



Sara Felgueiras Branco

**Avaliação da Sustentabilidade da Produção de
Celulose Bacteriana através de uma
comparação de Avaliações de Ciclo de Vida**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sara Felgueiras Branco

**Avaliação da Sustentabilidade da
Produção de Celulose Bacteriana
através de uma comparação de
Avaliações de Ciclo de Vida**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Química
e Biológica

Trabalho realizado sob orientação de

Professor Miguel Gama

Professor Fernando Dourado

outubro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Ao Professor Miguel Gama pela orientação e disponibilidade constante ao longo de todo o estágio curricular, também por ajudar a encontrar soluções ao longo de todo o estudo desenvolvido e na realização da presente dissertação.

Ao Professor Fernando Dourado pela dedicação e sugestões para melhorar e aperfeiçoar o estudo comparativo e na realização da dissertação.

Ao Engenheiro André Mota por ensinar, ajudar e sugerir formas de utilizar o software, que foi crucial para o desenvolvimento deste estudo.

À minha família pelo apoio durante todo o meu percurso acadêmico e por acreditar nas minhas capacidades.

Aos meus amigos mais antigos que me deram força para continuar esta jornada e também às amigas que fiz ao longo destes 5 anos, em especial à Adriana Alves, pelo apoio moral e pedagógico que contribuíram para a conclusão do meu percurso acadêmico.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A preocupação com as alterações climáticas e ameaças ambientais cada vez mais presentes nos dias que correm, obrigam as empresas a optar por processos e produtos “mais limpos”. Assim, avaliar e comparar os impactos ambientais associados a produtos e processos tem sido uma necessidade crescente. Num trabalho recente desenvolvido pela Satisfibre, estudaram a sustentabilidade da celulose bacteriana (no contexto da indústria têxtil) com base numa Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), através da metodologia ReCiPe 2016. O objetivo do presente projeto foi complementar esse estudo, comparando os resultados obtidos com os disponíveis na literatura para a produção de celulose vegetal, com o intuito de determinar se existem diferenças significativas ao nível da sustentabilidade.

Foi, primeiramente, realizada uma pesquisa bibliográfica, identificando artigos científicos e relatórios relevantes para a realização deste estudo. De seguida, fez-se o levantamento de informações relevantes de cada artigo e relatório e foram selecionados aqueles que melhor se ajustam à fronteira do sistema utilizado no processo de produção de CB. Os dados obtidos no estudo anterior da Satisfibre foram convertidos para a mesma metodologia usada na LCA de cada material estudado, usando o software GaBi Professional. Depois, foi realizada uma análise da variação das fronteiras do sistema para garantir que as condições de fronteira fossem comparáveis e efetuou-se a normalização dos dados, permitindo a comparação direta da informação produzida em diferentes estudos.

Após análise dos vários artigos identificados, foram selecionados três artigos: um referente ao estudo de LCA de nanofibras de celulose (NFC); outro referente ao estudo de nanocristais de celulose (NCC) e um relatório relativo ao estudo de fibras de celulose artificiais (MMCF). A análise efetuada permitiu, concluir que o processo de produção de CB apresenta melhor desempenho a nível de sustentabilidade, em impactos na saúde, alterações climáticas e esgotamento fóssil, quando comparado com os processos de produção de nanofibras e nanocristais de celulose. Por outro lado, os processos de produção de fibras artificiais a partir de CB, pelos processos Viscose e Lyocell, apresentam um pior resultado a nível da sustentabilidade em comparação com os resultados apresentados no relatório referente a MMCF.

Palavras-Chave: Celulose; Sustentabilidade; LCA; Celulose bacteriana; Celulose vegetal

Abstract

Concern about climate change and environmental threats increasingly present these days forces companies to opt for "cleaner" processes and products. Thus, evaluating and comparing the environmental impacts associated with products and processes has been a growing need. In a recent work developed by Satisfibre, they studied the sustainability of bacterial cellulose (in the context of the textile industry) based on a Life Cycle Assessment (LCA), through the ReCiPe 2016 methodology. The goal of this project was to complement this study by comparing the results obtained with those available in the literature to produce plant pulp, to determine whether there are significant differences in sustainability.

Bibliographical research was first carried out, identifying scientific articles and reports relevant to the accomplishment of this study. Next, relevant information was collected from each article and report and those that best fit the boundary of the system used in the CB production process were selected. The data obtained in the previous study of Satisfibre were converted to the same methodology used in the LCA of each material studied, using the GaBi Professional software. Then, an analysis of the variation of the boundaries of the system was performed to ensure that the border conditions were comparable, and the normalization of the data was carried out, allowing the direct comparison of the information produced in different studies.

After analyzing the various articles identified, three articles were selected: one referring to the study of LCA of cellulose nanofibers (NFC); another referring to the study of cellulose nanocrystals (NCC) and a report on the study of artificial cellulose fibers (MMCF). The analysis allowed us to conclude that the production process of CB presents better performance at the level of sustainability, in impacts on health, climate change and fossil exhaustion, when compared with the production processes of nanofibers and nanocrystals of cellulose. On the other hand, the processes of production of artificial fibers from CB, by the Viscose and Lyocell processes, present a worse result in terms of sustainability compared to the results presented in the MMCF report.

Keywords: Cellulose; Sustainability; LCA; Bacterial cellulose; Plant pulp

Índice

1.	Contextualização e organização.....	14
1.1.	Contextualização	14
1.2.	Objetivo	14
1.3.	Estrutura da Dissertação	15
2.	Introdução	16
2.1.	Celulose	16
2.2.	Fibras têxteis.....	17
2.2.1.	Algodão	18
2.2.2.	Fibras de Celulose Regeneradas (FCR)	19
2.3.	Nanoceluloses (NC).....	20
2.3.1.	Celulose Bacteriana (CB).....	21
2.4.	Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)	23
2.4.1.	Definição do Objetivo e Projeto.....	24
2.4.2.	Inventário do Ciclo de Vida (LCI)	24
2.4.3.	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA)	24
2.4.4.	Interpretação.....	26
2.5.	Metodologia ReCiPe 2016.....	26
2.5.1.	Método de Framework	27
3.	Metodologia	32
3.1.	Estudo Comparativo	32
3.2.	Software GaBi Professional.....	33
3.3.	Estudo da Satisfibre	33
4.	Resultados e Discussão	34
4.1.	Seleção dos artigos para o estudo comparativo	34
4.1.1.	Análise do artigo de Schultz et al (2017)	34

4.1.2.	Análise do artigo de La Rosa et al. (2019).....	38
4.1.3.	Análise do artigo de Liu et al. (2020).....	40
4.1.4.	Análise do artigo de Stampino et al. (2021).....	41
4.1.5.	Análise do artigo de Guo et al. (2021)	43
4.1.6.	Análise do artigo de Shen et al. (2010)	44
4.1.7.	Análise do artigo de Gu et al. (2015)	46
4.1.8.	Análise do artigo de Chen et al. (2021).....	48
4.1.9.	Análise do artigo de Piccinno et al. (2015)	51
4.1.10.	Análise do artigo de Figueirêdo et al. (2012)	53
4.1.11.	Análise do artigo de Nascimento et al. (2016)	55
4.2.	Resultados obtidos do estudo comparativo	56
4.3.	Análise da variação das fronteiras do sistema – exclusão e inclusão de processos... 63	
4.4.	Normalização dos dados	67
4.5.	Discussão	68
5.	Conclusões	69
	Referências	70
	Anexos.....	72
	Anexo A.....	72
	Anexo B.....	72
	Anexo C.....	72

Índice de Figuras

Figura 1 – Estrutura da Celulose (Foroughi et al. 2021).....	16
Figura 2 – Diferentes tipos de materiais à base de celulose (Mohamed et al. 2017)..	17
Figura 3 - Classificação das principais fibras naturais e artificiais (Felgueiras et al. 2021)... 18	
Figura 4 - Cultivo de algodão em África (OGM).....	18
Figura 5 - Esquema de produção de fibra Viscose (Felgueiras et al. 2021).....	19

