quantidade de água para a lavagem das frutas; equipamento utilizado para moer as cascas para obtenção do suco; informações sobre o consumo de energia dos equipamentos utilizados no processo unitário; Quantidade de NaOH ou de HCl utilizada para ajustar o pH;.Carga poluente do efluente.	4 g/L de extrato de levedura; 20 g/L de etanol, 30 g/L de glicose e 20 g/L melaço de cana-de-açúcar; esterilização em autoclave a 121ºC por 20min.*	Consumo de energia da autoclave.

Quadro 3 − Produção de CB.

(conclusão)

Processo unitário	(KUMBHAR; RAJWADE; PAKNIKAR, 2015)		(MACHADO et al., 2018)	
	Dados disponíveis	Dados necessários	Dados disponíveis	Dados necessários
Obtenção do inóculo	100mL de meio HS (20 g/L de glicose, 5 g L de peptona, extrato de levedura 5 g/L, 2,7 g/L de Na2HPO4, 115 g/L de ácido cítrico, 15 g/L de ágar, pH 5); incubação em temperatura ambiente por 48h em condição estática.	Não fica claro se foi utilizado algum equipamento para incubação do inóculo.	50mL de meio HS; incubação a 30ºC por 24h.	Não informou o tipo de incubação (sob agitação ou estática) e o consumo de energia da incubadora.
Cultivo estático ou sob agitação	10% de inóculo; incubação em temperatura ambiente por 7 dias em condição estática.	Não fica claro se foi utilizado algum equipamento para incubação.	5mL de inóculo; incubação a 30ºC por 5 dias em condição estática.	-
Purificação	Várias lavagens em água corrente para remover os resíduos do meio de cultura; fervura em solução de NaOH 2% a 90ºC por 60min.	Não foram informados a quantidade de água utilizada na lavagem e os dados relativos ao consumo de energia do equipamento utilizado na fervura; Carga poluente do efluente.	Fervura em solução de NaOH 0.5M a 80ºC por 30min.	Não foi informado se houve lavagem para a remoção dos resíduos de meio de cultura e os dados relativos ao consumo de energia do equipamento utilizado na fervura; Carga poluente do efluente.
Neutralização	Várias lavagens com água destilada até neutralização do pH.	Quantidade de água.	Várias lavagens com água destilada até neutralização do pH.	Quantidade de água.
Secagem / armazenamento	-	-	Secagem ao forno a 37ºC por 24h.	Consumo de energia do forno.
Emissões	-	Não informada		Não informada

Fonte: Elaborada pelos autores.

*No estudo de Machado et al. (2018) foi considerado a preparação apenas do meio em que houve o maior rendimento de CB (g/L), meio F3.

Recentemente, vários substratos alternativos, em particular resíduos e coprodutos agroindustriais, foram investigados para produzir CB. Para ACV a origem desses insumos são de extrema importância, pois se determinado insumo é considerado um resíduo, ou seja não possui aplicações e valor econômico, os impactos ambientais do processo que deu origem a tal resíduo não são considerados no processo onde este resíduo está sendo utilizado. Por outro lado, se os insumos são produtos ou coprodutos (com preço de venda no mercado) de outros processos, os impactos ambientais associados a produção destes devem ser considerados.

Além das dificuldades típicas de um processo em desenvolvimento, como as várias alternativas disponíveis para meio de cultivo e cepas, outro aspecto que requer atenção na avaliação ambiental do processo de produção de CB é a ausência de bases de dados contendo o inventário dos principais insumos utilizados no processo de produção de CB. Neste caso há duas opções, investir tempo e recursos para a coleta de dados primários ou adaptar inventário de processos similares. Exemplificando, nas bases de dados Ecoinvent e SICV não estão disponíveis inventários do processo de produção de água destilada, sendo necessário substituí-lo pelo de produção de água deionizada.

Caso não haja a possibilidade de coletar os dados necessários, os dados de processos similares podem ser utilizados, mas uma análise de sensibilidade e de incerteza deve ser utilizada para garantir a credibilidade dos resultados do estudo de ACV.

4.1.4.3 Avaliação de impactos do ciclo de vida

Na avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) há uma associação dos dados de inventário com os possíveis impactos ambientais que estes podem causar. Embora existam diversos modelos de categorias de impacto, não existe um modelo que seja aceito de uma forma geral. Portanto, a escolha das categorias de impacto deve estar de acordo com o objetivo e escopo do estudo (ABNT, 2009a).

Quanto a classificação das categorias de impacto, essas podem ter abrangência local, regional ou global, e ainda quanto ao nível de ação, estas podem ser de nível intermediário ou final. Como o processo de produção de CB está em fase de desenvolvimento, não se sabe onde a indústria irá se instalar, portanto a escolha de categorias de abrangência global é indicada para avaliar os impactos ambientais em escala laboratorial. É importante observar também que algumas categorias relacionadas à água, como escassez hídrica, passaram nos últimos anos a ser de relevância global. Assim, essas categorias também devem ser contempladas em estudos de tecnologias em desenvolvimento.

Quando já se conhecer as potenciais regiões produtoras de CB, será importante levantar nessas regiões quais questões ambientais são mais relevantes. Exemplificando, nas regiões semiáridas, ressaltam-se os problemas de escassez hídrica e eutrofização de água doce. Assim, essas categorias de impacto deveriam ser avaliadas em estudos de CB produzida nesse tipo de região.

No quadro 3 são apresentados as principais categorias de impactos e os aspectos ambientais relacionados a estas de um modo geral. Mostra-se também os aspectos da produção de CB que podem estar relacionados com estas categorias de impacto.

Quadro 4 – Categorias de impactos e principais aspectos relacionados.

Categorias de impacto	Principais aspectos	Aspectos relacionados a produção de CB
Mudanças climáticas	Emissões de CO2, CH4, N2O, HFCs, PFCs e SF6.	Produção da energia elétrica e de insumos agrícolas.
Toxicidade humana	Químicos, metais pesados e outras substâncias.	Produtos químicos utilizados no preparo do meio de cultivo e/ou purificação das películas de CB.
Uso da terra	Área ocupada ou transformada.	Meios de cultivo de origem agrícola.
Acidificação	SOx, NOx, HCl e NH3.	Efluentes gerados no processo
Eutrofização	compostos de nitrogênio (NO2, NO3, NH4, NH3), e fósforo (PO4, H3PO4, P2O5).	Efluentes gerados no processo
Ecotoxicidade	Químicos, metais pesados e outras substâncias.	Produção e transmissão da energia elétrica consumida; efluentes gerados no processo.
Depleção hídrica	Volume de água consuntiva (escassez física)	Consumo de água nos processos unitários de purificação e neutralização e produção da energia elétrica consumida; Tratamento de efluentes;

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.4.4 Interpretação

A interpretação ajuda a tornar o resultado mais compreensível, além de destacar as limitações da metodologia ou do sistema avaliado (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010). Na interpretação de um estudo de ACV, os resultados da AICV devem responder ao objetivo do estudo, na tentativa de responder as perguntas formuladas nesta etapa. Para isto devem ser realizadas algumas análises como a de incerteza e de sensibilidade no intuito de garantir a confiabilidade do resultado da avaliação. Na análise de incerteza é checado os efeitos da imprecisão dos dados nos resultados da AICV, enquanto que na análise de sensibilidade é identificado quais pressupostos assumidos no estudo

(ex: fonte de energia e tipo de reagente) podem mudar e como essa mudança afeta os resultados da avaliação.

No processo de produção de CB a etapa de interpretação tem um papel muito importante, pois a partir dela é possível identificar as possibilidades de melhoria do processo. Além disso é recomendável que seja realizada tanto a análise de incerteza quanto a de sensibilidade uma vez que processos em fase de desenvolvimento tendem a maiores variações e incertezas.

As bases de dados, como o Ecoinvent (FRISCHKNECHT et al., 2005), sempre fornecem um valor médio para cada entrada e saída que pode ser definido como o "melhor palpite" dentro de uma amostragem de muitas medições diferentes. Além do seu valor médio, cada entrada e saída possui um desvio padrão e a indicação de uma função estatística que segue. Esses dados (valor médio, desvio padrão e função estatística) são necessários para realização da avaliação de incerteza.

Quando se gera um inventário, muitas vezes os dados são oriundos da literatura ou de entrevistas sendo referentes a um valor médio, não estando disponíveis o desvio padrão. Nesse caso, pode utilizar a matriz Pedigree (WEIDEMA; WESNAES, 1996), para estimar os desvios padrão. Na matriz Pedigree cada ponto de dados é avaliado com base em seis critérios mais o fator básico de incerteza (que depende do tipo de dados). Um desses critérios é a correlação tecnológica, que consegue estimar os desvios padrão de dados de processos em escala de laboratório como o da produção de CB. Os outros critérios são referentes a confiança, integralidade, correlação geográfica e correlação temporal.

O método mais utilizado para avaliação da incerteza em ACV é o de Monte Carlo. Na abordagem de Monte Carlo números aleatórios são gerados a partir dos dados de média, desvio padrão e função estatística para cada dados de entrada e saída dos vários processos que compõem um estudo de ciclo de vida de um produto. Assim, diversas simulações podem ser realizadas, gerando vários resultados de impactos. Ao final, avalia-se estatisticamente esses resultados, obtendo-se um valor médio e desvio padrão para cada categoria de impacto.

4.1.5 Considerações finais

As pesquisas recentes sobre a celulose bacteriana (CB) têm mostrado que este é um biomaterial bastante promissor para uma variedade de aplicações. Entretanto, a revisão de trabalhos nesse tema permitiu constatar que ainda não foram realizados estudos sobre o desempenho ambiental do processo produtivo.

O presente trabalho pontuou as quatro etapas de uma avaliação ambiental baseada na ACV, destacando as principais questões a serem consideradas em estudos futuros de desempenho ambiental da CB. Quanto a definição do objetivo e escopo, processos em desenvolvimento como o da produção de CB devem priorizar a identificação dos pontos críticos do processo, assim um estudo do tipo "berço ao portão" é mais apropriado. Além disso, para um processo em escala de laboratório a unidade funcional de produção de 1g de CB/dia é a mais indicada. A coleta de dados para a construção para a construção do inventário é uma atividade laboriosa que requer bastante atenção quanto a disponibilidade e confiabilidade dos dados. No que se trata da AICV, é indicada a escolha de categorias de abrangência global, uma vez que o processo ainda não foi estabelecido em uma região especifica. Por fim, a etapa de interpretação permite identificar as possibilidades de melhoria do processo bem como as limitações e recomendações para o estabelecimento do processo com melhor desempenho ambiental.

Dessa forma, apesar das limitações associadas a execução de uma avaliação ambiental de um processo em desenvolvimento, conclui-se que um estudo de ACV é uma ferramenta que pode contribuir de forma significativa para estabelecimento de um processo baseado no desenvolvimento sustentável antes da sua produção maciça em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 14025:** Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALGAR, I. et al. Pineapple agroindustrial residues for the production of high value bacterial cellulose with different morphologies. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 1, p. 1–8, 2015.

BILGI, E. et al. Optimization of bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus using carob and haricot bean. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 90, p. 2–10, 2016.

BROWN, A. J. Brown on acetic ferment. **Journal of the Chemical Society, Transactions**, v. 49, p. 432–439, 1886.

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

CAMPANO, C. et al. Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. **Cellulose**, v. 23, n. 1, p. 57–91, 2016.

CAVALCANTI, L. M. et al. Efficacy of bacterial cellulose membrane for the treatment of lower limbs chronic varicose ulcers: a randomized and controlled trial. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**, v. 44, n. 1, p. 72–80, 2017.

CAVKA, A. et al. Production of bacterial cellulose and enzyme from waste fiber sludge. **Biotechnology for Biofuels**, v. 6, n. 1, p. 25, 2013.

CHEN, L. et al. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 464–468, 2013.

CHENG, Z. et al. Green synthesis of bacterial cellulose via acetic acid pre-hydrolysis liquor of agricultural corn stalk used as carbon source. **Bioresource Technology**, v. 234, p. 8–14, 2017.

COSTA, A. F. S. et al. Production of bacterial cellulose by Gluconacetobacter hansenii using corn steep liquor as nutrient sources. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, n. OCT, p. 1–12, 2017.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment. In: **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 2016. p. 1–28.

CZAJA, W. K. et al. The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications. **Biomacromolecules**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2007.

DONINI, Í. A. N. et al. Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. **Ecletica Quimica**, v. 35, n. 4, p. 165–178, 2010.

ERBAS KIZILTAS, E.; KIZILTAS, A.; GARDNER, D. J. . Synthesis of bacterial cellulose using hot water extracted wood sugars. **Carbohydrate Polymers**, v. 124, p. 131–138, 2015.

EUROPEAN COMMISSION - **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment**. [s.l], 2011.

FAN, X. et al. Production of nano bacterial cellulose from beverage industrial waste of citrus peel and pomace using Komagataeibacter xylinus. **Carbohydrate Polymers**, v. 151, p. 1068–1072, 2016.

FRISCHKNECHT, R. et al. The ecoinvent database: overview and methodological framework. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 1, p. 3–9, 2005.

GALLEGOS, A. M. A. et al. Bacterial cellulose: A sustainable source to develop value-added products - A review. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 5641–5655, 2016.

GOMES, F. P. . et al. Production of bacterial cellulose by Gluconacetobacter sacchari using dry olive mill residue. **Biomass and Bioenergy**, v. 55, p. 205–211, 2013.

GULLO, M. et al. Biotechnological production of cellulose by acetic acid bacteria: current

state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 16, p. 6885–6898, 2018.

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 2014.

HERVY, M. et al. Life cycle assessment of nanocellulose-reinforced advanced fibre composites. **Composites Science and Technology**, v. 118, p. 154–162, 2015.

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

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.

HUANG, C. et al. Using wastewater after lipid fermentation as substrate for bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus. **Carbohydrate Polymers**, v. 136, p. 198–202, jan. 2016.

INSTITUDO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O que é SICV Brasil?** Disponível em: <http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>. Acesso em: 2 out. 2018.

ISLAM, M. U. et al. Strategies for cost-effective and enhanced production of bacterial cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 102, p. 1166–1173, set. 2017.

JAHAN, F.; KUMAR, V.; SAXENA, R. K. . Distillery effluent as a potential medium for bacterial cellulose production: A biopolymer of great commercial importance. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 922–926, 2018.

JORFI, M.; FOSTER, E. J. Recent advances in nanocellulose for biomedical applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 14, 2015.

JOZALA, A. F. et al. Bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus by employing alternative culture media. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 3, p. 1181–1190, 2014.

JUNG, H. IL et al. *Production and characterization of cellulose by acetobacter sp. V6 using a cost-effective molasses-corn steep liquor medium. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 162, n. 2, p. 486–497, 2010.

KESHK, S. M. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications. **Journal of Bioprocessing & Biotechniques**, v. 4, n. 2, p. 1–10, 2014.

KESTERS, K. et al. The Family Acetobacteraceae: The Genera Acetobacter, Acidomonas, Asaia, Gluconacetobacter, Gluconobacter, and Kozakia. In: DWORKIN, Martin (Ed.) **THE PROKARYOTES**. [s.l: 2006]. p. 163–200.

KHATTAK, W. A. et al. Production, Characterization and Physico-mechanical Properties of Bacterial Cellulose from Industrial Wastes. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 23, n. 1, p. 45–53, 2015.

KLEMM, D. et al. Bacterial synthesized cellulose - Artificial blood vessels for microsurgery. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 26, n. 9, p. 1561–1603, 2001.

KRALISCH, D.; OTT, D.; GERICKE, D. Rules and benefits of Life Cycle Assessment in green chemical process and synthesis design: a tutorial review. **Green Chemistry**, v. 17, n. 1, p. 123–145, 2015.

KUMBHAR, J. V.; RAJWADE, J. M.; PAKNIKAR, K. M. Fruit peels support higher yield and superior quality bacterial cellulose production. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 16, p. 6677–6691, 2015.

KWAK, M. H. et al. Bacterial cellulose membrane produced by Acetobacter sp. A10 for burn wound dressing applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 122, p. 387–398, 2015.

LAVOINE, N. et al. Microfibrillated cellulose - Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 90, n. 2, p. 735–764, 2012.

LI, Z. et al. Production of nano bacterial cellulose from waste water of candied jujube-processing industry using Acetobacter xylinum. **Carbohydrate Polymers**, v. 120, p. 115–119, 2015.

LIMA, H. L. S. et al. Bacterial cellulose production by Komagataeibacter hansenii ATCC 23769 using sisal juice - An agroindustry waste. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 3, p. 671–680, 2017.

LIN, D. et al. Production of bacterial cellulose by Gluconacetobacter hansenii CGMCC 3917 using only waste beer yeast as nutrient source. **Bioresource Technology**, v. 151, p. 113–119, 2014.

LIN, S. P. et al. Biosynthesis, production and applications of bacterial cellulose. **Cellulose**, v. 20, n. 5, p. 2191–2219, 2013.

LIN, Y.-C. et al. **Cosmetic composition containing fragments of bacterial cellulose filmand method for manufacturing thereof.** US nª 20150216784A1, 2015. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20150216784A1/en>

LUDWICKA, K. et al. Medical and Cosmetic Applications of Bacterial NanoCellulose. In: **Bacterial Nanocellulose: From Biotechnology to Bio-Economy**. [s.l.] Elsevier B.V., 2016. p. 145–165.

MACHADO, R. T. A. et al. Komagataeibacter rhaeticus grown in sugarcane molasses-supplemented culture medium as a strategy for enhancing bacterial cellulose production. **Industrial Crops and Products**, v. 122, n. May, p. 637–646, 2018.

MOURAD, A. L. et al. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**.

Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

MULLER, A. et al. The Biopolymer Bacterial Nanocellulose as Drug Delivery System: Investigation of Drug Loading and Release using the Model Protein Albumin. **Journal of pharmaceutical sciences**, v. 102, n. 2, p. 579–592, 2013.

NEERA; RAMANA, K. V.; BATRA, H. V. Occurrence of Cellulose-Producing Gluconacetobacter spp. in Fruit Samples and Kombucha Tea, and Production of the Biopolymer. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 176, n. 4, p. 1162–1173, 2015.

PACHECO, C.- et al. Celulosa bacteriana en gluconacetobacter xylinus: síntesis y aplicaciones. **Red de Revistas Cientificas de America Latina, el Caribe, Espana y Portugal**, v. 7, n. 1, p. 18–25, 2004.

PAXIMADA, P. et al. Bacterial cellulose as stabilizer of o/w emulsions. **Food Hydrocolloids**, v. 53, p. 225–232, 2016.

PENNINGTON, D. W. et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 721–739, 2004.

PINTO, E. R. P. et al. Transparent composites prepared from bacterial cellulose and castor oil based polyurethane as substrates for flexible OLEDs. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 3, n. 44, p. 11581–11588, 2015.

QIU, Y. et al. Bacterial cellulose and bacterial cellulose-vaccarin membranes for wound healing. **Materials Science and Engineering C**, v. 59, p. 303–309, 2016.

RAJWADE, J. M.; PAKNIKAR, K. M.; KUMBHAR, J. V. Applications of bacterial cellulose and its composites in biomedicine. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 6, p. 2491–2511, 2015.

RANI, M. U.; RASTOGI, N. K.; ANU APPAIAH, K. A. Statistical optimization of medium composition for bacterial cellulose production by Gluconacetobacter hansenii UAC09 using coffee cherry husk extract - an agro-industry waste. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 21, n. 7, p. 739–745, 2011.

REBITZER, G. et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

REINIATI, I.; HRYMAK, A. N. .; MARGARITIS, A. Recent developments in the production and applications of bacterial cellulose fibers and nanocrystals. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 37, n. 4, p. 510–524, 19 maio 2017.

SHI, Z. et al. Utilization of bacterial cellulose in food. **Food Hydrocolloids**, v. 35, p. 539–545, 2014.

SHODA, M.; SUGANO, Y. Recent advances in bacterial cellulose production. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2005.

TSOUKO, E. et al. Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 12, p. 14832–14849, 2015.

TYAGI, N.; SURESH, S. Isolation and characterization of cellulose producing bacterial strain from orange pulp. **Adv. Mater. Res. (Durnten-Zurich, Switz.)**, v. 626, p. 475–479, 6 pp., 2013.

TYAGI, N.; SURESH, S. Production of cellulose from sugarcane molasses using Gluconacetobacter intermedius SNT-1: Optimization & characterization. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 71–80, 2016.

VELÁSQUEZ-RIAÑO, M.; BOJACÁ, V. Production of bacterial cellulose from alternative low-cost substrates. **Cellulose**, v. 24, n. 7, p. 2677–2698, 27 jul. 2017.

WANG, B. et al. Use of heparinized bacterial cellulose based scaffold for improving angiogenesis in tissue regeneration. **Carbohydrate Polymers**, v. 181, p. 948–956, fev. 2018.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3–4, p. 167–174, 1996.

YANG, X. Y. et al. Bacterial cellulose production from the litchi extract by Gluconacetobacter xylinus. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 46, n. 1, p. 39–43, 2016.

ZAMPORI, L. et al. **Guide for interpreting life cycle assessment result Publications Office of the European Union**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/guide-interpreting-life-cycle-assessment-result>.

ZENG, X.; SMALL, D. P.; WAN, W. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by Acetobacter xylinum BPR 2001 from maple syrup. **Carbohydrate Polymers**, v. 85, n. 3, p. 506–513, 2011.

4.2 ARTIGO 2

ECODESIGN DA PRODUÇÃO DE CELULOSE BACTERIANA EM DIFERENTES MEIOS DE CULTIVO

Resumo: A celulose bacteriana (CB) sintetizada por algumas espécies de bactérias é um biopolímero com amplas possibilidades de aplicações. No entanto, seu custo de produção é elevado, principalmente devido ao uso de meios de cultura sintéticos. Nos últimos anos, o processo tem sido otimizado por meio do uso de meios de cultura alternativos. O uso de resíduos agroindustriais ou coprodutos, como o melaço de soja (MS), têm se mostrado promissor para a produção de CB. Entretanto, não se sabem os impactos ambientais que podem estar associados a esse processo. Esse estudo compara os impactos de duas rotas desenvolvidas em escala laboratorial para produção de CB no meio de cultura MS. Também compara essas rotas com outras duas utilizando meio sintético HS e suco de caju. Utilizou-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas ISO 14040 e 14044. A fronteira dos sistemas avaliados é do tipo berço ao portão e a unidade funcional adotada foi a produção de 1g de CB por dia. Os dados de inventário da produção de CB foram levantados em laboratório e os relativos a produção de insumos (água, eletricidade, reagentes), provenientes da base de dados do ecoinvent versões 2.2 e 3.0 e Agri-Footprint versão 1.0. Os impactos ambientais foram avaliados pelo método ILCD 2011 para as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, acidificação, depleção hídrica, eutrofização marinha e de água doce, ecotoxicidade de água doce, toxicidade humana câncer e não câncer. Os processos unitários avaliados foram: manutenção do microrganismo, pré-ativação, ativação, preparo do meio de cultivo, cultivo estático, purificação, neutralização e secagem das películas. Ao serem comparados entre si, os impactos da rota MSD são significativamente menores que os da rota MSH em metade das categorias avaliadas (eutrofização marinha e de água doce, acidificação e mudanças climáticas). Quando essas rotas são comparadas com a produção em meio HS e em suco de caju, ambas as rotas MSD e MSH são menos impactantes na maioria das categorias avaliadas. Essas comparações permitiram focar nas rotas MSD e MSH, buscando-se redução de impactos a partir de alterações em processos. Observou-se que na rota de produção de CB em MS hidrolisado (MSH), a etapa do cultivo estático é a que mais contribui para os impactos em todas as categorias avaliadas, exceto para a depleção hídrica, na qual as etapas mais expressivas são a purificação e neutralização das películas de CB. Já na rota com melaço de soja diluído (MSD), a etapa de preparo do meio é a mais expressiva para a maioria das categorias avaliadas, seguida

da etapa de cultivo estático. Assim, cenários alternativos de produção foram definidos para as rotas MSD e MSH. A análise desses cenários em relação aos de referência indicaram que a substituição da energia elétrica pela energia solar, do meio HS por meio a base de melaço de soja e a purificação com NaOH associado ao H2O2 não levaram a redução dos impactos ambientais das rotas avaliadas.

4.2.1 Introdução

A celulose sintetizada por bactérias do ácido acético, como as do gênero *Komagataeibacter*, têm atraído a atenção da comunidade científica e de diversos segmentos da indústria. Nos últimos anos, diversos estudos têm avaliado a sua aplicação na área alimentícia, cosmética, eletrônica e, especialmente na área biomédica. Nesta última, alguns produtos já estão comercialmente disponíveis, como os curativos para lesões epidérmicas Nexfill® (Fibrocel Produtos Biotecnológicos - Brasil) (LUDWICKA *et al*., 2016).

No entanto, mesmo com as intensas pesquisas, ainda não foi estabelecido um processo produtivo de CB que possa atender a demanda por este produto, além do fato de que esse processo ainda apresenta um custo elevado devido ao uso de meio fermentativo sintético (HS) (GOMES *et al*., 2013). Diante disso, muitos esforços têm sido dedicados na investigação de um meio de cultivo que seja capaz de promover alta produção de CB de boa qualidade e com menor custo.

Diversos resíduos e coprodutos de outros processos industriais e agrícolas tiveram seus potenciais avaliados e muitos deles conseguiram cumprir os requisitos para a produção de CB (BILGI *et al*., 2016; CARREIRA *et al.*, 2011; MOHAMMADKAZEMI; AZIN; ASHORI, 2015). Agora, o desafio dos pesquisadores é escolher qual deles representa maiores benefícios. Um critério que pode ajudar nessa escolha é o ambiental, a partir da avaliação dos impactos ambientais relacionados a rotas de produção de CB.

A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a ferramenta mais indicada para avaliação de processos e produtos. A ACV pode ser utilizada para comparar rotas tecnológicas e produtos, assim como para identificar pontos críticos e apoiar a melhoria contínua de processos e produtos quando em desenvolvimento. Assim, é indicada para avaliação comparativa dos diversos processos produtivos de CB, identificando os menos impactantes, assim como para apontar pontos críticos que devem ser estudados para sugerir melhorias no processo.

Até o presente momento, não há nenhuma avaliação ambiental dos processos de produção de CB disponível em artigos científicos. Estudo realizado por Hervy e colaboradores (2015) avaliou os impactos ambientais relacionados ao desenvolvimento de um compósito epóxi reforçado com celulose bacteriana e nanocelulose microfibrilada. No entanto, esse estudo não focou na produção de CB e não apresentou um inventário de aspectos e impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida desse produto.

Esse estudo avalia o impacto ambiental de duas rotas de produção de CB em escala laboratorial, utilizando o melaço de soja como matéria-prima do meio fermentativo: i) rota com melaço de soja hidrolisado (MSH) e com melaço de soja diluído (MSD). Além disso, esse o estudo compara essas rotas com outras duas: uma utilizando suco de caju suplementado como meio fermentativo e outra utilizando o meio sintético (HS) descrito por Hestrin & Schram (1954), o qual é considerado o meio referência para a produção de CB. Esta comparação visa identificar quais rotas apresentam os menores impactos ambientais para que se possa identificar seus pontos críticos e propor melhorias.

Esse trabalho de ecodesign apoia a tomada de decisão de pesquisadores e indústrias que produzem CB, indicando rotas menos impactantes, propondo e avaliando alternativas de produção.

4.2.2 Metodologia

4.2.2.1 Objetivo, unidade funcional e fronteiras do sistema

Esse estudo de ACV foi realizado em conformidade com as normas técnicas NBR ISO 14040 (2014a) e 14044 (2014b).Teve como objetivo comparar rotas de obtenção de CB, avaliar os pontos críticos de duas rotas com menor impacto, indicar e avaliar oportunidades de redução de impactos nessas rotas. As seguintes rotas foram avaliadas: i) melaço de soja diluído (MSD); ii) melaço de soja hidrolisado (MSH); iii) suco de caju e iv) meio sintético HS.

A unidade funcional utilizada foi a produção de 1 g de CB /dia. Essa unidade é adequada para identificar as etapas críticas nos processos avaliados como para a comparação com os processos de produção alternativos.

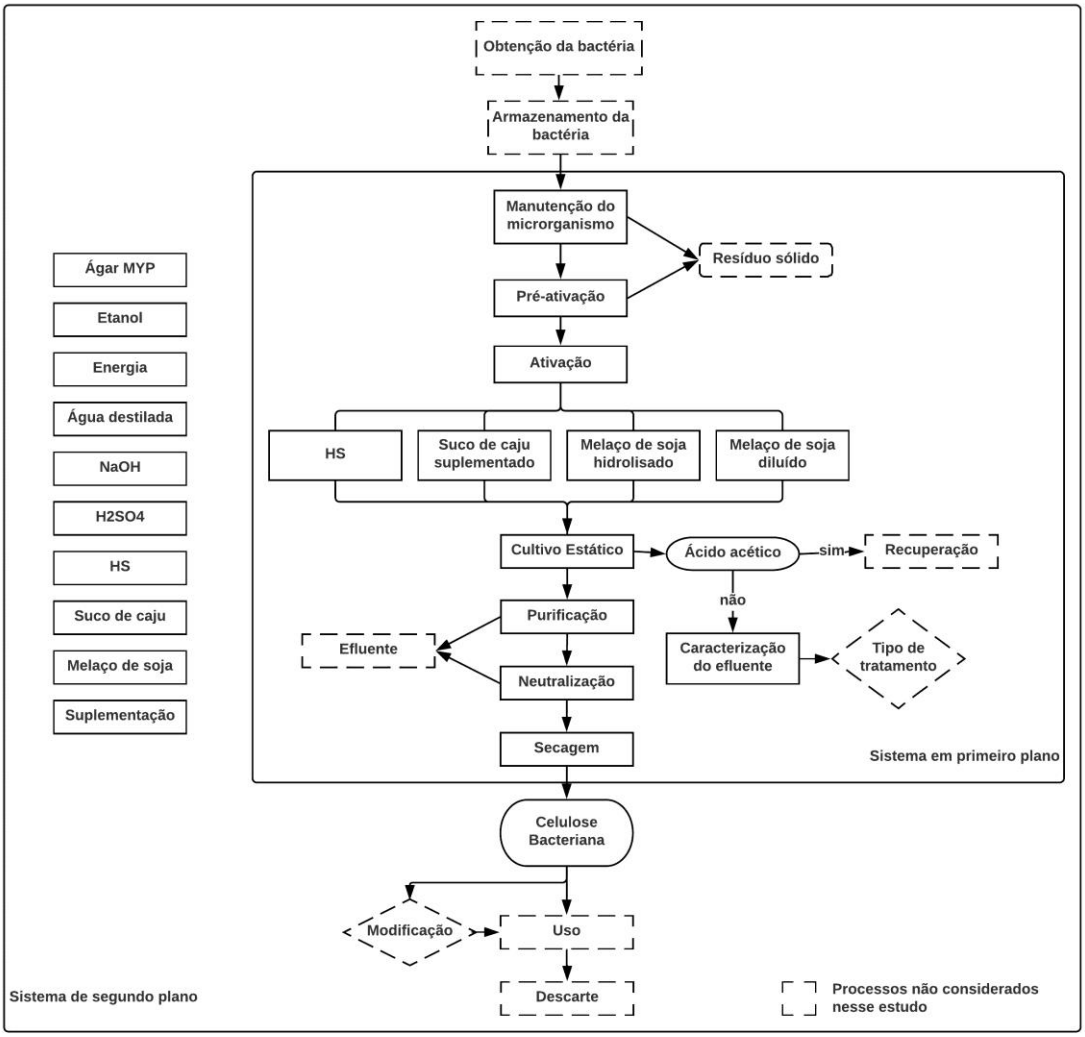
O escopo desse estudo foi do berço ao portão, incluindo as etapas de extração de matérias-primas, produção dos insumos e fornecimento de energia elétrica, e produção de CB. A produção de CB é composta pelos seguintes processos unitários: manutenção do microrganismo, pré-ativação, ativação, preparo do meio de cultivo, cultivo estático,

purificação, neutralização e secagem das películas. As rotas de produção de CB analisadas nesse trabalho contemplam esses processos, porém, variando as condições de produção, como detalhando na seção 3.2.2.2.

As etapas de modificação de CB, utilização e descarte não foram consideradas nesse trabalho, pois só é possível comtemplar um sistema mais abrangente em ACV de processos em escalas mais avançadas de desenvolvimento ou já estabelecidos.

Na figura 1 é apresentado um sistema de produto comum as rotas de produção de CB analisadas nesse estudo. Destaca-se o sistema de primeiro plano, que é a produção de CB, e o sistema de segundo plano, que integra os processos de produção dos insumos (energia e materiais utilizados no processo de primeiro plano).

Figura 1 – Sistema de produto genérico para a produção de celulose bacteriana



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.2 Descrição das rotas de produção de CB em diferentes meios de cultivo

No quadro 1 são descritas as rotas para a produção de CB avaliadas nesse estudo: melaço de soja hidrolisado (MSH), melaço de soja diluído (MSD), sintético de referência (HS), e suco de caju suplementado (SCS).