Figura 6 - Processo Lyocell baseado no solvente NMMO (Felgueiras et al. 2021).	20
Figura 7 – Vias para a biossíntese de Nanocelulose Bacteriana por <i>K. xylinus</i> e montagem de moléculas de celulose em nanofibrilas (Jacek et al. 2019).	22
Figura 8 - As 5 etapas da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (Hauschild et al. 2015)...	25
Figura 9 - Visão geral das categorias de impacto cobertas no método ReCipe 2016 e a sua relação com as áreas de proteção (Huijbregts et al. 2017).	27
Figura 10 – Fronteira do sistema de avaliação do ciclo de vida Cradle-to-gate (Forte et al. 2021).	33

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Visão Geral das Categorias de Impacto de ponto médio e respetivos indicadores (adaptada de Huijbregts et al. 2017).....	28
Tabela 1 - Visão Geral das Categorias de Impacto de ponto médio e respetivos indicadores (adaptada de Huijbregts et al. 2017). (cont.)	29
Tabela 2 - Trajetórias de danos na ReCiPe 2016 (adaptada de Huijbregts et al. 2017).....	30
Tabela 2 - Trajetórias de danos na ReCiPe 2016 (adaptada de Huijbregts et al. 2017) (cont.).	31
Tabela 3 – Diferentes cenários para a produção de MMCF (Schultz et al. 2017)	35
Tabela 4 – Levantamento de informações relevantes do Relatório de Schultz et al. (2017), para o estudo comparativo.	36
Tabela 4 – Levantamento de informações relevantes do Relatório de Schultz et al. (2017), para o estudo comparativo (cont.).....	37
Tabela 5 – Levantamento de informações relevantes do trabalho de La Rosa et al. (2019), utilizado para o estudo comparativo.....	39
Tabela 6 - Informações importantes do Artigo de Liu et al. (2020) utilizado para o estudo comparativo.....	40
Tabela 6 - Informações importantes do Artigo de Liu et al. (2020) utilizado para o estudo comparativo (cont.).	41
Tabela 7 – Informações relevantes do Artigo de Stampino et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.....	42
Tabela 8 - Informações relevantes do Artigo de Guo et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.....	43

Tabela 8 - Informações relevantes do Artigo de Guo et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.)	44
Tabela 9 - Informações relevantes do Artigo de Shen et al. (2010) utilizado para o estudo comparativo.....	45
Tabela 9 - Informações relevantes do Artigo de Shen et al. (2010) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	46
Tabela 10 - Informações relevantes do Artigo de Gu et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo.....	46
Tabela 10 - Informações relevantes do Artigo de Gu et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	47
Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.....	48
Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	49
Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	50
Tabela 12 - Informações relevantes do Artigo de Piccinno et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo.....	51
Tabela 12 - Informações relevantes do Artigo de Piccinno et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	52
Tabela 13 - Informações relevantes do Artigo de Figueirêdo et al. (2012) utilizado para o estudo comparativo.....	53
Tabela 13 - Informações relevantes do Artigo de Figueirêdo et al. (2012) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	54
Tabela 14 - Informações relevantes do Informações relevantes do Artigo de Nascimento et al. (2016) utilizado para o estudo comparativo.....	55
Tabela 14 - Informações relevantes do Informações relevantes do Artigo de Nascimento et al. (2016) utilizado para o estudo comparativo (cont.).....	56
Tabela 15 - Resultados obtidos dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CB (Forte et al. 2021).....	57
Tabela 15 - Resultados obtidos dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CB (Forte et al. 2021) (cont.).....	58

Tabela 16 - Resultados da produção de 1 tonelada de MMCF calculados pelo método CML – April 2013 (Schultz et al. 2017).	59
Tabela 17 - Comparação dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CNF usando diferentes métodos de preparação com a produção de 1 kg de CB (Stampino et al. 2021).	60
Tabela 17 - Comparação dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CNF usando diferentes métodos de preparação com a produção de 1 kg de CB (Stampino et al. 2021) (cont.).	61
Tabela 18 - Resultados da comparação dos impactos causados pela produção de 1 kg de CNC com a produção de 1 kg de CB (Gu et al. 2015).	62
Tabela 19 - Resultados dos impactos ambientais da produção de 1 kg de CB excluindo as etapas de tratamento de águas residuais, embalagem e os impactos causados pela construção de equipamentos.	64
Tabela 20 - Impactos causados pela produção de MMCF para cada cenário considerado para a produção de 1 kg de MMCF.	65
Tabela 21– Comparação dos resultados obtidos para o novo processo de produção de CB, incluindo a etapa de produção de Viscose (Cenário A) e a etapa de produção de Lyocell (Cenário B) com os resultados obtidos, respectivamente, no Cenário 1 e no Cenário 9 por Schultz et al. (2017) para a produção de 1 kg de MMCF, pela metodologia CML April 2013.	66
Tabela 22 – Normalização dos dados obtidos por Stampino et al. (2021), Gu et al. (2015) e Schultz et al. (2017) tendo como referência os resultados obtidos por Forte et al. (2021), usando pressupostos comparáveis	67

Lista de Abreviaturas

LCA – Avaliação de Ciclo de Vida

NFC – Nanofibrilas de celulose

NCC – Nanocristais de celulose

CB – Celulose bacteriana

FCR – Fibras de Celulose Regenerada

NMMO – N-metilmorfolina-N-óxido

NC – Nanoceluloses

AAE – Avaliação Ambiental Estratégica

EIA – Avaliação de Impacto Ambiental

ERA – Avaliação de Risco Ambiental

CBA – Análise Custo-Benefício

MFA – Análise de Fluxo de Materiais

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SETAC – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

ILCD – Sistema de Dados de Ciclo de Vida de Referência Internacional

LCI – Inventário de Ciclo de Vida

LCIA – Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

UF – Unidade Funcional

RIVM – Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente

MMCF – Fibras de celulose artificiais

ENZHO – Pré-tratamento enzimático seguido de homogeneização

TOHO – Pré-tratamento oxidativo combinado com homogeneização

TOSO – Pré-tratamento oxidativo seguido de sonicação

1. Contextualização e organização

1.1. Contextualização

Com a crescente necessidade de materiais mais sustentáveis e amigos do ambiente, a Celulose Bacteriana (CB) surge como uma alternativa às tradicionais fontes de celulose. Entre outras aplicações, esta celulose poderia ser usada como substituto mais sustentável, alternativo ao algodão e polímeros sintéticos, na indústria têxtil. Num trabalho anterior foi realizado um estudo da sustentabilidade deste material com base na análise do ciclo de vida (LCA), através da metodologia ReCiPe 2016, pela empresa Satisfibre. Este estudo teve como objetivo a avaliação dos impactos ambientais, nomeadamente nas alterações climáticas, na saúde e no consumo de recursos associados à produção de celulose bacteriana (Forte et al. 2021).

Este estudo surge no contexto da procura, pelas indústrias, de produtos e processos mais ecologicamente viáveis. Assim, surgiu uma maior preocupação com a redução de impactos e riscos ambientais, nomeadamente aqueles que intervêm nas mudanças climáticas e no esgotamentos de recursos. Este processo tem conduzido ao desenvolvimento de novos bioprodutos e bioprocessos com baixo impacto e “mais verdes”.

O estudo previamente realizado para avaliação dos impactos ambientais associados à produção de celulose bacteriana (CB) foi neste trabalho complementado com a comparação entre esses impactos e os dados existentes (retirados da literatura) associados à produção de celulose vegetal. Como os dados disponíveis na literatura foram obtidos usando metodologias de LCIA diferentes, foi necessário convertê-los na base de cálculo adotada no estudo previamente realizado pela Satisfibre, por forma a determinar se existem diferenças significativas, na ótica da sustentabilidade, associadas à produção das celuloses vegetal e bacteriana.

1.2. Objetivo

O objetivo deste projeto foi fazer uma comparação de LCAs de diversos materiais análogos à celulose bacteriana, como por exemplo, a celulose regenerada, nanocelulose e algodão, usando o software GaBi Professional para conversão de dados na mesma base de dados do estudo feito primeiramente pela Satisfibre.

1.3. Estrutura da Dissertação

A estrutura da presente dissertação é dividida em 7 capítulos:

O capítulo 1 contextualiza o tema e apresenta os objetivos que se pretendem alcançar ao longo da realização do presente estudo comparativo, assim como apresentar a estrutura da dissertação.

O Estado da Arte é apresentado no capítulo 2, onde são explicados conceitos teóricos sobre diversos materiais têxteis (celulose vegetal, nanoceluloses, algodão e fibras regeneradas (Man Made Cellulose Fibres - MMCF) com o intuito de serem comparados com a Celulose Bacteriana. Numa segunda parte deste capítulo é abordado o conceito de Avaliação de Ciclo de Vida e também a Metodologia ReCiPe 2016, utilizada no estudo inicial da Satisfibre.

No capítulo 3 (Metodologia) é descrito todo o processo que levou a cabo o estudo comparativo, desde a pesquisa bibliográfica à comparação de resultados. Em seguida, é ainda identificado o software utilizado (GaBi Professional) e é relatado o processo de execução do estudo de LCA da Satisfibre.

O quarto capítulo (Resultados e Discussão) é dedicado à recolha de informações de todos os artigos analisados neste trabalho, resultados obtidos da comparação de LCA e discussão dos resultados. É ainda feita uma análise do impacto de certas partes do processo (como por exemplo o tratamento de águas), de modo a enquadrar as fronteiras de sistema utilizadas para o estudo, bem como uma normalização dos resultados, permitindo a sua comparação.

No capítulo 5 (Conclusões) são descritas as conclusões deste estudo comparativo assim como algumas sugestões de melhoria para um estudo futuro.

A seguir são apresentadas as Referências utilizadas para a concretização desta dissertação.

Por fim, são apresentados os Anexos, onde estão exemplificados cálculos para a determinação dos impactos causados pela produção de MMCF (Anexo A), para os impactos ambientais causados para os novos processos de produção de CB (Anexo B) e para a normalização dos dados (Anexo C).

2. Introdução

2.1. Celulose

A celulose é o polímero biodegradável mais abundante disponível, com uma capacidade total de produção estimada em 10^{11} a 10^{12} toneladas por ano. É um polímero com a fórmula $(n)C_6H_{10}O_5$, descoberto em 1838 por Anselme Payen, cuja estrutura é representada na **Figura 1**. Este homopolímero linear é formado por unidades de D-anidroglicopirranose unidas por ligações glicosídicas (Foroughi et al. 2021).

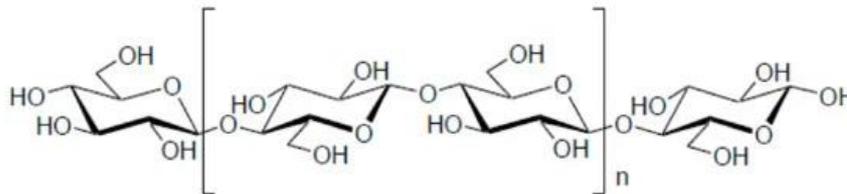


Figura 1 – Estrutura da Celulose (Foroughi et al. 2021).

É um polímero resistente, fibroso e insolúvel em água devido às suas ligações de hidrogénio inter e intramoleculares. Desempenha um papel essencial na manutenção da estrutura das paredes celulares das plantas. É um polímero natural renovável, sendo considerado uma alternativa aos polímeros à base de combustíveis fósseis não degradáveis. As principais fontes de celulose são a madeira, cânhamo, algodão e linho e, também, bactérias como *Acetobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Sarcina*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Aerobacter* e *Azotobacter* (Mohamed et al. 2017).

Existem diversos materiais derivados das fibras de celulose, como indicado na **Figura 2**: nanofibras de celulose (NFC), nanocristais de celulose (NCC), acetato de celulose, celulose bacteriana (CB), celulose regenerada e hidrogeis/aerogeis de celulose (Mohamed et al. 2017).

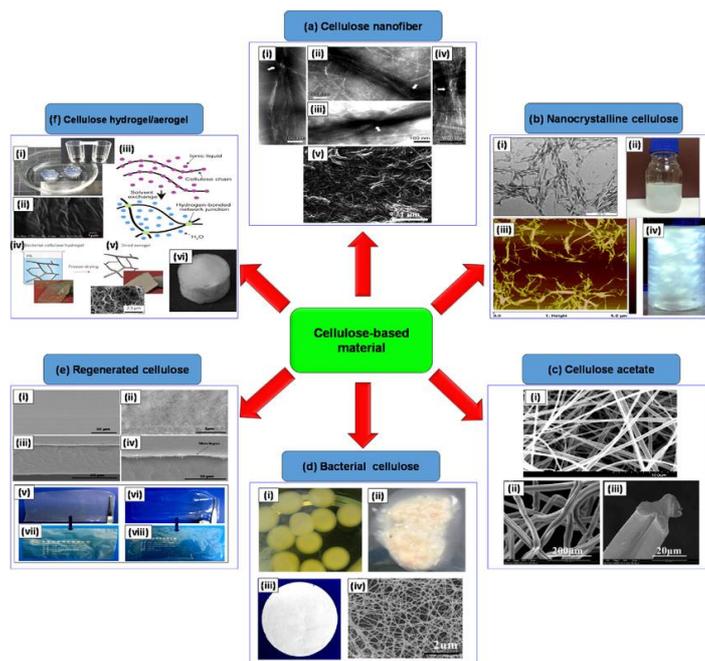


Figura 2 – Diferentes tipos de materiais à base de celulose (Mohamed et al. 2017).

2.2. Fibras têxteis

Existe crescentemente a necessidade de desenvolver abordagens verdes e sustentáveis em toda a cadeia de abastecimento da indústria têxtil. O crescimento populacional e o consequente aumento do consumo de fibras têxteis conduzem à procura de matérias-primas e processos sustentáveis. As fibras são o ponto de partida para todos os produtos têxteis e podem ser divididas em duas categorias: Fibras Naturais e Fibras Artificiais (Man-Made), conforme mostra a **Figura 3**. Até ao final do século XIX, todas as fibras têxteis produzidas eram de origem natural, principalmente de fontes vegetais como o algodão, cânhamo e linho, mas também de fontes animais como lã e seda. Com a Revolução Industrial, o processo de fabrico foi mecanizado e, a partir da década de 1900, surgiram as primeiras fibras artificiais. As fibras regeneradas, mais especificamente o método Viscose, tornou-se rapidamente o método de produção de fibras (*man made*) dominante do mercado têxtil. As fibras sintéticas surgiram apenas na década de 1940, feitas a partir de polímeros sintetizados quimicamente (Felgueiras et al. 2021).

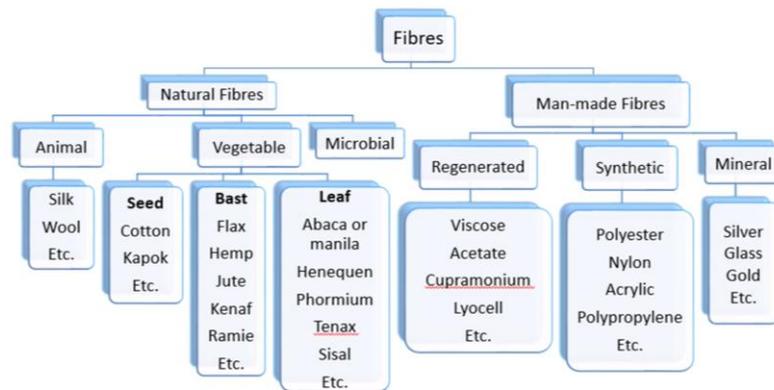


Figura 3 - Classificação das principais fibras naturais e artificiais (Felgueiras et al. 2021).

2.2.1. Algodão

O algodão é a fibra natural mais usada em todo o mundo, representando um terço do mercado têxtil entre 2000 e 2016. O cultivo de algodão é geralmente feito em áreas subtropicais e sazonalmente secas, nomeadamente no Hemisfério Norte. Os países mais comuns para o seu cultivo são a Índia, China, Estados Unidos, Brasil e Paquistão. O cultivo de algodão em Africa está representado na **Figura 4**, a título de exemplo. A produção de algodão exige cerca de 32 milhões de hectares de terras de cultivo em mais de 75 países em todo o mundo. O consumo global de algodão é de aproximadamente 31,8 milhões de toneladas, sendo mais de 20 milhões usadas na indústria têxtil (dados da FAO). Apesar de ser uma fibra natural, o algodão consome grandes quantidades de água e exige a utilização de fertilizantes e pesticidas em grandes quantidades para garantir o rendimento da produção, levando à eutrofização e toxicidade dos solos (Chen et al. 2021). Assim, a busca de outras fibras que possam substituir o algodão é uma das questões económicas e ambientais mais discutidas na indústria têxtil. As fibras de algodão recicladas têm atraído muita atenção devido ao seu valor económico e desempenho ambiental (Liu et al. 2020).