Além de utilizarem diferentes meios de cultivos, as rotas avaliadas diferem também em alguns aspectos. Quanto a origem da bactéria, as rotas HS, SCS e MSH utilizaram cepas padrão da *American Type Culture Collection* (ATCC) e a rota MSD utilizou uma cepa isolada de caldos de fermentação de uma indústria de vinagre de frutas e cereais. Essa bactéria foi isolada, identificada e utilizada na produção de CB. Quanto a quantidade de inóculo, as rotas HS e SCS utilizaram 3% (v/v) de inoculo, enquanto que as rotas MSD e MSH utilizaram 10% (v/v). Já quanto a suplementação, apenas as rotas MSD e MSH adicionaram etanol ao meio de cultivo. O tempo de cultivo estático foi de 10 dias para as rotas HS, SCS e MSH, já para MSD esse tempo foi de 14 dias. Na purificação as rotas HS, SCS e MSH utilizaram o NaOH 2% e a rota MSD NaOH 4%, variando também a quantidade de repetição do processo e a temperatura em que esta ocorre. Por fim, essas rotas diferem também quanto a temperatura de secagem, sendo que a rota MSD utiliza maior temperatura (105ºC) e menos tempo (8h) que as demais.

Quadro 4 - Descrição da produção de CB em diferentes meios de cultivo

(continua)

Processo unitário/etapa	Meio Hestrin&Schram **(HS de referência)**	Suco de caju suplementado **(SCS)**	Melaço de soja diluído (**MSD)**	Melaço de soja hidrolisado **(MSH)**
Manutenção do microrganismo	Cepa de *K. xylinus* ATCC 53582 cultivada em caldo HS esterilizado a 30ºC por 48h em incubadora B.O.D e mantido sobre refrigeração (4 à 6ºC) até posterior utilização.	Cepa de *K. xylinus* ATCC 53582 cultivada em caldo HS esterilizado a 30ºC por 48h em incubadora B.O.D e mantido sobre refrigeração (4 à 6ºC) até posterior utilização.	Bactérias isoladas a partir de caldos de fermentação de vinagres de frutas e cereais, obtidos junto à indústria e isolados por esgotamento em placas de Petri com ágar MYP e incubados em incubadora B.O.D a 30ºC por 120h.	Repique da cepa da *K. xylinus* ATCC 53582 em tubos Falcon de 15 mL com ágar HS inclinado e incubado a 30ºC por 72h e mantido sobre refrigeração (4 à 6ºC) até posterior utilização.
Pré-ativação	Cepa de *K. xylinus* ATCC 53582 pré-ativada em caldo HS esterilizado e incubado a 30ºC por 72h em incubadora B.O.D.	Cepa de *K. xylinus* ATCC 53582 pré-ativada em caldo HS esterilizado e incubado a 30ºC por 72h em incubadora B.O.D.	Repique das colônias em frascos com HS estéril e cultivados por 10 dias a 30ºC, em condições estáticas.	Repique das colônias do tubo Falcon de 15mL para tubo Falcon de 50mL com ágar HS inclinado e incubado a 30ºC por 72h para obtenção do inóculo.
Ativação/Obtenção do inóculo	Cepa de *K. xylinus* ATCC 53582 ativada em caldo HS esterilizado e incubado a 30ºC/96h em incubadora B.O.D.	Adicionou-se 3% (v/v) da cultura em meio HS esterilizado e incubou-se a 30°C por 72 horas.	Após crescimento, 10% de inóculo foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 250 mL, contendo melaço de soja estéril, diluído a 20º Brix, e 2% de etanol de soja, totalizando o volume final de fermentação de 50 mL.	Após o período de incubação, transferiu-se a cultura por raspagem para frasco Schott contendo 100 mL de caldo HS e incubado a 30 °C por um período de 72 h.
Preparo do meio de cultivo	Meio descrito por Hestrin e Schramm (1954) composto por 20 g/L de glicose, 5 g/L de peptona, 5 g/L de extrato de levedura, 1,15 g/L ácido cítrico e 2,7 g/L de Na_2HPO_4.	Suco de caju diluído com água destilada (1:6) e suplementado 5 g/L de peptona e 5 g/L de extrato de levedura e ajustou-se o pH entre 5,0 e 5,5.	Melaço de soja estéril, diluído a 20 ºBrix.	75 g de melaço de soja diluído em 1L de água destilada adicionado de 2,66 mL de H_2SO_4 P.A e aqueceu-se a 90 °C por 10 min. Ajuste de pH para 6,0 com NaOH a 30% (m/v) e filtração do meio hidrolisado em bomba à vácuo.

Quadro 4 - Descrição da produção de CB em diferentes meios de cultivo

(conclusão)

Processo unitário/etapa	Meio Hestrin&Schram **(HS de referência)**	Suco de caju suplementado **(SCS)**	Melaço de soja diluído (**MSD)**	Melaço de soja hidrolisado **(MSH)**
Cultivo estático	Adicionou-se 3% (v/v) de inóculo em frascos Schott (250 mL) com 70 mL de meio HS e cultivou-se em incubadora B.O.D a 30°C por 10 dias em condições estáticas.	Adicionou-se 3% (v/v) de inóculo em frascos Schott (250 mL) com 70 mL de suco de caju suplementado e cultivou-se em incubadora B.O.D a 30°C por 10 dias em condições estáticas.	Adicionou-se 10% (v/v) e 2% (v/v) de etanol de soja de inóculo em frascos Schott (500 mL) com 100 mL do meio descrito e cultivou-se em incubadora B.O.D a 30°C por 14 dias em condições estáticas.	Adicionou-se 10% (v/v) e 2% (v/v) de etanol em frascos Schott (250 mL) com 50 mL do melaço de soja hidrolisado (previamente esterilizado a 121°C por 15 minutos) e cultivou-se em incubadora B.O.D a 30°C por 10 dias em condições estáticas.
Purificação	Tratamento térmico alcalino da CB utilizando água a 100ºC nas duas primeiras lavagens e com solução de NaOH 2% (m/v) a 80ºC nas lavagens subsequentes, até a remoção completa de meio HS das películas de CB.	Tratamento térmico alcalino da CB em solução de NaOH 2% (m/v) a 80ºC por 1 hora. Repetição, em média, 5 vezes até coloração branca das películas.	Tratamento térmico alcalino da CB em solução de NaOH 4% (m/v) à 80ºC por 30 min.	Tratamento térmico alcalino da CB utilizando água a 90ºC por 40 min nas duas primeiras lavagens e com solução de NaOH 2% (m/v) a 90ºC por 1 hora nas lavagens subsequentes.
Neutralização	Sucessivas lavagens com água destilada, até neutralização do pH.	Sucessivas lavagens com água destilada, até neutralização do pH.	Sucessivas lavagens com água destilada, até neutralização do pH.	Sucessivas lavagens com água destilada, até neutralização do pH.
Secagem	Películas de CB secas em estufa a 50ºC por 24h.	Películas de CB secas em estufa a 50ºC por 24h.	Películas de CB secas em estufa a 105ºC por 8h.	Películas de CB secas em estufa a 50ºC por 24h.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2.3 Coleta de dados de inventário

4.2.3.1 Dados primários

Os dados primários relativos aos insumos utilizados nas rotas HS, SCS e MSH (Tabela 1) foram coletados no Laboratório de Microbiologia de Alimentos da Embrapa Agroindústria Tropical (LMA), Fortaleza – CE, Brasil entre agosto de 2015 e abril de 2018. Já os dados da rota MSD foram coletados no Laboratório de Prestação de Serviços - Análise de Alimentos - Universidade Estadual de Londrina, entre agosto de 2017 e novembro de 2017.

A contabilização dos insumos, como água e produtos químicos, além de cada processo unitário foi realizada por balanço de massa. Já o cálculo do consumo de energia foi realizado pela multiplicação da potência dos equipamentos pelo tempo que foram utilizados, seguida de definições a respeito da capacidade máxima do equipamento com relação à capacidade demandada por cada processo, como mostrado na Equação: Ce = Tu x Pot x Cpu/Cpmáx, onde: Ce - consumo de energia (kWh); Tu - tempo utilizado (h); Pot - potência (kW); Cpu - capacidade utilizada (L); Cpmáx: capacidade máxima (L).

A análise de efluentes foi realizada seguindo os parâmetros recomendados pelo *Standard Methods* (APHA, 2005) e utilizando como valores de referência o Artigo 11 da Resolução Coema N° 02 de 02 de fevereiro de 2017 (CEARÁ, 2017). Nas rotas HS e SCS os parâmetros analisados foram fósforo total, nitrogênio total, amônia e nitrato. Já para a rota MSH os parâmetros analisados foram fósforo total, nitrogênio total, amônia, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos suspensos, condutividade e pH.

Os inventários das rotas HS, MSD, MSH e SCS são apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 1 – Inventário da rota HS para 1g/dia

Entradas	Manutenção do microrganismo	Pré-ativação	Ativação/ Obtenção do inóculo	Cultivo estático	Purificação	Neutralização	Secagem
Produto CB (g)							1
Caldo HS (mL)	1,13	3,78	18,89	198,30	-	-	-
Água destilada (mL)	0,94	2,64	16,24	133,99	-	2921,00	-
Água (mL)	-	-	-	-	1107,97	-	-
Energia (kWh)	0,0009	0,0020	0,0123	0,5514	1,0434	-	0,0102
NaOH 2% (g)	-	-	-	-	55,48	-	-
Emissões para água							
Total (mL)	-	-	-	141,64	1213,09	2921,00	-
Fósforo total (mg)	-	-	-	248,26	-	-	-
Amônia (mg)	-	-	-	-	-	-	-
Nitrogênio total (mg)	-	-	-	32,86	-	-	-
Nitrato (mg)	-	-	-	63,45	-	-	-

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 2 – Inventário da rota MSD para 1g/dia

Entradas	Manutenção do microrganismo	Pré-ativação	Ativação/Obtenção do inóculo	Preparo do meio de cultivo	Cultivo estático	Purificação	Neutralização	Secagem
Produto CB (g)								1
Ácido acético (g)					0,002			
Caldo HS (mL)	-	1,00	9,03	-	-	-	-	-
Meio MYP ágar (mL)	2,01	-	-					
Água destilada (mL)	0,89	0,89	10,70	72,45	17,83	501,61	1805,78	-
Água (mL)	-	-	-	-	-	300,96	-	-
Energia (kWh)	0,0003	0,0004	0,0037	0,0004	0,0959	0,0002	-	0,0030
NaOH 4% (g)	-	-	-	-	-	3,76	-	-
Etanol 96% (g)	-	-	-	-	2,01	-	-	-
Melaço de soja (g)	-	-	-	27,87	-	-	-	-
Meio à base de MSD (mL)	-	-	-	-	100,32	-	-	-
Emissões para água								
Total (mL)	-	-	-	-	50,16	304,72	1805,78	-
Fósforo total (mg)	-	-	-	-	2,05	-	-	-
Amônia (mg)	-	-	-	-	28,09	-	-	-
Nitrogênio total (mg)	-	-	-	-	140,45	-	-	-
Nitrato (mg)	-	-	-	-	2,10	-	-	-
DBO (mg)	-	-	-	-	1108,55	-	-	-
DQO (mg)	-	-	-	-	5236,66	-	-	-
Sólidos suspensos (mg)	-	-	-	-	90,29	-	-	-

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 3 – Inventário da rota MSH para 1g/dia

Entradas	Manutenção do microrganismo	Pré-ativação	Ativação/Obtenção do inóculo	Preparo do meio de cultivo	Cultivo estático	Purificação	Neutralização	Secagem
Produto CB (g)								1
Caldo HS (mL)	0,86	2,86	14,29	-	-	-	-	-
Água destilada (mL)	0,57	2,00	3,43	142,86	11,43	2071,43	2571,43	-
Água (mL)	-	-	-	-	-	428,57	-	-
Energia (kWh)	0,0006	0,0020	0,0069	0,0132	0,5173	0,0014	-	0,0103
NaOH 30% (g)	-	-	-	1,47	-	-	-	-
NaOH 2% (g)	-	-	-	-	-	4,37	-	-
H_2SO_4 P.A	-	-	-	0,70				
Etanol 96% (g)	-	-	-	-	2,31	-	-	-
Melaço de soja (g)	-	-	-	10,71	-	-	-	-
Meio à base de MSH (mL)	-	-	-	-	142,86	-	-	-
Emissões para água								
Total (mL)					91,43	432,94	2571,43	-
Fósforo total (mg)	-	-	-	-	3,73	-	-	-
Amônia (mg)	-	-	-	-	51,20	-	-	-
Nitrogênio total (mg)	-	-	-	-	256	-	-	-
Nitrato (mg)	-	-	-	-	3,84	-	-	-
DBO (mg)	-	-	-	-	2020,57	-	-	-
DQO (mg)	-	-	-	-	9544,96	-	-	-
Sólidos suspensos (mg)	-	-	-	-	164,57	-	-	-

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4 – Inventário da rota SCS para 1g/dia

Entradas	Manutenção do microrganismo	Pré-ativação	Ativação/ Obtenção do inóculo	Preparo do meio de cultivo	Cultivo estático	Purificação	Neutralização	Secagem
Produtos CB (g)								1
Caldo HS (mL)	2,16	7,19	35,96	-	-	-	-	-
Água destilada (mL)	1,80	5,03	8,18	331,84	131,43	1467,10	4372,53	-
Energia (kWh)	0,0018	0,0037	0,0311	0,05	1,0498	2,6638	-	0,0065
NaOH 2% (g)	-	-	-	-	-	145,24	-	-
Suco de caju suplementado (mL)	-	-	-	-	400,97	-	-	-
Extrato de levedura	-	-	-	2,00	-	-	-	-
Peptona	-	-	-	2,00	-	-	-	-
Suco de caju filtrado	-	-	-	69,14	-	-	-	-
Emissões para água								
Total (mL)	-	-	-	-	267,89	2309,72	4372,53	-
Fósforo total (mg)	-	-	-	-	472,68	-	-	-
Amônia (mg)	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrogênio total (mg)	-	-	-	-	62,56	-	-	-
Nitrato (mg)	-	-	-	-	479,84	-	-	-

Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2.3.2 Dados secundários

Os dados de inventário relacionados a produção e ao transporte dos produtos químicos e eletricidade foram obtidos a partir das bases de dados do Ecoinvent v2.2 e v.3.0 (WEIDEMA *et al*. 2013), exceto os dados associados à produção do melaço de soja, que foram derivados da base de dados do Agri-footprint v. 1.0 (Blonk Agri-footprint BV 2014) (ver tabela 6) disponíveis no software SimaPro versão 8.5.2.0 (PRé-CONSULTANTS, 2017).

Foi considerado nesse estudo o mix da eletricidade brasileira em 2008, que inclui a transformação da voltagem alta para a média e a transmissão da eletricidade.

Tabela 5 – Fontes secundárias do estudo

Processo	**Nome do processo nas bases de dados**
Energia elétrica	Electricity, medium voltage {BR}| market for | Alloc Def, U (v 3.0.2.0)
Água da torneira	Water, unspecified natural origin, BR
Água destilada	Water, deionized, from tap water, at user {GLO}| market for | Alloc Def, U (v 3.0.2.1)
Hidróxido de Sódio	Sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant/RER U (v2.2)
Peptona	Protein concentrate, from whey, at fermentation/CH U (v2.2)
Extrato de levedura	Yeast paste, from whey, at fermentation/CH U (v 2.2)
Glicose	Sugar, from sugar cane, from sugar production, at plant/BR Mass (v 3.0.1.0)
Ácido cítrico	Citric acid {CN}| production | Alloc Def, U (v 3.0.1.0)
Fosfato dissódico	Sodium phosphate, at plant/RER U (v 2.2)
Ácido Sulfúrico	Sulfuric acid (98% H2SO4), at plant/RER Mass (v.2.2)
Etanol	Ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant/BR U (v2.2)
Melaço de soja	Soybean molasses, from crushing (solvent, for protein concentrate), at plant/BR Mass (v1.0)
Tratamento de efluente	Waste water treatment, domestic waste water according to the Directive 91/271/EEC concerning urban waste water treatment, at waste water treatment plant EU-27 S

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.3 Alocação

Na rota MSD foi verificado que o efluente apresentava pH ácido, portanto, realizou-se a análise da acidez expressa em ácido acético, por titulação da amostra com solução padrão de NaOH 0,1 M, contendo indicador fenolftaleína. Na ACV quando um processo dá origem a coprodutos, os impactos do processo devem ser distribuídos entre as saídas para evitar que

apenas o produto principal seja responsabilizado pelos impactos ambientais potenciais. Assim, realizou-se alocação mássica nesse processo, com 99,996 % dos impactos atribuídos a produção de CB e 0,004% a do ácido acético. Ressalta-se que, embora o ácido acético tenha sito considerado nessa rota, o processo de recuperação desse coproduto não foi considerado nesse estudo.

4.2.4 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

O método escolhido para a avaliação de impactos é o ILCD 2011 Midpoint V1.05, tendo sido consideradas 8 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 depleção de recursos hídricos.

4.2.4.1 Análise de erro ou incerteza

Nos modelos de ciclo de vida todos os dados possuem alguma incerteza e essas incertezas podem ter diferentes causas, como medições incertas, representatividade do dado para o problema real estudado, variações das informações, entre outros (GOEDKOOP *et al*., 2016). A variação desses dados pode ser descrita por uma distribuição, expressa como um intervalo ou desvio padrão e o efeito dessas incertezas no resultado da AICV pode ser determinado por métodos estatísticos como o método de Monte Carlo (GOEDKOOP *et al*., 2016; BAUMANN; TILLMAN, 2004). Para aplicar o método de Monte Carlo é necessário que as incertezas associadas aos dados sejam representadas por um tipo de distribuição padrão. A base de dados Ecoinvent, por exemplo, estima a distribuição padrão dos dados por meio da avaliação qualitativa das características desses dados com o auxílio da matriz Pedigree (WEIDEMA *et al.*, 2013) A partir dessa distribuição a simulação de Monte Carlo gera amostragens aleatórias, geralmente 1000 amostragens, que determinam a probabilidade do valor ‘real’ estar dentro de um determinado intervalo e assim consegue garantir a confiabilidade do resultado sem que seja necessário realizar novas medições dos dados.

O método de Monte Carlo também pode ser utilizado para a comparação de dois produtos ou processos. Neste caso, para cada amostragem aleatória é calculado quantas vezes o produto A apresenta melhor desempenho ambiental que o produto B (A < B), ou seja, o valor obtido pelo produto A é diminuído pelo valor do produto B (A - B). Se a diferença for

majoritariamente positiva, o produto A tem um impacto maior do que o produto B; se o resultado for principalmente negativo, o oposto é verdadeiro (GOEDKOOP *et al*., 2016).

4.2.4.2 Análise de sensibilidade

Os dados relativos à produção de glicose ainda não se encontram disponíveis nas bases de dados inseridas no SimaPro. Nesse caso foi considerado processos similares (proxy) de produção de açúcar de mesa. Para avaliar a influência desses insumos nos impactos ambientais das rotas MSD e MSH, realizou-se uma análise de sensibilidade variando a fonte do açúcar (cana de açúcar ou beterraba).

4.2.4.3 Análise de cenários

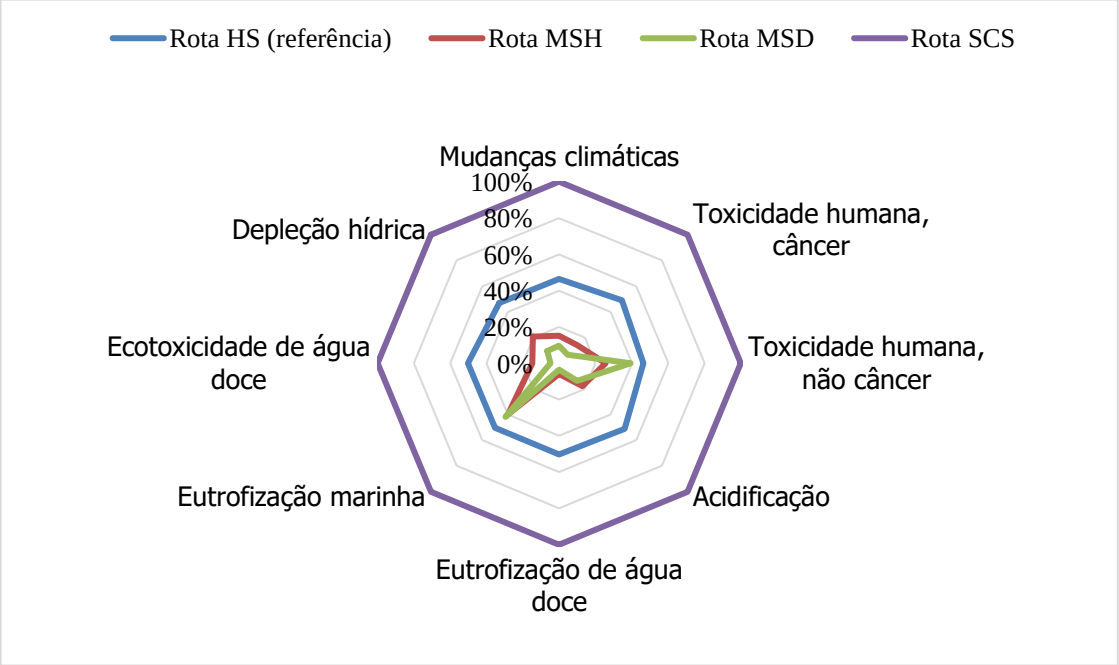
Por meio da análise de cenários é possível verificar quais mudanças em processos críticos podem levar a redução dos impactos ambientais atribuídos a esses (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Assim, após a identificação das rotas com melhor desempenho ambiental, foram identificados os processos unitários que mais contribuíram para os impactos e definidos cenários alternativos de produção.

4.2.5 Resultados e discussão

4.2.5.1 Análise comparativa das rotas para obtenção de CB

A comparação dos impactos ambientais das rotas de produção de CB é apresentada na figura 2. Ao analisar o gráfico observa-se que a rota SCS apresenta impactos em média 50% maiores do que a rota de referência para todas as categorias de impacto, logo infere-se que utilizar o SCS como meio de cultivo para produzir CB não representa redução dos impactos ambientais. Comparando-se a rota MSH com a rota de referência se observa que a rota MSH é em média 29,5% menos impactante. Já a rota MSD é em média 32,7% menor que a rota de referência e em média 6,8% menor que a rota MSH, exceto para a categoria de toxicidade humana não-câncer em que MSD é 13,8% mais impactante que a rota MSH, e para a categoria eutrofização marinha, na qual MSD é 1,9% mais impactante que a rota MSH.

Figura 2 - Comparação dos impactos ambientais das rotas em estudo



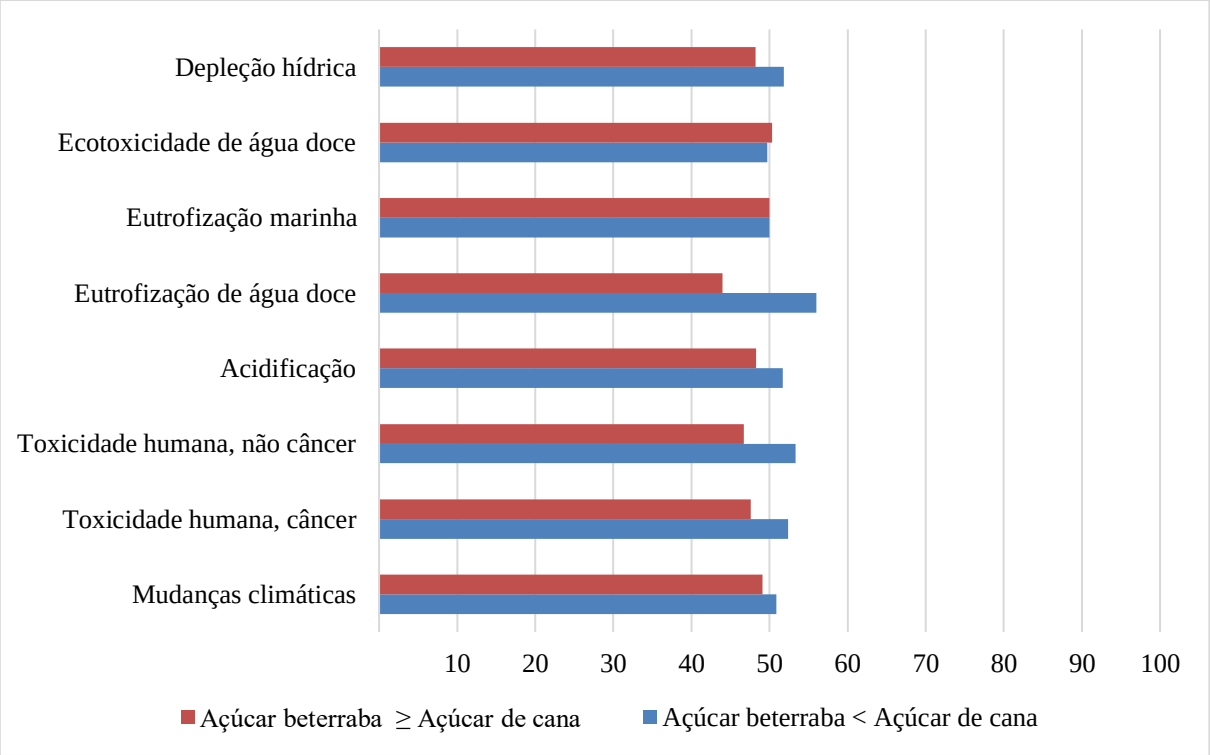
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.2 Análise de sensibilidade

O impacto da substituição do açúcar foi avaliado para as rotas MSD e MSH. Na figura 3 são apresentados os impactos ambientais da substituição do açúcar na rota em MSD. O resultado da análise permite afirmar que não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois açúcares avaliados. Isso ocorre porque a glicose é utilizada em pouca quantidade (20g/L) no preparo do meio HS. Como não há inventários relativos a produção desse insumo, a análise de cenários foi realizada no intuito de verificar se a mudança desse insumo traria alguma redução significativa dos impactos da produção de CB. Conclui-se que a substituição da origem do açúcar não reduziu os impactos da rota.

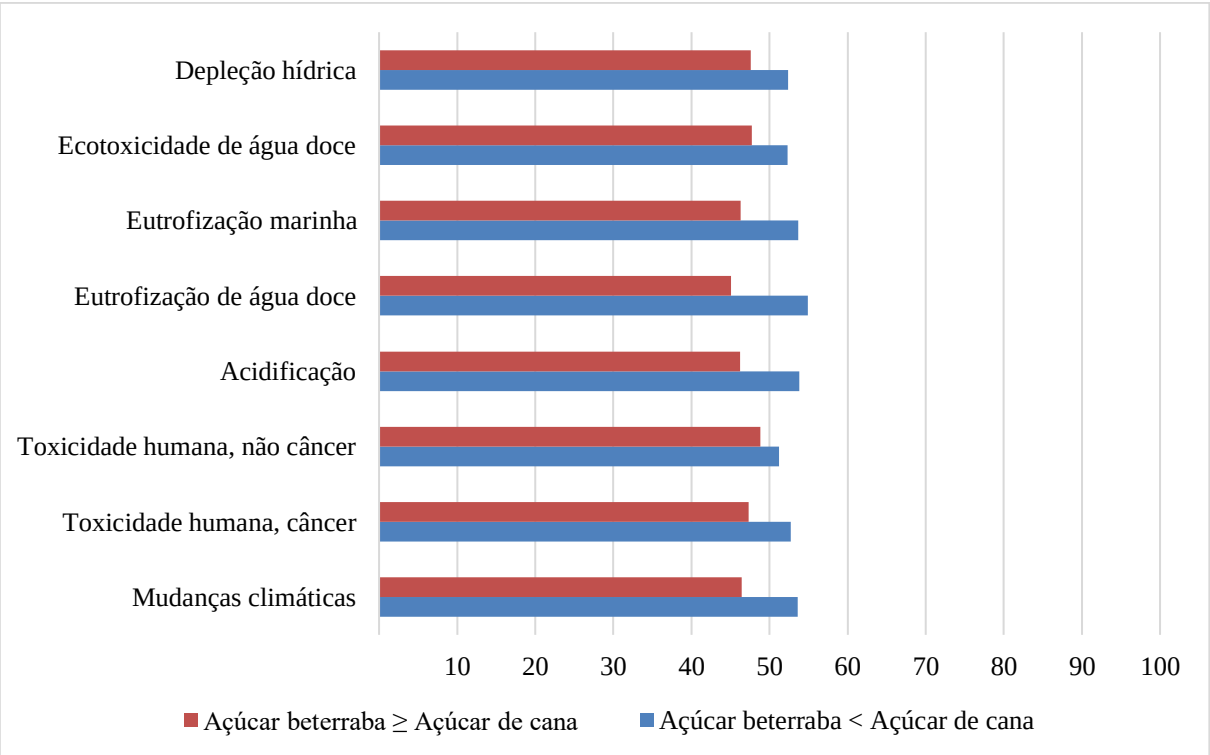
Assim como na análise de cenários para a rota MSD, a substituição do açúcar na rota MSH não acarretou em redução dos impactos ambientais do processo, uma vez que não há diferença estatisticamente significativa entre os dois insumos avaliados (figura 4).

Figura 3 – Análise de sensibilidade da substituição do açúcar na rota MSD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Análise de sensibilidade da substituição do açúcar na rota MSH.



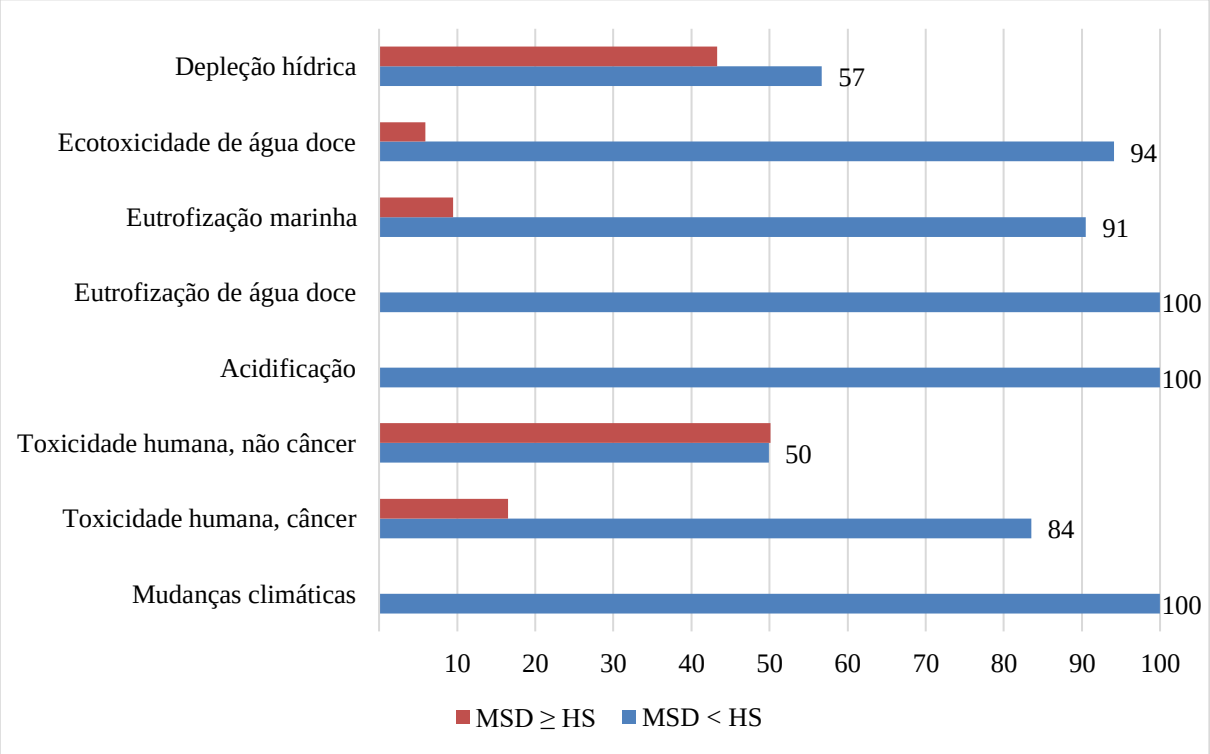
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.3 Análises de incerteza

4.2.5.3.1 Análise das rotas em MSD e HS (referência)

A comparação da produção em MSD e no meio de referência (HS) mostra que a rota MSD tem impactos ambientais significativamente menores do que a rota de referência HS em todas as categorias de impacto avaliadas. Os resultados da análise de incerteza entre a produção em MSD e em HS são apresentados na figura 5. A coluna MSD < HS representa a porcentagem de vezes em que os impactos da rota MSD foram menores que aqueles da rota HS para 1.000 execuções de simulação realizadas usando o método de Monte Carlo. Os resultados da simulação de Monte Carlo mostram que para as categorias de impacto eutrofização de água doce, acidificação e mudanças climáticas, a diferença entre os processos foi significativa (95% de nível de confiança), e que a rota MSD apresenta um desempenho melhor que a rota HS.

Figura 5 – Análise de incerteza das rotas MSD e HS.