Figura 4 - Cultivo de algodão em África (OGM).

2.2.2. Fibras de Celulose Regeneradas (FCR)

As fibras de celulose regeneradas (FCR) – um tipo de MMCF – são obtidas por dissolução e regeneração a partir de celulose de biomassa florestal. A polpa de madeira e os linters de algodão são as matérias-primas mais comuns. As FCR incluem Viscose, Acetato, Lyocell, Modal e Cupro. O consumo e produção das FCR começou após a Segunda Guerra Mundial e foi aumentando até à década de 1960, altura em que estas fibras dominaram o mercado das fibras têxteis. O volume de produção global de FCR duplicou desde 1990. A Viscose é a FCR dominante, com uma participação de mercado de cerca de 79% de todas as FCR e um volume de produção de cerca de 5,63 milhões de toneladas em 2019 (Felgueiras et al. 2021).

O **processo de Viscose** é o método mais amplamente usado para a produção de FCR. No último século esse processo sofreu muitas alterações, o que permitiu que a Viscose se tornasse uma das FCR mais utilizada. Este processo é esquematizado na **Figura 5**. Consiste em suspender a celulose em NaOH e, após maceração, trituração e envelhecimento. A celulose envelhecida é tratada com dissulfeto de carbono (CS_2) para formar o xantato de celulose. Para terminar o estágio inicial da formação de Viscose, esse derivado é dissolvido em NaOH menos concentrado. Em seguida, o polímero é precipitado em ácido, para neutralizar e regenerar em simultâneo a celulose, através de um equipamento de fiação húmida. Seguem-se várias etapas de lavagem e extração produzindo uma fibra regenerada de celulose pura. A produção de fibras por este processo causa problemas ambientais significativos, devido ao alto uso de produtos químicos. O ciclo de vida do processo Viscose engloba outros impactos, associados à forma como os reagentes são produzidos e reciclados, bem como o consumo de energia, o uso de combustível fóssil e o desmatamento (Felgueiras et al. 2021).

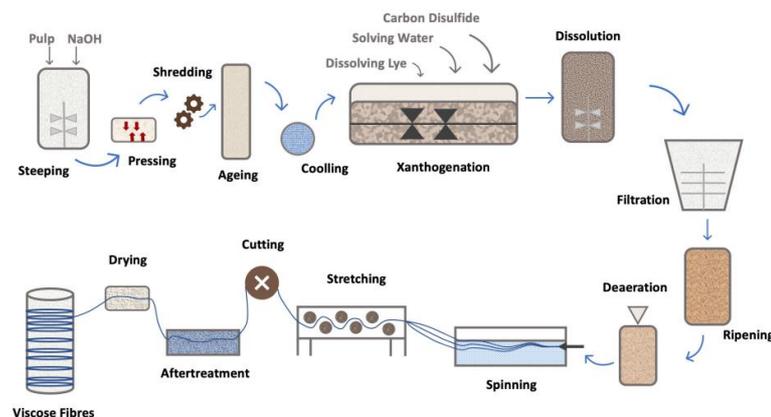


Figura 5 - Esquema de produção de fibra Viscose (Felgueiras et al. 2021).

O **processo Lyocell** é uma tecnologia de obtenção de fibras celulósicas por dissolução direta, resultando em fibras com propriedades excepcionais, tornando-se um sério concorrente do processo Viscose, por ser mais ecologicamente correto. A dissolução da celulose é feita através do solvente N-metilmorfolina-N-óxido, comumente conhecido como **NMMO**. Este solvente tem a capacidade de dissolver diretamente altas concentrações de celulose, preservando as propriedades químicas do polímero. O primeiro sistema industrial usado para dissolver a celulose com NMMO está descrito na **Figura 6**. A celulose deve primeiro ser triturada em pequenas partículas para melhorar a área de contato superficial com NMMO. Em seguida, é misturado com NMMO a uma temperatura de 70-90 °C, com refinadores de alta velocidade, para quebrar ainda mais a celulose. A celulose resultante é submetida a temperaturas entre 90-120 °C, sob vácuo, para remover o excesso de água, produzindo uma solução clara de cor âmbar escura. Este aquecimento é realizado a baixa pressão de modo a reduzir a temperatura necessária para a evaporação da água, evitando que o solvente sofra degradação exotérmica. Após a dissolução, as impurezas, como fibras de celulose não dissolvidas, são filtradas. A mistura é agitada através de uma abertura de ar num banho de rotação com um líquido polar, como água ou álcool. Esses agentes de coagulação são miscíveis com NMMO, removendo-o da solução de celulose (Felgueiras et al. 2021).

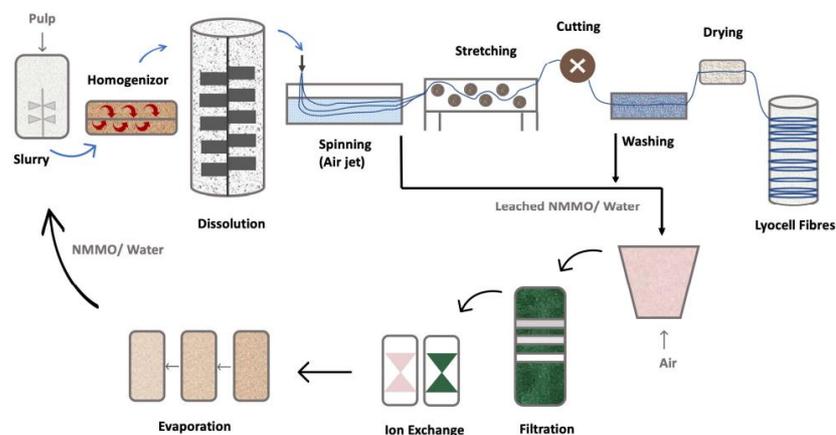


Figura 6 - Processo Lyocell baseado no solvente NMMO (Felgueiras et al. 2021).

2.3. Nanoceluloses (NC)

A procura por novas formas de celulose está a aumentar, devido às propriedades atraentes dos nanomateriais. As nanofibras de celulose são derivadas de recursos renováveis, apresentam propriedades excepcionais e são biodegradáveis no fim das suas vidas. Elas oferecem potenciais benefícios ambientais em relação a outros materiais, como fibras de carbono ou vidro, ajudando a economizar materiais e energia, substituindo substâncias perigosas e usando recursos

renováveis (Piccinno et al. 2015). Algumas das características relevantes das nanoceluloses incluem as excelentes propriedades mecânicas e biodegradabilidade. As nanoceluloses podem ser classificadas segundo o seu tamanho e aparência ou segundo os métodos de preparação. Assim, de acordo com diferentes métodos de preparação e matérias-primas, a nanocelulose pode ser dividida em 3 subcategorias: **(1)** celulose nanofibrilar (NFC), que é preparada a partir de fibras vegetais através de tratamentos químicos, mecânicos ou combinando os dois; **(2)** nanocristais de celulose (NCC) ou nanowhiskers, produzida através da hidrólise ácida e **(3)** nanocelulose bacteriana (NCB) produzida a partir de certas bactérias (Foroughi et al. 2021).

2.3.1. Celulose Bacteriana (CB)

A celulose bacteriana é produzida essencialmente por bactérias Gram-negativas produtoras de ácido acético. A síntese de CB pode ser feita por bactérias dos géneros *Gluconacelobacter*, *Agrobacterium*, *Sarcina* e *Komagataeibacter*, por meio de fermentação microbiana. O género *Komagataeibacter* é o mais importante devido ao alto rendimento de celulose obtido a partir de uma ampla gama de fontes de carbono/nitrogénio (Forte et al. 2021; Noemi et al. 2020). A produção de CB, em condições de cultura estática, consiste num filme gelatinoso conseguido pelo arranjo nanofibrilar tridimensional (3D) de fibras celulósicas puras (Fernandes et al. 2019).