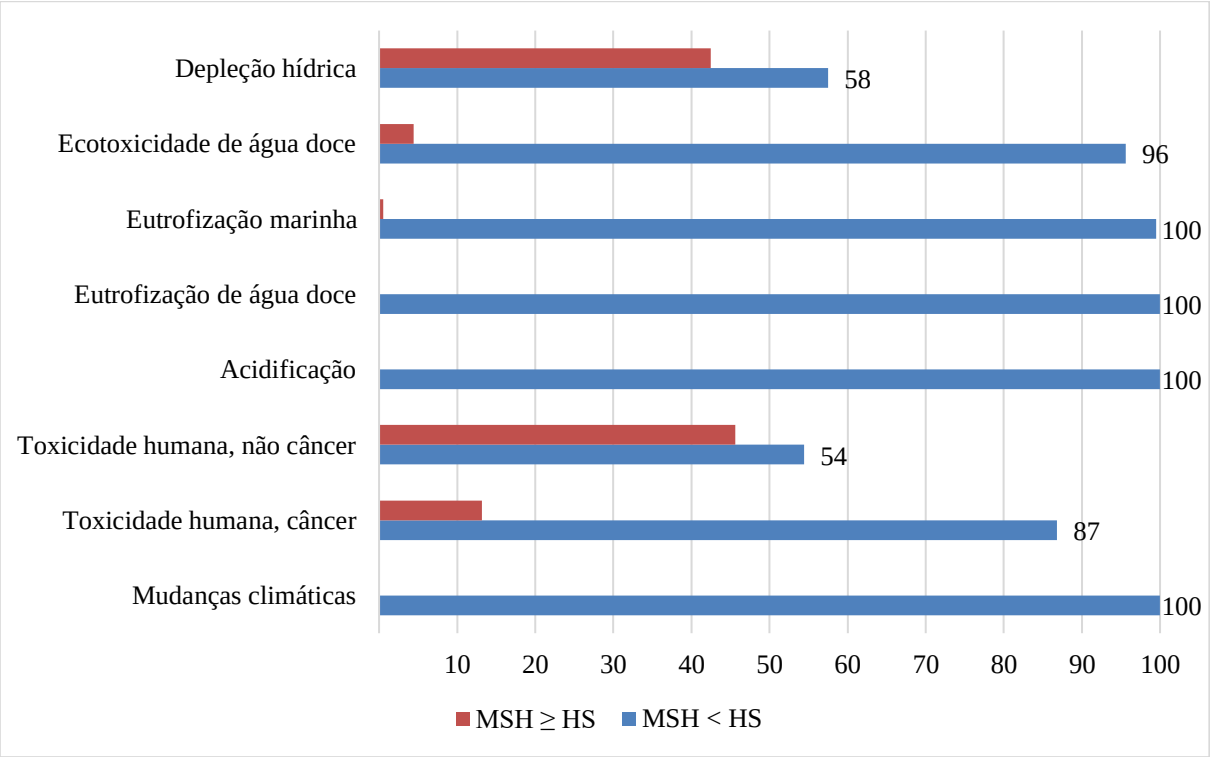
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.3.2 Análise das rotas em MSH e HS (referência)

A comparação da rota MSH e da rota de referência (HS) mostra que a CB produzida em MSH tem impactos ambientais significativamente menores do que a CB de HS em todas as categorias de impacto avaliadas. Os resultados da análise de incerteza pelo método de Monte

Carlo apresentados na figura 6 mostram que há diferença significativa (95% de nível de confiança) entre os processos para as categorias de impacto ecotoxicidade de água doce, eutrofização marinha e de água doce, acidificação e mudanças climáticas, a diferença entre os processos foi significativa e que a rota MSH apresenta melhor desempenho ambiental que a rota HS.

Figura 6 – Análise de incerteza das rotas MSH e HS.

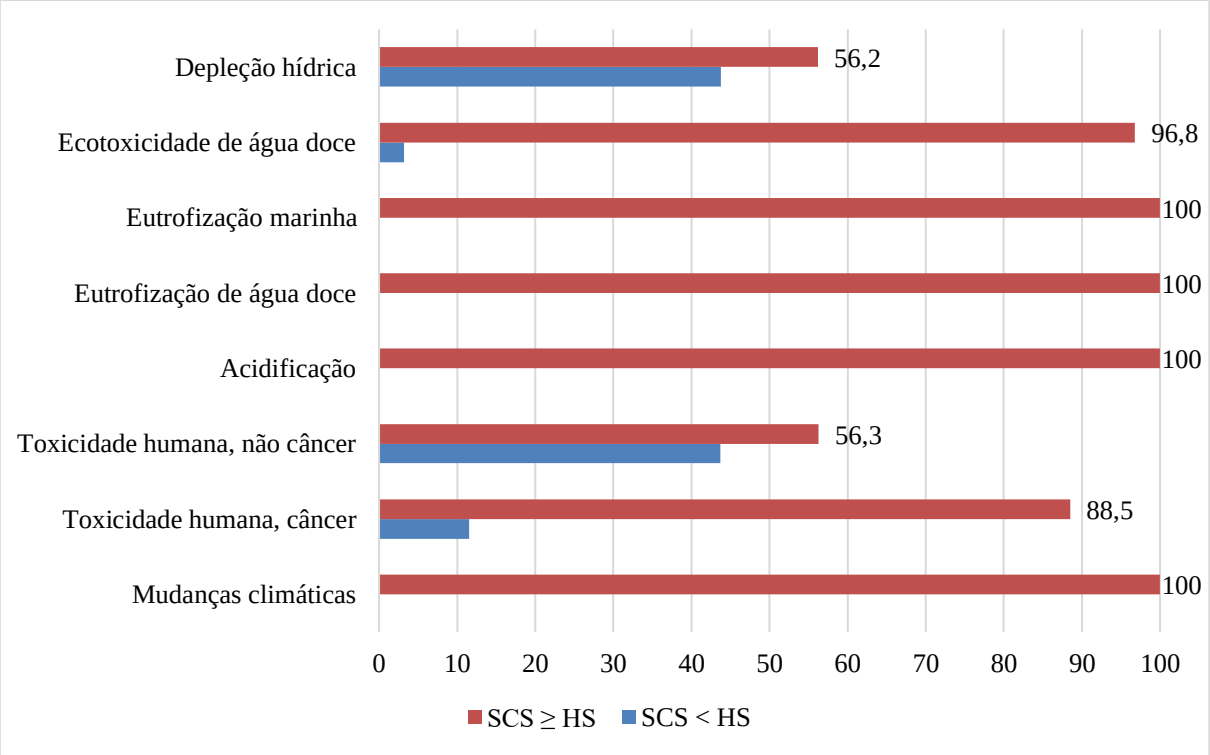


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.3.3 Análise das rotas SCS e HS (referência)

A rota SCS tem maiores impactos ambientais do que a rota de referência (HS) em todas as categorias avaliadas. Entretanto, para as categorias toxicidade humana câncer e não câncer e depleção hídrica não há diferença estatisticamente significativa entre os processos avaliados.

Figura 7 – Análise de incerteza das rotas SCS e HS.

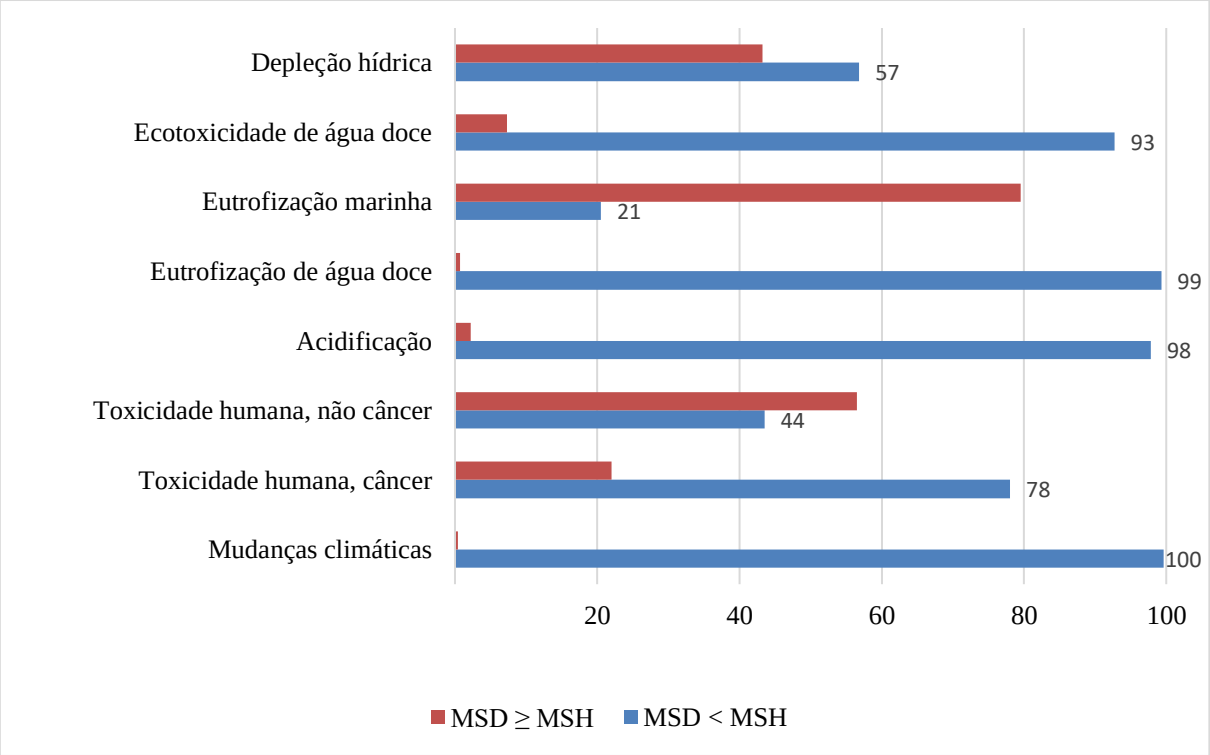


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.3.4 Análise das rotas MSD e MSH

Considerando que a produção de CB em melaço de soja mostrou-se mais vantajosa do que a produção de CB no meio de referência do ponto de vista ambiental, a comparação entre esses dois processos é importante para auxiliar na tomada de decisão sobre qual processo deve ser escalonado. Os resultados da análise de Monte Carlo mostram que há diferença estatisticamente significativa entre os processos nas categorias de eutrofização de água doce, acidificação e mudanças climáticas, nas quais a produção em MSD é menos impactante do que a de MSH (figura 8).

Figura 8 – Análise de incerteza das rotas MSD e MSH.



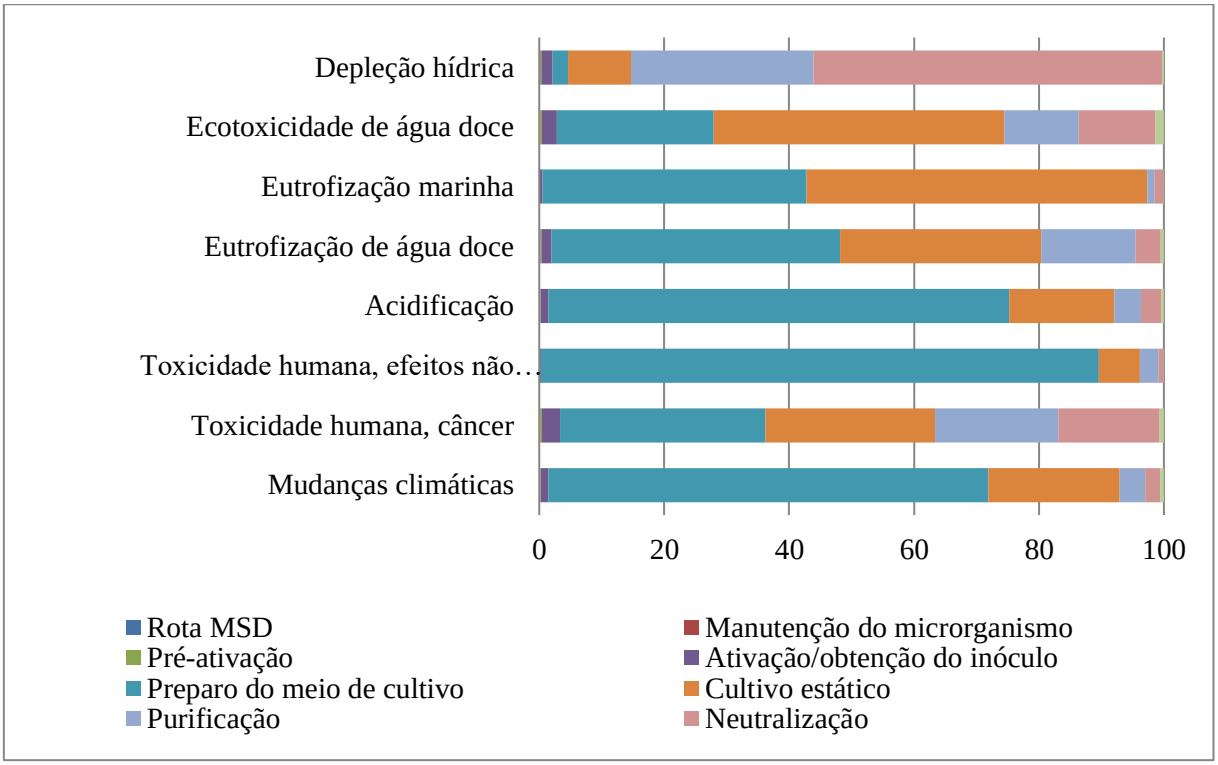
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.4 Análise de processos críticos nas rotas menos impactantes

4.2.5.4.1 Análise da rota MSD

O processo unitário de preparação do meio de cultivo é a etapa da produção de CB com maiores impactos na maioria das categorias de impacto avaliadas, exceto depleção hídrica, ecotoxicidade de água doce e eutrofização marinha, nas quais os impactos majoritários são os da etapa de neutralização e cultivo estático, respectivamente (figura 9).

Figura 9 – Contribuição dos processos unitários para os impactos ambientais da produção de 1g/dia de CB em melaço de soja diluído, em escala de laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O melaço de soja é o insumo que mais contribui para os impactos da etapa de preparo do meio de cultivo e considerando que esse insumo é um coproduto do processamento da soja para obtenção do óleo de soja e do farelo proteico, todos os impactos relacionados a cadeia produtiva desse insumo devem ser contabilizados. Assim, os impactos do melaço de soja estão relacionados principalmente com o cultivo da soja no campo (>38%) em todas as categorias de impactos avaliadas, exceto depleção hídrica.

Os impactos do cultivo da soja relacionado ao potencial de mudanças climáticas são impulsionados predominantemente pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2) durante a transformação da terra, seja ela pela conversão de áreas de florestas ou conversão do uso, e também pelas emissões de óxido nitroso (N_2O) que, segundo Dalgaard e colaboradores (2008), podem ocorrer a partir da degradação dos resíduos da colheita, durante a fixação biológica de nitrogênio e a aplicação de fertilizantes nitrogenados.

Quanto aos potenciais efeitos prejudiciais à saúde humana, representado pelos impactos nas categorias de toxicidade humana câncer e não câncer, as emissões de cromo para água e de zinco para o solo, são os principais contribuintes para as duas categorias, respectivamente.

Já os impactos relativos a qualidade do ecossistema, representados nas categorias de acidificação, eutrofização de água doce e marinha e ecotoxicidade de água doce, podem ser causados respectivamente pelas emissões de amônia para o ar, pela aplicação de fertilizantes fosfatados, pela emissão de nitrato para água e de zinco para o solo.

O cultivo estático é a segunda etapa que mais pode contribuir para os impactos da produção de CB em melaço de soja diluído. Isso ocorre devido ao consumo de energia elétrica durante a etapa que dura 14 dias e deve ser mantido nas condições ideais para que o microrganismo possa sintetizar a celulose.

A produção da energia elétrica considerada nesse e nos demais processos unitários é resultado do mix de energia brasileira. Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2017), 68,1% da oferta interna de energia elétrica é proveniente das usinas hidrelétricas. Embora essa seja considerada uma fonte de energia renovável, a sua produção requer uma infraestrutura com o desmatamento e inundação de amplas áreas (frequentemente área de florestas) para a construção de reservatórios de água que levam a decomposição da matéria orgânica e a emissão de gases do efeito estufa.

Outra fonte de energia considerada na matriz energética brasileira é o carvão utilizado nas usinas termelétricas que apesar de representar apenas 4,2% da oferta nacional (BRASIL, 2017) a extração do carvão causa a degradação do solo e nas áreas em que a mineração ocorre a céu aberto há também a diminuição da cobertura vegetal e perturbação a fauna. Além disso, no beneficiamento do carvão há a produção de rejeitos sólidos com substâncias tóxicas que são prejudiciais tanto a saúde humana como ao meio ambiente. A combustão do carvão nas usinas termelétricas emite gases do efeito estufa e material particulado (BRASIL, 2008).

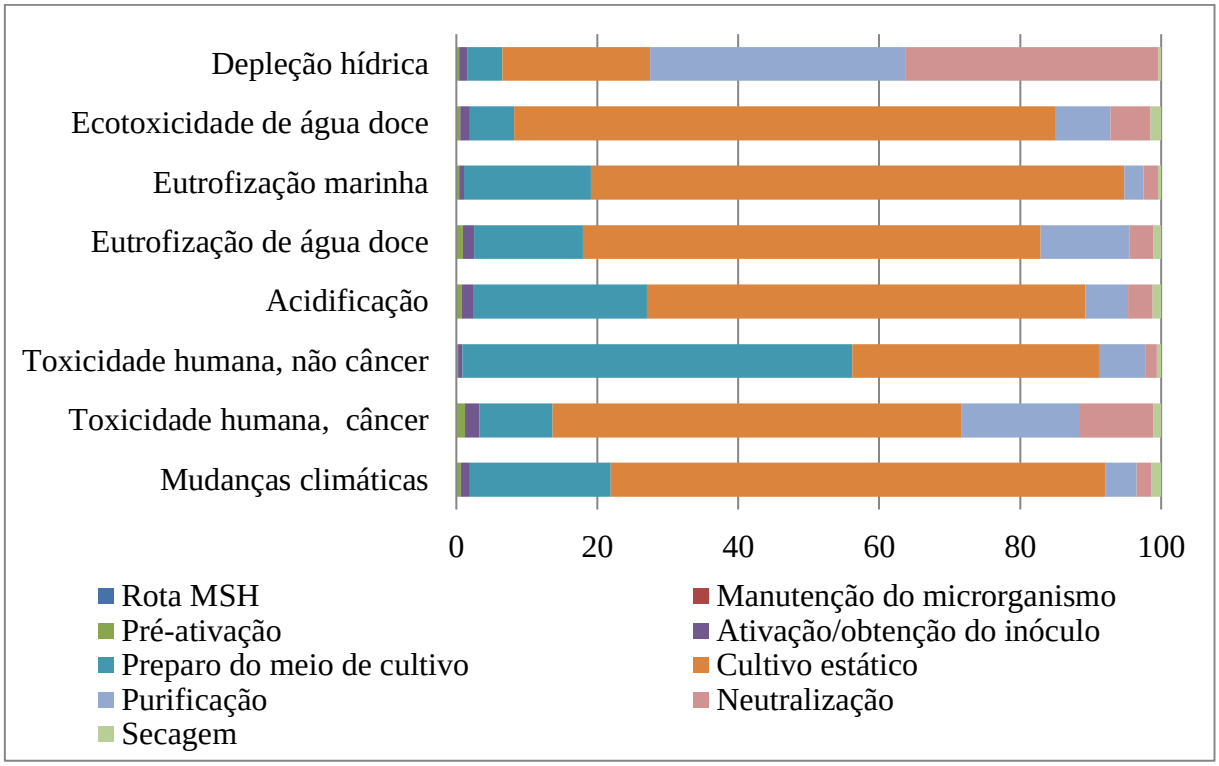
A etapa de purificação das películas também apresenta uma contribuição relevante para os impactos do processo de produção de CB, especialmente nas categorias de depleção hídrica (29,2%), toxicidade humana, câncer (19,7%), eutrofização de água doce (15,2%) e ecotoxicidade de água doce (11,9%). Isso se deve a produção do hidróxido de sódio (NaOH) utilizado para purificar as películas de CB. Ao analisar a produção desse insumo observamos que a energia elétrica consumida é a principal responsável pelos impactos ambientais desse.

4.2.5.4.2 *Análise da rota MSH*

O cultivo estático é a etapa da rota MSH com maiores impactos na maioria das categorias de impacto avaliadas, exceto em toxicidade humana não câncer e depleção hídrica,

nas quais os impactos majoritários são os da etapa de preparo do meio de cultivo e a purificação, respectivamente (figura 10).

Figura 10 – Contribuição dos processos unitários para os impactos ambientais da produção de 1g/dia de CB em melaço de soja hidrolisado, em escala de laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Isso ocorre devido ao consumo de energia elétrica durante a etapa de cultivo estático que dura 10 dias. Como mencionado anteriormente, a energia elétrica utilizada na produção de CB considera a matriz energética brasileira que embora seja bastante diversificada e em sua maioria de fonte renovável (hidrelétrica) ainda causa impactos ambientais relevantes como as emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio para o ar e de cromo, zinco, cobre e fosfato para água.

A segunda etapa mais impactante é a do preparo do meio de cultivo, devido ao melaço de soja que é a matéria prima do meio de cultivo utilizado nesse processo de produção de CB. Como explicado no tópico anterior, o melaço é um coproduto do processamento da soja e o cultivo dessa é uma atividade que pode causar poluição e degradação do meio ambiente.

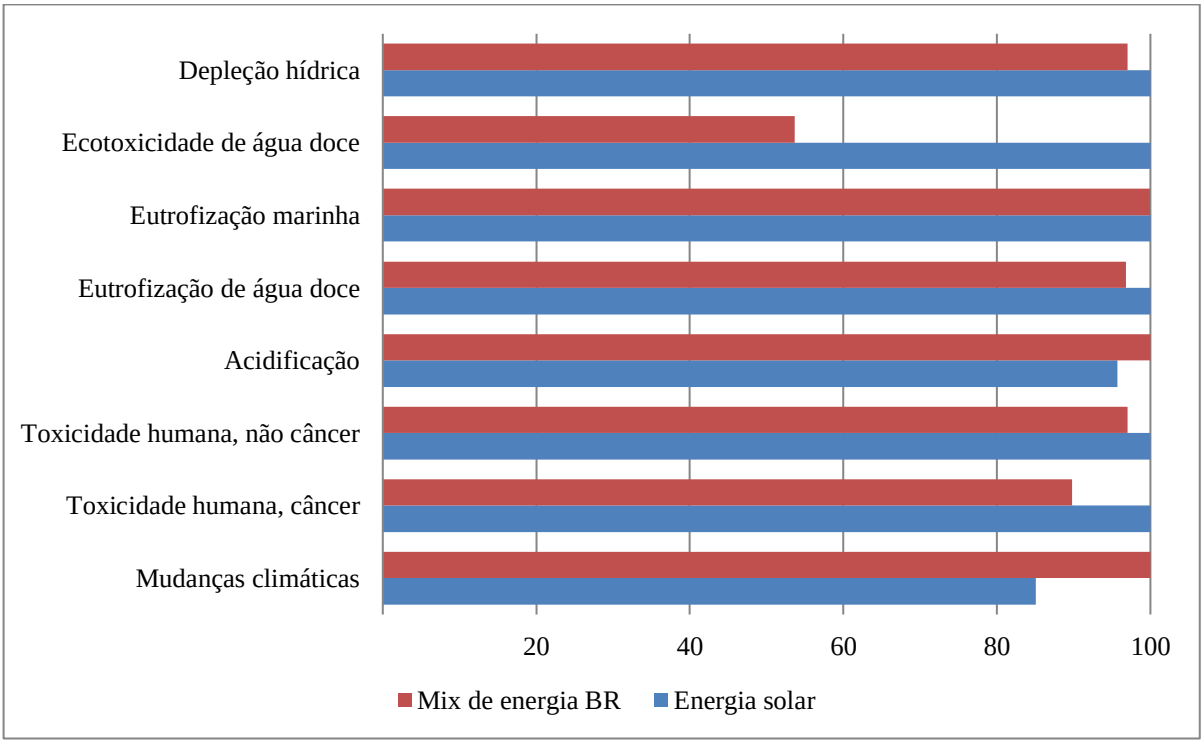
4.2.5.5 Análise de cenários

4.2.5.5.1 Energia solar

Considerando que o consumo da energia elétrica é o aspecto que mais pode contribuir para os impactos ambientais das rotas avaliadas, realizou-se uma análise de cenário onde o mix de energia brasileiro foi substituído por energia solar. A produção da energia solar considerada para essa análise utiliza placas fotovoltaicas monocristalina, que é considerada a tecnologia mais eficiente entre as disponíveis comercialmente.

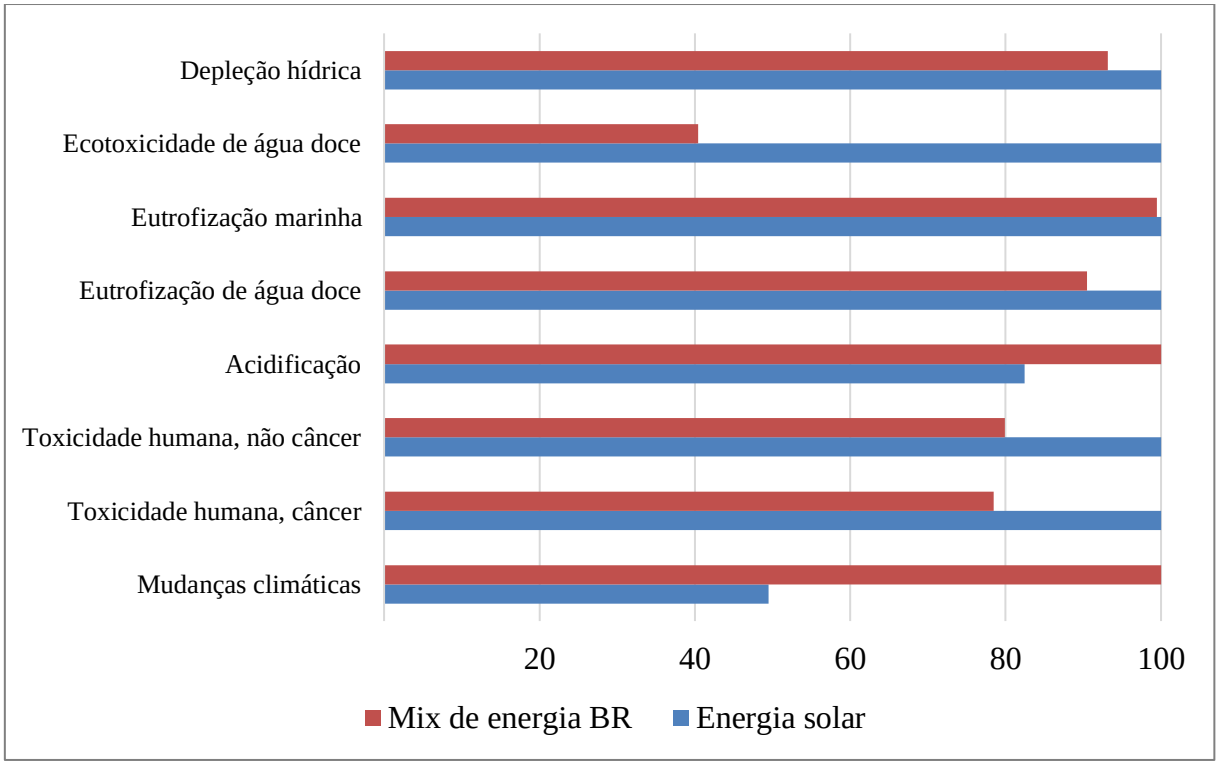
A partir da análise das figuras 11 e 12, onde são apresentados a comparação dos impactos ambientais das rotas MSD e MSH considerando o mix de energia brasileiro e a energia solar, constata-se que embora a energia solar seja considerada uma fonte de energia limpa e renovável ela não contribuiu para a redução dos impactos das rotas avaliadas.

Figura 11 – Comparação da rota MSD com o mix de energia brasileiro e energia solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Comparação da rota MSH com o mix de energia brasileiro e energia solar.

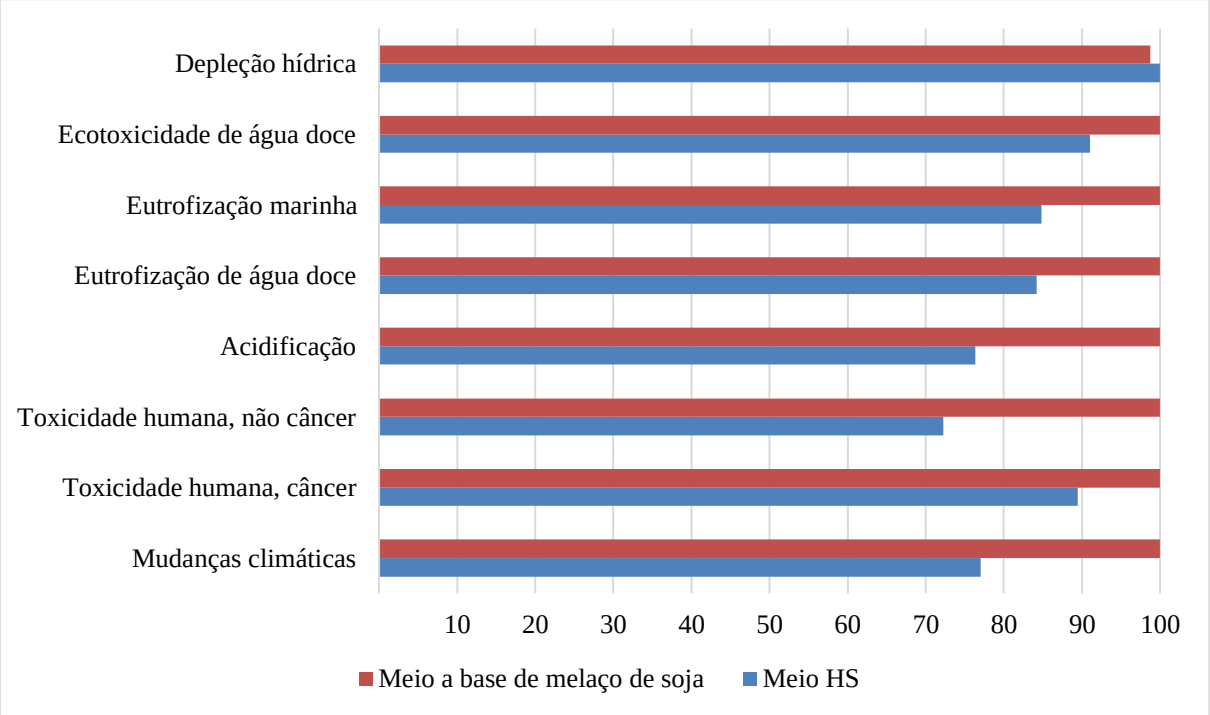


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.5.2 Pré-ativação e ativação do microrganismo em meio a base de melaço de soja

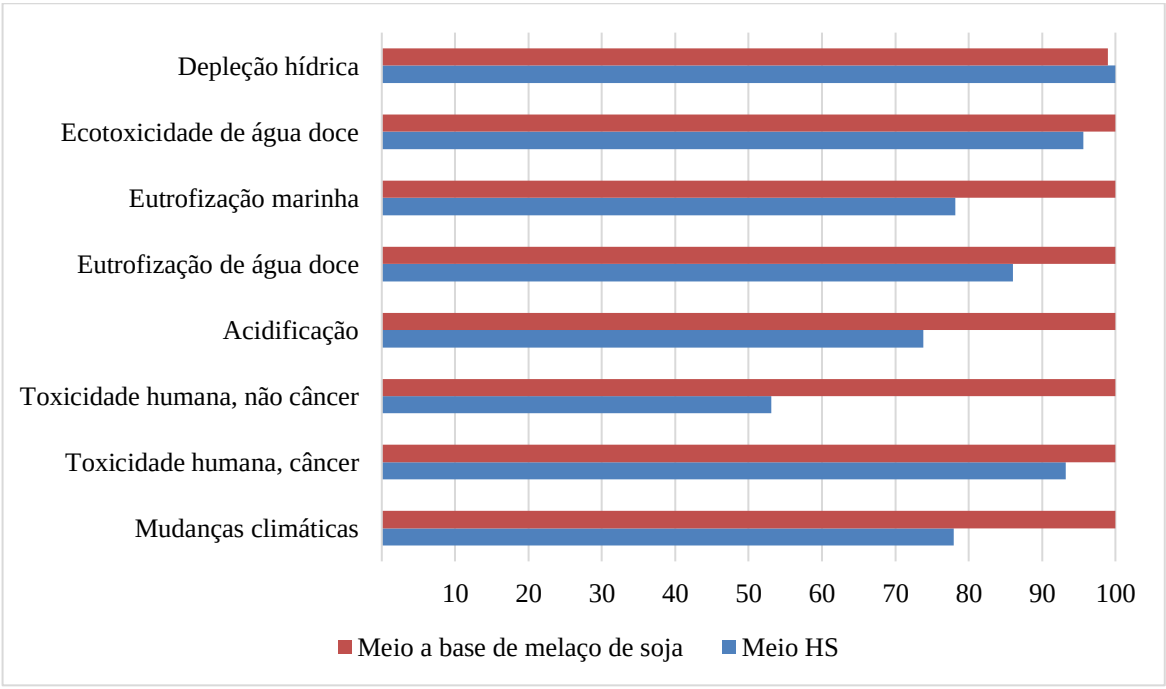
Outro cenário proposto para reduzir o consumo de energia elétrica das rotas de produção de CB foi a substituição do meio de cultivo utilizado na pré-ativação e ativação da bactéria. A proposição desse cenário se baseia no princípio que ao inocular a bactéria para o mesmo meio de cultivo, no caso o melaço de soja, e nas mesmas condições de crescimento (temperatura, aeração) a fase *lag* não ocorre e o crescimento exponencial é iniciado imediatamente (MADIGAN *et al*., 2012). Ao eliminar a fase de adaptação do microrganismo ao meio de cultivo, acredita-se que o tempo da etapa de cultivo estático pode ser reduzido e assim reduziria o consumo de energia da rota de produção. Entretanto, como pode ser observado nas figuras 13 e 14 a substituição do meio HS pelo meio a base de melaço de soja nas etapas de pré-ativação e ativação apesar de reduzir o tempo da etapa de cultivo estático não contribuiu para a redução dos impactos ambientais das rotas MSD e MSH.