O processo de síntese de CB é semelhante ao processo de produção de Celulose Vegetal e está representado na **Figura 7**. É sintetizada em duas etapas, sendo a primeira a produção de cadeias de β -1,4-glucano e a segunda a cristalização da celulose. A conversão de glucose em celulose requer quatro etapas enzimáticas (**Figura 7**): fosforilação da glucose pela glucoquinase em glucose-6-fosfato (G6P); isomerização de glucose-6-fosfato em glucose-1-fosfato (G1P) pela fosfoglucomutase (PGM); conversão de glucose-1-fosfato em difosfato de uridina-glucose (UDP-glucose) pela UDP-glucose pirofosforilase; e, finalmente, a síntese de celulose a partir da UDP-glucose pela celulose sintase (Bcs), um complexo de quatro subunidades, BcsA, BcsB, BcsC e BcsD. A UDP-glucose pirofosforilase é uma enzima chave neste processo, uma vez que sua atividade em bactérias produtoras de celulose é cem vezes maior do que nas não produtoras (Jacek et al. 2019).

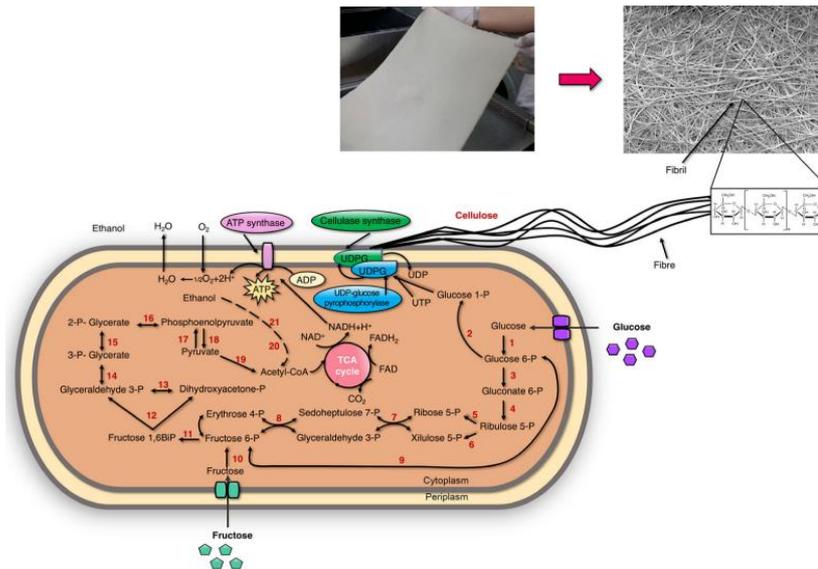


Figura 7 – Vias para a biossíntese de Nanocelulose Bacteriana por *K. xylinus* e montagem de moléculas de celulose em nanofibrilas (Jacek et al. 2019).

As propriedades físico-químicas e mecânicas da CB são únicas, quando comparadas à celulose vegetal. A CB tem uma elevada pureza, uma vez que não contém lenhina, hemicelulose e pectina na sua constituição e, portanto, não necessita de processos de purificação. As fibras de CB têm uma elevada área de superfície específica, devido à sua rede tridimensional de nanofibras interconectada e organizadas aleatoriamente. Esta característica concede à CB propriedades vantajosas para a produção de materiais compósitos. A CB consegue ainda alcançar uma elevada cristalinidade que, quando combinada à sua arquitetura nanofibrilar 3D, resulta num elevado módulo de Young. Também possui um grau elevado de polimerização, alta capacidade de absorção e retenção de água, uma elevada resistência à tração no estado húmido, podendo ser moldada em estruturas tridimensionais durante a síntese (Fernandes et al. 2019; Forte et al. 2021). Este polímero é utilizado em várias aplicações como na área biomédica, indústria têxtil, produção de papel, displays eletrónicos de papel, cosméticos e em aplicações alimentícias (Forte et al. 2021).

A produção de CB continua a ser um desafio devido às baixas taxas de produtividade, sistemas de fermentação ineficazes, alto investimento de capital e altos custos operacionais. Assim, a aplicação de CB tem sido centrada essencialmente em dois mercados: na indústria de alimentos produzidos por métodos tradicionais de fermentação, principalmente desenvolvidos e consumidos em países asiáticos e na indústria cosmética e em aplicações médicas, mercados de elevado valor agregado (Forte et al. 2021).

2.4. Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)

Devido às mudanças climáticas e outros eventos que ameaçam o ambiente, é necessário que as empresas, indivíduos, administrações públicas e formuladores de políticas visando uma economia mais sustentável. Assim sendo, têm sido desenvolvidas ferramentas e indicadores para avaliar e comparar os impactos ambientais de diferentes produtos, processos e sistemas. Algumas dessas ferramentas são a Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), Avaliação Ambiental Estratégica (AAE), Avaliação de Impacto Ambiental (EIA), Avaliação de Risco Ambiental (ERA), Análise Custo-Benefício (CBA), Análise de Fluxo de Materiais (MFA) e Pegada Ecológica (Finnveden et al. 2009).

A Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é uma metodologia usada para quantificar os recursos consumidos e as emissões produzidas, bem como os impactos ambientais, na saúde e esgotamento de recursos relacionados com um processo industrial (European Commission, 2010). Estes impactos são medidos ao longo do ciclo de vida de um produto (bem ou serviço), desde a aquisição da matéria-prima, passando pelo processo de produção e a fase de uso até à gestão de resíduos. Esta última fase compreende a eliminação e também a reciclagem de resíduos. (Finnveden et al. 2009).

O crescente interesse por esta metodologia surgiu na década de 1990 e, desde então, ocorreu um forte desenvolvimento e harmonização desta. A robustez da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida tem sido gradualmente alcançada. Para isso existem também iniciativas internacionais que têm como intuito ajudar a construir um consenso e a fornecer recomendações, tais como: o Ciclo de Vida do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA); a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC); a Plataforma Europeia para LCA da Comissão Europeia e o precedente Sistema de Dados de Ciclo de Vida de Referência Internacional (ILCD) (Finnveden et al. 2009).

Muitos fabricantes de fibras têxteis têm vindo a adotar a abordagem LCA para avaliar os impactos ambientais dos produtos que desenvolvem. Normalmente, os estudos de LCA são realizados por empresas de consultoria ou institutos de pesquisa independentes. Contudo, apesar do crescente número de estudos LCA nesta área, é frequentemente difícil interpretar os resultados obtidos porque são utilizadas metodologias diferentes. Por outro lado, não há bancos de dados de inventário de ciclo de vida suficientes para construir pesquisas científicas adicionais (Velden et al. 2014).

Um estudo de LCA é dividido em quatro fases: Definição do Objetivo e Projeto; Análise de Inventário do Ciclo de Vida (LCI), Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) e Interpretação (Finnveden et al. 2009):

2.4.1. Definição do Objetivo e Projeto

A definição de metas é a primeira fase de qualquer LCA. Nesta fase são incluídas as razões para a realização do estudo, a aplicação que se pretende e o público-alvo, bem como a descrição dos limites do sistema em estudo e a unidade funcional (UF). A UF é uma medida quantitativa das funções que os bens (ou serviços) fornecem (Comissão Europeia, 2010; Finnveden et al. 2009). A definição de objetivos é decisiva para todas as restantes fases de LCA, uma vez que:

- Orienta todos os aspetos detalhados da definição de projeto, o que traduz a estrutura para o trabalho de Inventário do Ciclo de Vida (LCI) e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA);
- Controla a qualidade do trabalho realizado tendo em conta os requisitos derivados das metas propostas;
- O estudo LCI, a avaliação dos resultados e a interpretação dos mesmos também devem estar estritamente relacionados com o objetivo do trabalho.

2.4.2. Inventário do Ciclo de Vida (LCI)

A LCI diz respeito à compilação das entradas (recursos) e saídas (emissões) do produto ao longo do seu ciclo de vida, em relação à unidade funcional. Ao longo da fase de LCI devem ser feitas a coleta de dados real e a modelagem do sistema. Estas tarefas devem ser realizadas de acordo com as metas definidas e atendendo aos requisitos derivados da fase de projeto. Os resultados obtidos da LCI são os dados de entrada para a fase de LCIA e, também, são usados para dar feedback à fase de projeto, que normalmente necessita de ajustes ao longo do processo. Esta fase é a que requer mais esforços e recursos numa LCA, uma vez que exige a coleta, aquisição e modelagem de dados (Comissão Europeia, 2010; Finnveden et al. 2009).

2.4.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA)

A avaliação e compreensão da magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais do sistema em estudo é feita através da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) (Finnveden et al. 2009). A LCIA é a fase onde as entradas e saídas de fluxos elementares coletados no inventário são traduzidos em indicadores de impacto relacionados à saúde, meio ambiente e esgotamento de recursos, isto é, traduz as emissões e o consumo de recursos num número limitado de categorias de impacto ambiental. Isto é feito recorrendo aos fatores de

caraterização que mostram o impacto ambiental por unidade de massa de recurso utilizado ou emissão libertada. Estes fatores de caraterização são divididos em i) nível de ponto médio, (o indicador para uma categoria de impacto está localizado num ponto intermediário no caminho de impacto subjacente) – concentram-se em problemas ambientais individuais; ou em ii) nível de ponto final (indicadores localizados no final da trajetória de impacto) – demonstrando os impactos ambientais em três áreas de proteção, ou seja, saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos. Os indicadores de ponto médio são considerados mais robustos cientificamente, enquanto os indicadores de ponto final são mais fáceis de interpretar. O número de categorias de impacto incluídas nesta metodologia é superior a 10, sendo incluídos impactos como o aquecimento global, destruição da camada do ozono estratosférico, toxicidade humana e acidificação (Comissão Europeia, 2010; Hauschild et al. 2015).

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida consiste em 5 etapas, de acordo com a norma ISO 14040, que são descritas na **Figura 8**.

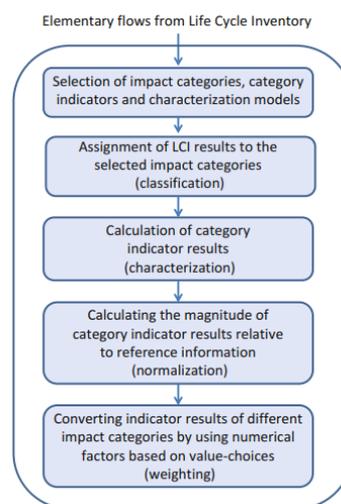


Figura 8 - As 5 etapas da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (Hauschild et al. 2015).

1ª – Seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização (Seleção) – os impactos a serem abordados são selecionados de acordo com o objetivo do estudo e um método escolhido para cada categoria de impacto (Hauschild et al. 2015).

2ª – Atribuição dos resultados de LCI às categorias de impacto selecionadas (Classificação) – são atribuídos os fluxos elementares de inventário (p.e. consumo de recursos e emissões) às categorias de impacto relevantes das que foram selecionadas na primeira etapa,

de acordo com a capacidade de atribuição para diferentes problemas ambientais (Hauschild et al. 2015).

3ª – Cálculo dos resultados do indicador de categoria (Caraterização) – o valor resultante para cada fluxo elementar atribuído a uma categoria de impacto é multiplicado pelo fator de caraterização. Este fator de caraterização representa a importância de uma categoria de impacto específica. Todas as pontuações dos indicadores para todos os fluxos elementares que contribuem para uma categoria de impacto são somados, de modo a obter a pontuação total dessa categoria (Hauschild et al. 2015).

4ª – Cálculo da magnitude dos resultados do indicador da categoria de impacto em relação às informações de referência (Normalização) – as pontuações dos indicadores, resultantes da etapa de caraterização, são reportadas em métricas diferentes entre categorias de impacto, pelo que é necessário que sejam expressas em relação a um conjunto comum de informações de referência disponíveis para todas as categorias (Hauschild et al. 2015).

5ª – Conversão de resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto usando fatores numéricos baseados em escolhas de valor (Ponderação) – aplicação de fatores de ponderação que representam a importância atribuída a cada categoria de impacto. Após a ponderação os resultados podem ser agregados a uma única pontuação por categoria de impacto, facilitando a interpretação (Hauschild et al. 2015).

2.4.4. Interpretação

A etapa de Interpretação de um estudo LCA tem dois objetivos principais:

- Direcionar o trabalho para melhorar o modelo de LCI atendendo aos objetivos do estudo, durante as etapas interativas da Análise do Ciclo de Vida.
- Derivar conclusões robustas e recomendações.

Os resultados das outras etapas são considerados em conjunto e analisados através da exatidão, completude e precisão alcançadas pelos dados aplicados e pelas premissas feitas ao longo do estudo de LCA. A Interpretação deve apresentar os resultados do estudo LCA de forma compreensível e ajudar o usuário do estudo a avaliar as conclusões e entender as limitações potencialmente existentes no estudo LCI e/ou LCA.

2.5. Metodologia ReCiPe 2016

A metodologia ReCiPe 2008 é um método de avaliação do impacto do ciclo de vida desenvolvido por Goedkoop et al. (2009). Esta metodologia fornece fatores de caracterização

harmonizados em níveis de ponto médio e ponto final. Este modelo foi atualizado para a versão ReCiPe 2016 por meio da cooperação entre o Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente (RIVM), Radboud University Nijmegen, Leiden University e Pré Consultants (Goedkoop et al. 2009). Esta atualização da ReCiPe centrou-se em dois pontos: **(1)** fornecer fatores de caracterização representativos para a escala global mantendo, no entanto, a possibilidade das várias categorias de impacto implementarem fatores de caracterização em escala nacional e continental, e **(2)** melhorar os métodos aplicados para modelar fatores de ponto médio e ponto final (Huijbregts et al. 2017).

2.5.1. Método de Framework

O modelo de Framework é proposto na ReCiPe 2008 e propõe como áreas de proteção (indicadores de ponto final) a saúde humana, qualidade dos ecossistemas e escassez de recursos. A unidade referente a danos para a saúde humana (DALYs) representa o número de anos perdidos ou que uma pessoa fica incapacitada devido a uma doença ou acidente. A unidade relacionada com a qualidade dos ecossistemas pondera a perda relativa local de espécies em ecossistemas terrestres, de água doce e marinhos integrados no espaço e no tempo. A unidade de escassez de recursos traduz o valor monetário (em dólares) que representa os custos extra envolvidos para a extração futura de fósseis e minerais (Huijbregts et al. 2017).

A visão geral das categorias de impacto cobertas no método ReCipe 2016 e a sua relação com as áreas de proteção está representada na **Figura 9**.

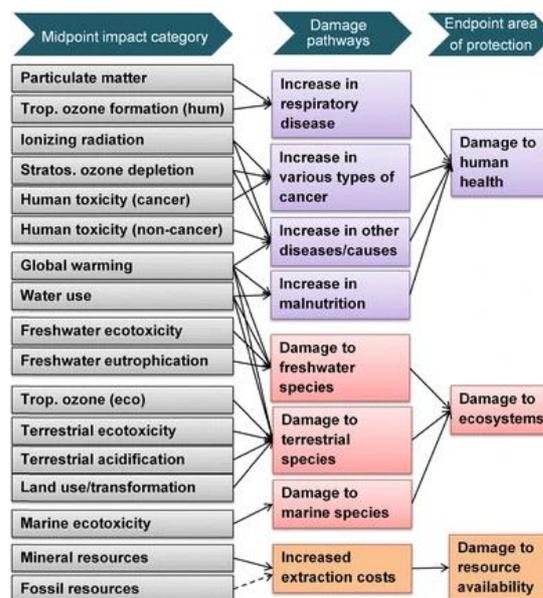


Figura 9 - Visão geral das categorias de impacto cobertas no método ReCipe 2016 e a sua relação com as áreas de proteção (Huijbregts et al. 2017).

Os critérios aplicados para selecionar os modelos ambientais presentes na ReCiPe 2016 foram os seguintes (Huijbregts et al. 2017):

- Modelos que se refiram a uma escala global;
- Modelos que reflitam o estado atual da arte na ciência;
- Modelos que mantenham a consistência entre a modelagem de diferentes categorias de impacto especialmente relevantes para a toxicidade;
- Preferência de modelos que possam ser executados internamente pelo consórcio ReCiPe.