Figura 13 – Comparação da rota MSD com as etapas de pré-ativação e ativação em meio HS e em meio a base de melaço de soja.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Comparação da rota MSH com as etapas de pré-ativação e ativação em meio HS e em meio a base de melaço de soja.

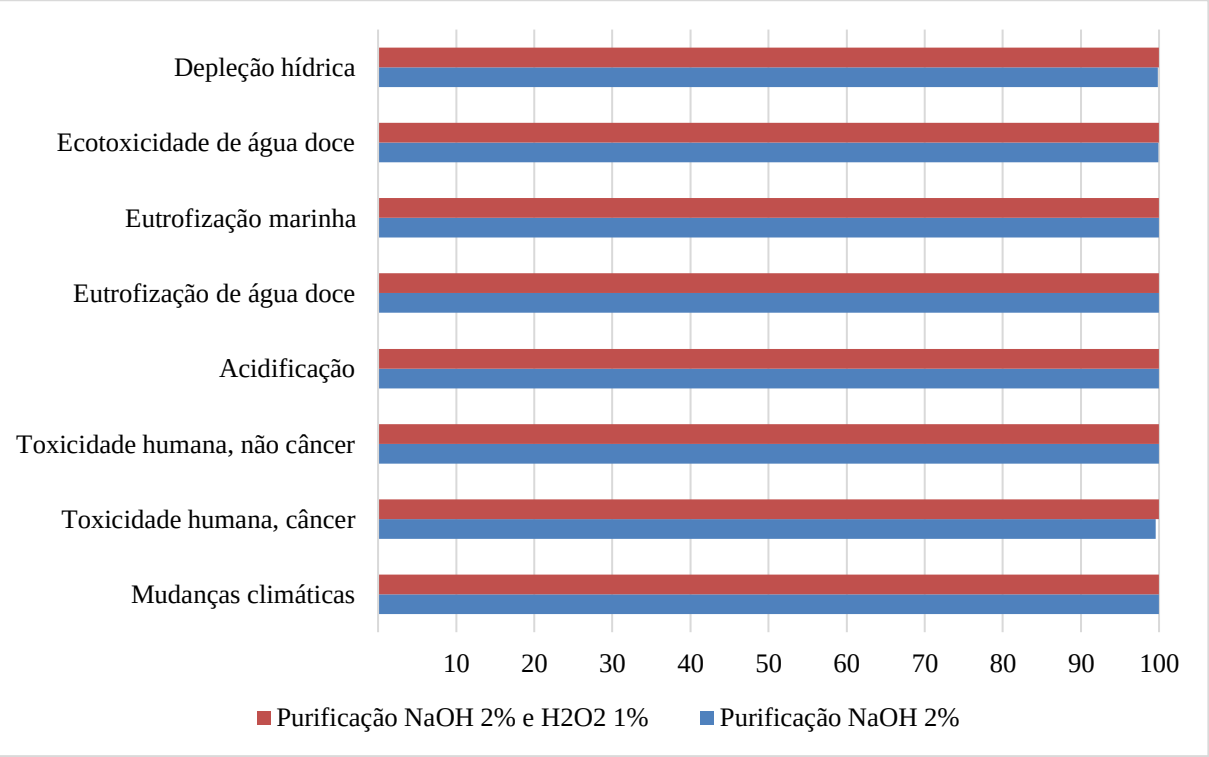


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.5.3 Purificação com NaOH 2% e H_2O_2 1%

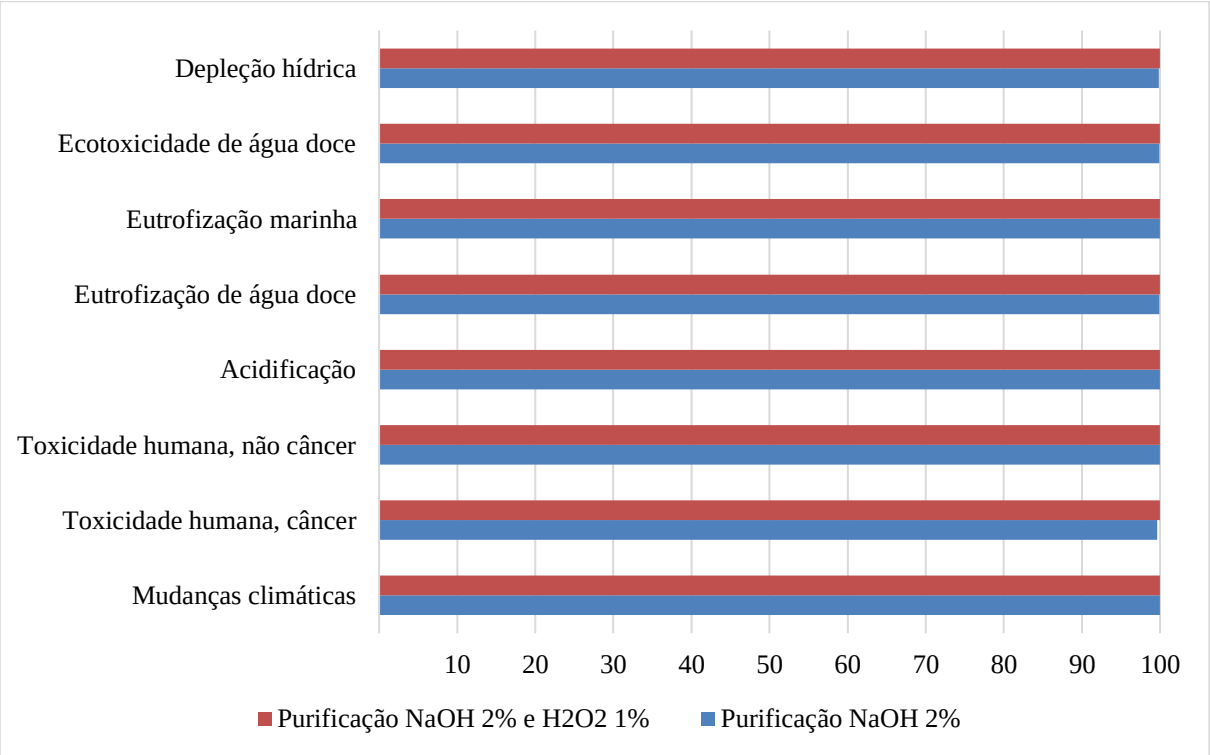
Como mencionado anteriormente na seção 3.2.3.4.1, a etapa de purificação foi a terceira etapa que mais contribuiu para os impactos das rotas MSD e MSH devido a produção do NaOH utilizado nessa etapa. Diante disso, foi proposto um cenário para avaliar se a associação de NaOH 2% e H_2O_2 1% poderia reduzir a quantidade de NaOH utilizada e, assim, reduzir os impactos associados a etapa de purificação. Entretanto, o cenário proposto teve impactos semelhantes ao da purificação utilizada inicialmente nas rotas MSD e MSH (figuras 15 e 16)

Figura 15 – Comparação da rota MSD com etapa de purificação com NaOH 2% e com NaOH 2% + H_2O_2 1%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Comparação da rota MSH com etapa de purificação com NaOH 2% e com NaOH 2% + H_2O_2 1%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Conclusão

Esse estudo avaliou os potenciais impactos ambientais relacionados a quatro processos de produção de celulose bacteriana em cultivo estático e em diferentes meios de cultivos, todos em escala de laboratório. Foram avaliadas a produção no meio de referência, ou seja, o meio mais utilizado para produção de CB, e em três meios alternativos, os quais foram preparados a partir do suco de caju suplementado e dois a partir do melaço soja com e sem hidrólise ácida com ácido sulfúrico. A ACV permitiu identificar quais são as etapas desse processo que mais contribuem para os impactos, além de identificar qual o processo apresenta melhor desempenho ambiental.

O consumo de energia é o aspecto crítico em todos os processos avaliados, entretanto é sabido que processos produtivos em escalas pequenas, como a laboratorial, tendem a consumir mais energia e que no escalonamento desses processos há uma tendência a uma melhor eficiência energética (HETHERINGTON *et al.*, 2014). Diante disso, espera-se que a possível eficiência energética na escala industrial possa contribuir para a melhoria do desempenho ambiental da produção de CB.

As rotas de produção de CB em melaço de soja apresentam melhor desempenho ambiental do que a produção no meio de referência HS e em suco de caju suplementado.

A análise de cenários apontou que a substituição da matriz energética brasileira pela energia solar, a substituição do meio de cultivo das etapas de pré-ativação e ativação, bem como a purificação com NaOH e H_2O_2 não representam melhoria ambiental das rotas avaliadas.

REFERÊNCIAS

ABICLOR, Indústria Brasileira de Cloro, Álcalis e derivados. **Balanço socioeconômico:** Indústria de Cloro-Álcalis 2014. São Paulo: Fipe, 2014. 36 p. Relatório desenvolvido pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE) para a Indústria Brasileira de Cloro, Álcalis e Derivados (Abiclor). Disponível em: <http://www.abiclor.com.br/wp-content/uploads/2015/05/balanco-social2014.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. [s. L.]: ABNT, 2014b. 46 p.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. **The Hitch Hikers's Guide to LCA:** An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application. Student litteratur, 2004.

BILGI, E. et al. Optimization of bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus using carob and haricot bean. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 90, p. 2–10, 2016.

Blonk Agri-footprint BV (2014) Agri-Footprint—part 2—description of data—version 1.0. Blonk Agri-footprint BV, Gouda

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

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2017:** Ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 292 p.

CARREIRA, P. et al. Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 15, p. 7354–7360, 2011.

CEARÁ (Estado). Resolução nº 2, de 02 de fevereiro de 2017. **Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as portarias Semace Nº154, de 22 de julho de 2002 e Nº111, de 05 de abril de 2011, e altera a portaria Semace Nº151, de 25 de novembro de 2002.** v. 9, n. 37, Seção 2.

FERNANDES, Eduardo; GLÓRIA, Ana Maria da Silva; GUIMARÃES, Bruna de Almeida. **O SETOR DE SODA-CLORO NO BRASIL E NO MUNDO.** 29. ed. Rio de

Janeiro: Bndes, 2009. 320 p. (BNDES Setorial). Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2682/1/BS%2029_O%20setor%20de%20soda-cloro%20no%20Brasil_P.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2018.

GOEDKOOP, M. *et al*. **Introduction to LCA with SimaPro.** [s. L.]: Pré-consultants, 2016. 80 p.

HERVY, M. et al. Life cycle assessment of nanocellulose-reinforced advanced fibre composites. **Composites Science and Technology**, v. 118, p. 154–162, 2015.

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

LACERDA, L. D.; SANTOS, A. F.; MARINS, R. V. Emissão de mercúrio para a atmosfera pela queima de gás natural no brasil. **Química Nova**, [s. L.], v. 30, n. 2, p.366-369, mar. 2007.

MADIGAN, M. T. *et al.* **Brock Biology of microorganisms.** 13. ed. [s. L.]: Pearson, 2012. 1152 p.

MOHAMMADKAZEMI, F.; AZIN, M.; ASHORI, A. Production of bacterial cellulose using different carbon sources and culture media. **Carbohydrate Polymers**, v. 117, p. 518–523, 2015.

SILVA, I. M. C. B. Sodium Hydroxide (CAS No. 62-53-3). **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.79-82, mar. 2012. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20120005.

WEIDEMA, B. P. *et al.* **Overview and methodology:** Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The Ecoinvent Centre, 2013. 169 p.

REFERÊNCIAS

ABIOVE. **Nova projeção da Abiove para 2018 é de um aumento de 2,3% nas divisas com exportações do complexo soja, para US$ 32,4 bilhões.** 2018. Disponível em: <http://www.abiove.org.br/site/_FILES/Portugues/01032018-131415-01_03_2018_-_nota_estatisticas_complexo_soja.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2018.

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE GRÃOS V.5, n 10. Brasília: CONAB, 2013-. Mensal. ISSN 2318-6852

ARVIDSSON, R; NGUYEN, D; SVANSTRÖM, M. Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibrils Production by Mechanical Treatment and Two Different Pretreatment Processes. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 49, n. 11, p.6881-6890, 15 maio 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 21 p.

AUGIMERI, R. V.; VARLEY, A. J.; STRAP, J. L. Establishing a Role for Bacterial Cellulose in Environmental Interactions: Lessons Learned from Diverse Biofilm-Producing Proteobacteria. **Frontiers in Microbiology**, [s.l.], v. 6, p.1-27, 17 nov. 2015

BAE, S. O.; SHODA, M. Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* BPR2001 using molasses medium in a jar fermentor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 67, n. 1, p.45-51, 25 ago. 2004.

BAE, S.; SHODA, M. Bacterial Cellulose Production by Fed-Batch Fermentation in Molasses Medium. **Biotechnology Progress**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.1366-1371, 1 out. 2004.

BARUD, H. G. O. et al. A multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 153, p.406-420, nov. 2016.

BILGI, E. et al. Optimization of bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus using carob and haricot bean. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s.l.], v. 90, p.2-10, set. 2016.

BIO Fill Produtos Biotechnologicos. Luiz F. X. Farah. **Process for the preparation of cellulose film, cellulose film produced thereby, artificial skin graft and its use.** US 4912049, 27 Mar. 1990, 1 Out. 1984.

BOONME, P.; AMNUAIKIT; CHUSUIT. Effects of a cellulose mask synthesized by a bacterium on facial skin characteristics and user satisfaction. **Medical Devices**: Evidence and Research, [s.l.], p.77-81, jun. 2011.

BRAID, A. C. C. da S.; FIGUEIREDO, M. C. B. de; MATSUURA, M. I. da S. F.; SOUZA FILHO, M. de S. M. de; ROSA, M. de F. **Avaliação ambiental de nanocristais de celulose**

obtidos a partir de biomassa vegetal. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2015. 28 p.

BROWN, A. J. On an acetic ferment which forms cellulose. **J. Chem. Soc., Trans.**, [s.l.], v. 49, p.432-439, 1886.

ÇAKAR, F. et al. Improvement production of bacterial cellulose by semi-continuous process in molasses medium. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 106, p.7-13, jun. 2014.

CAMPANO, C.; BALEA, A.; BLANCO, A.; NEGRO, C. Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. **Cellulose**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.57-91, 18 nov. 2015.

CARREIRA, P.; MENDES, J.A.; TROVATTI, E.; SERAFIM, L.S.; FREIRE, C.S.; SILVESTRE, A.J.; NETO, C.P. Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 102, n. 15, p.7354-7360, ago. 2011.

CASTRO, A. L. A.; BARROS, M. O.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. (2016) Avaliação do ciclo de vida da produção de celulose bacteriana. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 5., 2016, Fortaleza. **Anais. [**S. l.]: ABCV, p. 87 - 93. Disponível em: <https://www.embrapa.br/vcbgcv/home>. Acesso em: 20 nov. 2017.

CASTRO, C; ZULUAGA, R.; PUTAUX, J.L.; CARO, G.; MONDRAGON, I.; GAÑÁN, P. Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 84, n. 1, p.96-102, fev. 2011.

CAVALCANTI, L.M.; PINTO, F.C.M.; OLIVEIRA, G.M DE; LIMA, S.V.C.; AGUIAR, J.L.D.A.; LINS, E.M. Efficacy of bacterial cellulose membrane for the treatment of lower limbs chronic varicose ulcers: a randomized and controlled trial. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**, [s.l.], v. 44, n. 1, p.72-80, fev. 2017.

CAVKA, A.; GUO, X.; TANG, S-J; WINESTRAND, S.; JÖNSSON, L.J.; HONG, F. Production of bacterial cellulose and enzyme from waste fiber sludge. **Biotechnology for Biofuels**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.25-35, 2013.

CHAGAS, B. S. das. **Produção de celulose bacteriana em meio à base de melaço de soja em cultivo estático.** 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CHAWLA, P.R.; BAJAJ, I.B.; SURVASE, S.A; SINGHAL, R.S. Microbial Cellulose: Fermentative Production and Applications. **Food Technology and Biotechnology**, [s. L.], v. 2, n. 47, p.107-124, jun. 2009.

CHEN, L.; HONG, F.; YANG, R.; LIU, X.; HAN, S. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 135, p.464-468, maio 2013.

CHENG, Z.; YANG, R.; LIU, X.; CHEN, H. Green synthesis of bacterial cellulose via acetic acid pre-hydrolysis liquor of agricultural corn stalk used as carbon source. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 234, p.8-14, jun. 2017.

ÇOBAN, E. P. Evaluation of different pH and temperatures for bacterial cellulose production in HS (Hestrin-Scharmm) medium and beet molasses medium. **African Journal of Microbiology Research**, [s.l.], v. 5, n. 9, p.1037-1045, 4 maio 2011.

COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas: Cetea/ital, 2007. 75 p.