A metodologia ReCiPe 2016 fornece três conjuntos de fatores de caracterização de ponto médio e ponto final, pelo que melhora a sensibilidade dos resultados obtidos numa LCA. Cada cenário visa um período de tempo para poluentes de vida longa: **(1)** 20 anos, **(2)** 100 anos e **(3)** 1000 anos (infinito). O terceiro cenário nem sempre foi infinito, pois nem todos os modelos ambientais fornecem informações suficientes para modelar estas condições de regime permanente. Foi ainda incluído o nível de evidência disponível para os efeitos ambientais considerados para os impactos relacionados à destruição da camada do ozono, radiação ionizante, toxicidade, formação de partículas finas e uso de água. Neste caso, apenas foram considerados dois cenários: **(1)** um horizonte temporal de 20 anos e **(2)** um horizonte temporal de 1000 anos, para ser possível avaliar casos extremos (Huijbregts et al. 2017).

Os indicadores de ponto médio estão identificados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Visão Geral das Categorias de Impacto de ponto médio e respetivos indicadores (adaptada de Huijbregts et al. 2017).

Categorias de Impacto de Ponto Médio	Fatores de Caracterização	Indicador	Unidades de Referência
Alterações Climáticas	Potencial de Aquecimento Global	Aumento do forçamento radioativo infravermelho	kg CO ₂ – eq.
Destruição do Ozono Estratosférico	Potencial de Destruição de Ozono	Diminuição na concentração de ozono estratosférico	kg CFC*-11 – eq.
Radiação Ionizante	Potencial de Radiação Ionizante	Aumento da dose absorvida	Co-60 – eq.
Formação de Partículas Finas	Potencial de Formação de Matéria Particulada	Aumento da ingestão de PM 2.5 pela população	kg PM 2.5** – eq.

Tabela 1 - Visão Geral das Categorias de Impacto de ponto médio e respetivos indicadores (adaptada de Huijbregts et al. 2017). (cont.)

Categorias de Impacto de Ponto Médio	Fatores de Caracterização	Indicador	Unidades de Referência
Formação Fotoquímica de Ozono	Potencial de Formação de Ozono – Humanos	Aumento da ingestão de ozono pela população	kg NO _x – eq.
Acidificação Terrestre	Potencial de Acidificação Terrestre	Aumento de protões em solos naturais	kg SO ₂ – eq.
Eutrofização de Água Doce	Potencial de Eutrofização da Água Doce	Aumento de fósforo em água doce	kg P – eq.
Toxicidade	Potencial de Toxicidade Humana, Terrestre, Água Doce e Marinha	Aumento do risco de doença cancerígena e/ou não cancerígena; Aumento do perigo de contaminação de solos, água doce e águas marinhas	kg 1,4-DCB*** – eq.
Uso da Água	Potencial de Consumo de Água	Aumento da água consumida	m ³ água – eq. consumida
Uso da Terra	Potencial de Ocupação da Terra	Ocupação e transformação da terra ao longo do tempo	m ² × anos terra cultivada anualmente – eq.
Escassez de Recursos Minerais	Potencial de Minério Excedente	Aumento da extração de minérios	kg Cu – eq.
Escassez de Recursos Fósseis	Potencial de Combustível Fóssil	Valor de aquecimento superior	kg combustível – eq.

*CFC – Clorofluorocarbonetos; **PM 2.5 – Matéria Particulada com menos de 2.5 micrómetros; ***DCB – Diclorobenzeno

Na **Tabela 2** estão representados os fatores de dano considerados para uma trajetória de ponto médio para ponto final na ReCiPe 2016 e estão classificadas por problema ambiental (Huijbregts et al. 2017).

Tabela 2 - Trajetórias de danos na ReCiPe 2016 (adaptada de Huijbregts et al. 2017).

Problema Ambiental	Área de Proteção	Trajectoria de Dano
Alterações Climáticas	<p>Saúde Humana</p> <p>Ecosistemas (terrestres)</p> <p>Ecosistemas (água doce)</p>	<p>Anos de vida perdidos relacionados ao aumento de doenças, desnutrição e desastres naturais devido ao aquecimento da temperatura média global</p> <p>Perdas de espécies relacionadas à mudança de biomas devido ao aumento da temperatura média global</p> <p>Perdas de espécies de peixes devido à diminuição da vazão do rio</p>
Destruição do Ozono Estratosférico	Saúde Humana	Anos de vida perdidos relacionados ao aumento de cancro de pele, cataratas devido à exposição aos raios UV
Radiação Ionizante	Saúde Humana	Anos de vida perdidos relacionados a um aumento de doenças hereditárias devido à exposição à radiação
Formação de Partículas Finas	Saúde Humana	Anos de vida perdidos relacionados a um aumento de doenças cardiopulmonares e de pulmão causado pela exposição a aerossóis primários e secundários
Formação Fotoquímica de Ozono	<p>Saúde Humana</p> <p>Ecosistemas (terrestres)</p>	<p>Anos de vida perdidos relacionados ao aumento de doenças respiratórias causadas pela exposição ao ozono</p> <p>Perda de espécies de plantas devido ao aumento da exposição ao ozono</p>
Acidificação Terrestre	Ecosistemas (terrestres)	Perda de espécies de plantas devido à diminuição de pH do solo
Eutrofização de Água Doce	Ecosistemas (aquáticos)	Perda de espécies aquáticas devido ao aumento das concentrações de fósforo

Tabela 2 - Trajetórias de danos na ReCiPe 2016 (adaptada de Huijbregts et al. 2017) (cont.).

Problema Ambiental	Área de Proteção	Trajetória de Dano
Toxicidade	Saúde Humana	Anos de vida perdidos devido ao cancro e efeitos não cancerígenos devido à ingestão e inalação de substâncias tóxicas
	Ecosistemas (marinhos)	Perda de espécies devido à exposição química em águas marinhas
	Ecosistemas (terrestres)	Perda de espécies devido à exposição química em solos
	Ecosistemas (água doce)	Perda de espécies devido à exposição química em água doce
Uso da Água	Saúde Humana	Desnutrição causada pela falta de água Diminuição da Produtividade Primária Líquida devida à escassez de água como proxy para a perda total de espécies
	Ecosistemas (terrestres)	Perda de espécies de peixes devido à diminuição da vazão do rio
	Ecosistemas (aquáticos)	
Uso da Terra	Ecosistemas (terrestres)	Perda de espécies devido a diferentes tipos de uso da terra (agricultura, silvicultura, edificações) Perda de espécies causada pela transformação de terra natural em terra usada, incluindo o tempo que leva para transformar novamente em terra natural
Escassez de Recursos Minerais	Escassez de recursos	Aumento de custo devido ao aumento da extração mineral
Escassez de Recursos Fósseis	Escassez de recursos	Aumento de custo devido ao aumento da extração de fósseis

3. Metodologia

3.1. Estudo Comparativo

Para a execução deste projeto, numa primeira fase foi necessário recorrer a bibliotecas online para a realização de pesquisa bibliográfica, de modo a encontrar artigos científicos e relatórios relevantes para a realização do estudo pretendido, isto é, de acordo com os critérios utilizados pela Satisfibre na produção de CB, nomeadamente no que diz respeito às fronteiras do sistema (Tabela 3). Numa segunda fase foi feito o levantamento de informações relevantes de cada artigo e relatório, de modo a identificar os seguintes parâmetros:

- Tipo de matéria-prima;
- Âmbito do estudo;
- Fronteira do sistema;
- Unidade Funcional;
- Pressupostos;
- Balanços mássicos e energéticos;
- Metodologia LCIA e respetiva versão;
- Base de dados e respetiva versão.

Após esta triagem, foram identificados os artigos que melhor se ajustam à fronteira de sistema utilizado no processo de produção de CB pela Satisfibre. O passo seguinte foi fazer a conversão dos impactos calculados para a produção de CB pela metodologia ReCiPe 2016 para a mesma metodologia usada em cada artigo selecionado. Em seguida, com os dados convertidos para as metodologias dos artigos selecionados, foi feita uma análise da variação das fronteiras do sistema, avaliando o peso de algumas etapas no processo de produção de CB (tratamento de águas residuais, embalagem e construção de equipamentos) nos impactos calculados. Foi também adicionada uma etapa de produção de Fibras de Celulose Man-Made (MMCF) ou artificiais (processo de Viscose e Lyocell) a partir de CB, de modo a ser possível comparar os impactos desse processo de MMCF a partir de CB e a partir de biomassa florestal. Por fim, foi realizada uma normalização dos dados (considerando os impactos obtidos por Forte et al. (2021) como referência), de modo a ser possível fazer a comparação direta dos impactos resultantes dos diferentes processos.