COSTA, A. F. S. et al. Production of Bacterial Cellulose by Gluconacetobacter hansenii Using Corn Steep Liquor As Nutrient Sources. **Frontiers in Microbiology**, [s.l.], v. 8, p.2-12, 17 out. 2017.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment.** Kirk-othmer Encyclopedia of Chemical Technology, [s.l.], p.1-28, 15 mar. 2016.

CZAJA W.K.; YOUNG, D.J; KAWECKI, M.; BROWN, R.M. The Future Prospects of Microbial Cellulose in Biomedical Applications. **Biomacromolecules**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.1-12, jan. 2007.

DONINI, I.A.N.; DE SALVI, D.T.B.; FUKUMOTO, F.K.; LUSTRI, W.R.; BARUD, H.S.; MARCHETTO, R.; MESSADDEQ, Y.; RIBEIRO, S.J.L. Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. **Eclética Química**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.165-178, 2010.

FAN, X. et al. Production of nano bacterial cellulose from beverage industrial waste of citrus peel and pomace using Komagataeibacter xylinus. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 151, p.1068-1072, out. 2016.

FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ROSA, M.F.; UGAYA, C.M.L.; SOUZA FILHO, M.S.M.; BRAID, A.C.C.S.; MELO, L.F.L. Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 35, p.130-139, nov. 2012.

GALLEGOS, A. M. A. et al. Bacterial Cellulose: A Sustainable Source to Develop Value-Added Products – A Review. **Bioresources**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.5641-5655, 12 abr. 2016.

GOMES, F.P.; SILVA, N.H.C.S.; TROVATTI, E.; SERAFIM, L.S.; DUARTE, M.F.; SILVESTRE, A.J.D.; PASCOAL NETO, C.; FREIRE, C.S.R. Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter sacchari* using dry olive mill residue. **Biomass and bioenergy**, [s.l.], v. 55, p.205-211, ago. 2013.

GOMES, R. J. **Produção de celulose bacteriana e ácido acético, por bactérias do ácido acético – BAA isoladas de indústria vinagres, a partir de melaço de soja**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 45, n. 1, p.90-96, jan. 2011.

HASAN, N.; BIAK, D. R. A.; KAMARUDIN, Suryani. Application of Bacterial Cellulose (BC) in Natural Facial Scrub. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, [s.l.], v. 2, n. 4, p.272-276, 2012

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, [s.l.], v. 344, n. 6188, p.1109-1113, 5 jun. 2014.

HERVY, M.; EVANGELISTI, S.; LETTIERI, P.; LEE, K.Y. Life cycle assessment of nanocellulose-reinforced advanced fibre composites. **Composites Science and Technology**, [s.l.], v. 118, p.154-162, out. 2015.

HONG, F.; QIU, K. An alternative carbon source from konjac powder for enhancing production of bacterial cellulose in static cultures by a model strain *Acetobacter aceti* subsp. xylinus ATCC 23770. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 72, n. 3, p.545-549, maio 2008.

HU, W.; CHEN, S.; YANG, J.; LI, Z.; WANG, H. Functionalized bacterial cellulose derivatives and nanocomposites. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 101, p.1043-1060, jan. 2014.

HUANG, C. et al. Using wastewater after lipid fermentation as substrate for bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 136, p.198-202, jan. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 14040**: Environmental management, Life cycle assessment, Principles and framework. 2 ed. Geneva: ISO, 2006. 20 p.

JAHAN, F.; KUMAR, V.; SAXENA, R.K. Distillery effluent as a potential medium for bacterial cellulose production: A biopolymer of great commercial importance. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 250, p.922-926, fev. 2018.

JARAMILLO, R.D.; PERNA, O.; RÍOS, L.E.; ESCOBAR, J. Efecto de la melaza de caña tratada con ácido sulfúrico en la produccion de celulosa por *Gluconacetobacter xylinus* IFO 13693. **Revista Colombiana de Química**, [s.l.], v. 43, n. 2, p.25-31, 22 set. 2015.

JOZALA, A.F.; LENCASTRE-NOVAES, L.C.; LOPES, A.M; SANTOS-EBINUMA, V.C.; MAZZOLA, P.G.; PESSOA JR, A.; GROTTO, D.; GERENUTTI, M.; CHAUD, M.V. Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 100, n. 5, p.2063-2072, 8 jan. 2016.

JOZALA, A. F. et al. Bacterial cellulose production by Gluconacetobacter xylinus by employing alternative culture media. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 99, n. 3, p.1181-1190, 4 dez. 2014.

KESHK, S. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications. **Journal of Bioprocessing & Biotechniques**, [s.l.], v. 04, n. 02, p.1-10, 2014.

KESHK, S.; SAMESHIMA, K. The utilization of sugar cane molasses with/without the presence of lignosulfonate for the production of bacterial cellulose. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 72, n. 2, p.291-296, 1 fev. 2006.

KESTERS, K.; LISDIYANTI, P.; KOMAGATA, K.; SWINGS, J. **The Family Acetobacteraceae:** The Genera *Acetobacter*, *Acidomonas*, *Asaia*, *Gluconacetobacter*, *Gluconobacter*, and *Kozakia*. The Prokaryotes, [s.l.], p.163-200, 2006.

KHALID, A. et al. Bacterial cellulose-zinc oxide nanocomposites as a novel dressing system for burn wounds. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 164, p.214-221, maio 2017.

KHATTAK, W. A. et al. Production, Characterization and Physico-mechanical Properties of Bacterial Cellulose from Industrial Wastes. **Journal of Polymers and The Environment**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.45-53, 24 jun. 2014.

KIZILTAS, E. E.; KIZILTAS, Alper; GARDNER, Douglas J. Synthesis of bacterial cellulose using hot water extracted wood sugars. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 124, p.131-138, jun. 2015.

KLEMM, D.; SCHUMANN, D.; UDHARDT, U.; MARSCH, S. Bacterial synthesized cellulose — artificial blood vessels for microsurgery. **Progress in Polymer Science**, [s.l.], v. 26, n. 9, p.1561-1603, nov. 2001.

KONGRUANG, S. Bacterial Cellulose Production by Acetobacter xylinum Strains from Agricultural Waste Products. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, [s.l.], v. 148, n. 1-3, p.245-256, 3 jan. 2008.

KRALISCH, D; OTT, D; GERICKE, D. Rules and benefits of Life Cycle Assessment in green chemical process and synthesis design: a tutorial review. **Green Chemistry**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.123-145, 2015.

KUROSUMI, A.; SASAKI, C.; YAMASHITA, Y.; NAKAMURA, Y. Utilization of various fruit juices as carbon source for production of bacterial cellulose by Acetobacter xylinum NBRC 13693. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 76, n. 2, p.333-335, mar. 2009.

KWAK, M.H.; KIM, J.E.; GO, J.; KOH, E.K.; SONG, S.H.; SON, H.J.; KIM, H.S.; YUN, Y.H.; JUNG, Y.J.; HWANG, D.Y. Bacterial cellulose membrane produced by Acetobacter sp. A10 for burn wound dressing applications. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 122, p.387-398, maio 2015.

LAVOINE, N.; DESLOGES, I.; DUFRESNE, A.; BRAS, J. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 90, n. 2, p.735-764, out. 2012.

LEE, K. et al. More Than Meets the Eye in Bacterial Cellulose: Biosynthesis, Bioprocessing, and Applications in Advanced Fiber Composites. **Macromolecular Bioscience**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.10-32, 30 jul. 2013.

LEGNANI, C. et al. Bacterial cellulose membrane as flexible substrate for organic light emitting devices. **Thin Solid Films**, [s.l.], v. 517, n. 3, p.1016-1020, dez. 2008.

LI, Q.; MCGINNIS, S.; SYDNOR, C.; WONG, A.; RENNECKAR, S. Nanocellulose Life Cycle Assessment. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, [s.l.], v. 1, n. 8, p.919-928, 31 maio 2013.

LI, Z.; WANG, L.; HUA, J.; JIA, S.; ZHANG, J.; LIU, H. Production of nano bacterial cellulose from waste water of candied jujube-processing industry using Acetobacter xylinum. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 120, p.115-119, abr. 2015.

LIMA, H. L. S. et al. Bacterial Cellulose Production by Komagataeibacter hansenii ATCC 23769 Using Sisal Juice - An Agroindustry Waste. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 3, p.671-680, jul. 2017.

LIN, D. et al. Production of bacterial cellulose by Gluconacetobacter hansenii CGMCC 3917 using only waste beer yeast as nutrient source. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 151, p.113-119, jan. 2014.

LOMAN, A. A.; JU, L. Soybean carbohydrate as fermentation feedstock for production of biofuels and value-added chemicals. **Process Biochemistry**, [s.l.], v. 51, n. 8, p.1046-1057, ago. 2016.

LUDWICKA, K. et al. Medical and Cosmetic Applications of Bacterial NanoCellulose. **Bacterial Nanocellulose**, [s.l.], p.145-165, 2016.

MANEERUNG, T.; TOKURA, S.; RUJIRAVANIT, R. Impregnation of silver nanoparticles into bacterial cellulose for antimicrobial wound dressing. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 72, n. 1, p.43-51, abr. 2008.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. **Journal of Polymers and The Environment**, [s.l.], v. 10, n. 1/2, p.19-26, 2002.

NASCIMENTO, D.M.; DIAS, A.F.; ARAÚJO JUNIOR, C.P.; ROSA, M.F.; MORAIS, J.P.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. A comprehensive approach for obtaining cellulose nanocrystal from coconut fiber. Part II: Environmental assessment of technological pathways. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 93, p.58-65, dez. 2016.

NASCIMENTO, E. S. do et al. Mesquite (Prosopis juliflora (Sw.)) Extract is an Alternative Nutrient Source for Bacterial Cellulose Production. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.63-70, 1 fev. 2016.

NEERA; RAMANA, K. V.; BATRA, H. V. Occurrence of Cellulose-Producing Gluconacetobacter spp. in Fruit Samples and Kombucha Tea, and Production of the Biopolymer. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, [s.l.], v. 176, n. 4, p.1162-1173, 1 maio 2015.

NOGI, M.; YANO, H. Transparent Nanocomposites Based on Cellulose Produced by Bacteria Offer Potential Innovation in the Electronics Device Industry. **Advanced Materials**, [s.l.], v. 20, n. 10, p.1849-1852, 19 maio 2008.

NYMPHEAS INTERNATIONAL CORP. (China). Yi-chuan Lin; Yuh-chyun Wey; Mei-linglee, **Cosmetic composition containing fragments of bacterial cellulose film and method for manufacturing thereof**. US nº 2015/0216784 A1, 05 fev. 2015, 06 ago. 2015.

PACHECO, C.; LUIS, J.; YEE, M.; ZENTELLA, C.; MARVÁN, E. Celulosa bacteriana en gluconacetobacter xylinus: síntesis y aplicaciones. **Red Rev Cient Am Lat el Caribe**, Espana y Port.;7(1):18-25, 2004.

PAXIMADA, P. et al. Bacterial cellulose as stabilizer of o/w emulsions. **Food Hydrocolloids**, [s.l.], v. 53, p.225-232, fev. 2016.

PENNINGTON, D.W. et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, [s.l.], v. 30, n. 5, p.721-739, jul. 2004.

PICCINNO, F.; HISCHIER, R.; SEEGER, S.; SOM, C. Life Cycle Assessment of a New Technology to Extract, Functionalize and Orient Cellulose Nanofibers from Food Waste. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 6, p.1047-1055, 18 maio 2015.

PINHEIRO, J.A.; SOUZA, N.F.; CASTRO, A.L.A.; FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ROSA, M.F. (2016) Avaliação ambiental da produção de celulose bacteriana a partir do suco de caju. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 5., 2016, Fortaleza. **Anais. [**S. l.]: ABCV, 2016. p. 445 - 451. Disponível em: <https://www.embrapa.br/vcbgcv/home>. Acesso em: 20 nov. 2017.

QIU, Y. et al. Bacterial cellulose and bacterial cellulose-vaccarin membranes for wound healing. **Materials Science and Engineering**: C, [s.l.], v. 59, p.303-309, fev. 2016.

RAJWADE, J. M.; PAKNIKAR, K. M.; KUMBHAR, J. V. Applications of bacterial cellulose and its composites in biomedicine. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 99, n. 6, p.2491-2511, 11 fev. 2015.

RANI, M.U.; RASTOGI, N.K.; ANU APPAIAH, K.A. Statistical Optimization of Medium Composition for Bacterial Cellulose Production by *Gluconacetobacter hansenii* UAC09 Using Coffee Cherry Husk Extract – an Agro-Industry Waste. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 21, n. 7, p.739-745, jul. 2011.

ROMÃO, B. B. et al. Ethanol Production from Hydrolyzed Soybean Molasses. **Energy & Fuels**, [s.l.], v. 26, n. 4, p.2310-2316, 9 abr. 2012.

RÖMLING, U.; GALPERIN, M. Y. Bacterial cellulose biosynthesis: diversity of operons, subunits, products, and functions. **Trends in Microbiology**, [s.l.], v. 23, n. 9, p.545-557, set. 2015.

RUKA, D. R.; SIMON, G. P.; DEAN, Katherine M. Altering the growth conditions of Gluconacetobacter xylinus to maximize the yield of bacterial cellulose. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 89, n. 2, p.613-622, jun. 2012.

SECKLER, M.M.; GAMA, F.M; PESSOA JR, A. Bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* by employing alternative culture media. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s.l.], v. 99, n. 3, p.1181-1190, 4 dez. 2014.

SHODA, M.; SUGANO, Y. Recent advances in bacterial cellulose production. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.1-8, fev. 2005.

SIQUEIRA, P. F. et al. Production of bio-ethanol from soybean molasses by Saccharomyces cerevisiae at laboratory, pilot and industrial scales. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 99, n. 17, p.8156-8163, nov. 2008.

STEVENS, E. S. How green are green plastics? **Biocycle**: The organics recycling authority, [s. L.], v. 43, n. 12, p.42-45, dez. 2002.

TROVATTI, E. et al. Bacterial cellulose membranes applied in topical and transdermal delivery of lidocaine hydrochloride and ibuprofen: In vitro diffusion studies. **International Journal of Pharmaceutics**, [s.l.], v. 435, n. 1, p.83-87, out. 2012.

TSOUKO, E.; KOURMENTZA, C.; LADAKIS, D.; KOPSAHELIS, N.; MANDALA, J.; PAPANIKOLAOU, S.; PALOUKIS, F.; ALVES, V.; APOSTOLIS KOUTINAS, A. Bacterial Cellulose Production from Industrial Waste and by-Product Streams. **International Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 16, n. 12, p.14832-14849, 1 jul. 2015.

TYAGI, N.; SURESH, S. Production of cellulose from sugarcane molasses using Gluconacetobacter intermedius SNT-1: optimization & characterization. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p.71-80, jan. 2016.

TYAGI, N.; SURESH, S. Isolation and Characterization of Cellulose Producing Bacterial Strain from Orange Pulp. **Advanced Materials Research**, [s.l.], v. 626, p.475-479, dez. 2012.

ULLAH, H.; SANTOS, H.r A.; KHAN, T. Applications of bacterial cellulose in food, cosmetics and drug delivery. **Cellulose**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.2291-2314, 18 jun. 2016.

VILAPLANA, F.; STRÖMBERG, E.; KARLSSON, S. Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. **Polymer Degradation and Stability**, [s.l.], v. 95, n. 11, p.2147-2161, nov. 2010.

WANG, B.et al. Use of heparinized bacterial cellulose based scaffold for improving angiogenesis in tissue regeneration. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 181, p.948-956, fev. 2018.

WEI, H.; RODRIGUEZ, K.; RENNECKAR, S.; VIKESLAND, P.J. Environmental science and engineering applications of nanocellulose-based nanocomposites. **Environ. Sci.**: Nano, [s.l.], v. 1, n. 4, p.302-316, 2014.

XU, X.; JAYARAMAN, K.; MORIN, C.; PECQUEUX, N.Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 198, n. 1-3, p.168-177, mar. 2008.

YAMADA, Y.; YUKPHAN, P.; VU, H.T.L; MURAMATSU, Y.; OCHAIKUL, D.; TANASUPAWAT, S.; NAKAGAWA, Y. Description of *Komagataeibacter* gen. nov., with proposals of new combinations (Acetobacteraceae). **The Journal of General and Applied Microbiology**, [s.l.], v. 58, n. 5, p.397-404, 2012.

YAMADA, Y.; YUKPHAN, P. Genera and species in acetic acid bacteria. **International Journal of Food Microbiology**, [s.l.], v. 125, n. 1, p.15-24, jun. 2008.

YANG, X. al. Bacterial cellulose production from the litchi extract byGluconacetobacter xylinus. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, [s.l.], v. 46, n. 1, p.39-43, 2 set. 2014.

ZAMPORI, L. *et al*. **Guide for interpreting life cycle assessment result.** Luxembourg: Publications Office of The European Union, 2016. 60 p.

ZENG, X.; SMALL, D. P.; WAN, W. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 85, n. 3, p.506-513, jun. 2011.