3.2. Software GaBi Professional

O GaBi Professional é o software de avaliação de ciclo de vida líder do mercado, disponibilizando uma atualização regular dos bancos de dados. Os dados fornecidos pelo GaBi Pro são derivados da literatura científica, fontes da indústria e informações de patentes, sendo, portanto, um banco de dados robusto para avaliar produtos, serviços, processos e materiais (Sphera, 2022). O banco de dados fornece muitos processos e planos diferentes, sendo o mais comum cradle-to-gate. Estão incluídas todas as categorias de impacto padrão e metodologias de impacto como CML, ReCiPe, EDIP, TRACI, IO2+, UBP, EF 2.0 e 3.0, EN15804, Usetox, IPCC AR5, Odour, AADP (Sphera, 2022). No contexto deste projeto, o software GaBi Pro será utilizado para converter os dados obtidos na literatura na mesma base de cálculo adotada no estudo anteriormente desenvolvido (ReCiPe 2016), de modo a ser possível a sua comparação.

3.3. Estudo da Satisfibre

O objetivo do estudo desenvolvido pela Satisfibre foi quantificar os impactos ambientais do processo, orientando o desenho em escala comercial para a futura produção de CB visando a minimização dos impactos ambientais. Como matérias-primas Forte et al. (2021) usaram melações e xarope de milho. Forte et al. (2021) utilizaram como unidade funcional para o estudo de LCA a produção de 1 kg de CB (base seca) e optaram por uma perspectiva **Cradle-to-gate**. Esta perspectiva inclui desde a produção de matérias-primas para a produção de CB, até à produção de final de CB. Esta perspectiva foi utilizada uma vez que a CB é um material que podem conter muitas aplicações a jusante, algumas das quais ainda não foram completamente desenvolvidas. A fronteira do sistema está representada na **Figura 10**.

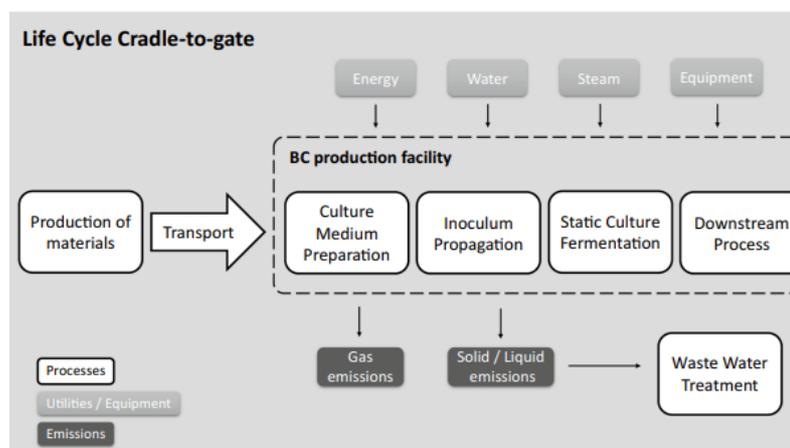


Figura 10 – Fronteira do sistema de avaliação do ciclo de vida Cradle-to-gate (Forte et al. 2021).

Neste estudo foi considerado o tratamento de efluentes líquidos produzidos e foi ponderada a produção e transporte de matérias-primas utilizadas na produção de CB.

A metodologia de LCIA utilizada por Forte et al. (2021) para a realização do estudo LCA foi a ReCiPe 2016 Midpoint (H). Todos os dados recolhidos para a realização deste estudo foram de origem primária e foi, também, utilizada a base de dados Ecoinvent através do software GaBi Pro V.9.2.1.68. As informações recolhidas nesta secção serviram como base para o estudo comparativo, isto é, apenas serão utilizados artigos que tenham critérios de apreciação semelhantes.

4. Resultados e Discussão

4.1. Seleção dos artigos para o estudo comparativo

Inicialmente, foi necessário fazer uma pesquisa alargada de diversos artigos relacionados a LCA's de materiais de origem celulósica na indústria têxtil. Recorreu-se ao RepositoriUM da Universidade do Minho para recolher artigos relevantes para este estudo, usando palavras-chave como “Avaliação do Ciclo de Vida”, “Celulose”, “Indústria Têxtil”, “Algodão”, entre outras. Foi também utilizada a plataforma do Google Académico para fazer a pesquisa bibliográfica, utilizando o mesmo método de procura. Ao fim da pesquisa, foram recolhidos muitos trabalhos possíveis para a comparação pretendida. No entanto, apenas foram utilizados 11 artigos para o estudo, uma vez que, foram aqueles que melhor se ajustavam ao que era pretendido. Para proceder ao estudo comparativo foi necessário recorrer a uma análise detalhada de cada artigo por forma a avaliar se os resultados podem ser diretamente comparados, isto é, se se baseiam em pressupostos semelhantes, nomeadamente no que se refere aos limites do sistema. Assim, nos subcapítulos a seguir são detalhados todos os 11 artigos e referidas as razões para a sua inclusão ou exclusão no estudo.

4.1.1. Análise do artigo de Schultz et al (2017)

Este estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) avaliou o perfil de impacto do ciclo de vida das fibras de celulose artificiais – **ManMade Cellulose Fibers** (MMCF) – feitas a partir de celulose originária de dez fontes diferentes. As MMCF são derivadas de cinco matérias-primas diferentes (madeira de diferentes regiões florestais, polpa de bambu, algodão, subprodutos de linho e roupas recicladas), com cadeias de suprimentos de quatro continentes (Alemanha, Ásia, China, Áustria e Bélgica). Um dos principais objetivos deste estudo foi entender o **nível relativo de impactos nos ecossistemas associados à produção de cada fonte de MMCF**.

Foram utilizados diferentes cenários para a produção de MMCF, que se encontram descritos na **Tabela 3**. Os cenários 5 e 10 foram excluídos deste estudo, uma vez que o primeiro é referente a celulose reciclada de matérias-primas de vestuário e o cenário 10 não tem informação suficiente relativamente aos impactos causados.

Tabela 3 – Diferentes cenários para a produção de MMCF (Schultz et al. 2017)

Nome do Cenário	Tipo de MMCF	Tipo e fonte da celulose solúvel	Localização da fábrica da fibra de dissolução	Localização da fábrica de fibra descontínua
1. Produção Alemã de Celulose Florestal Gerenciada Sueca	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose de madeira macia da Suécia	Suécia	Alemanha
2. Produção Asiática de Celulose da Floresta Boreal Canadense	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose de madeira macia do Canada	Canada	China
3. Produção Chinesa de Celulose da Floresta Tropical da Indonésia	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose mista de madeira tropical da Indonésia	Indonésia	China
4. Produção Chinesa de Celulose de Plantação da Indonésia	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose de eucalipto da Indonésia	Indonésia	China
6. Produção Chinesa de Celulose de Bambu Chinês	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose de bambu da China	China	China
7. Produção Chinesa de Celulose de Plantação de Algodão da Índia	Fibras descontínuas de Viscose	Linter de algodão proveniente da Índia e despolpado na China	China	China
8. Produção Chinesa de Celulose de Plantação Sul-Africana	Fibras descontínuas de Viscose	Celulose de eucalipto da África do Sul	África do Sul	China
9. Produção austríaca de plantações sul-africanas mistas e celulose florestal gerenciada austríaca	Fibras de Lyocell	Mistura de madeira de faia e celulose de eucalipto da Áustria	Áustria/África do Sul	Áustria

As informações mais relevantes do relatório de Schultz et al. (2017) estão presentes na **Tabela 4**.

Tabela 4 – Levantamento de informações relevantes do Relatório de Schultz et al. (2017), para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Celulose originária de diferentes fontes (ver Tabela 4)
Recolha de dados	Primários, banco de dados e literatura
Âmbito	Cradle-to-gate
Fronteira do sistema	<p>Todos os cenários exc/ o Cenário 5:</p> <p>The diagram illustrates the production process for MMCF (Modular Microfibrillar Cellulose Fiber) within a system boundary. It is divided into three main stages:</p> <ul style="list-style-type: none"> Stage 1: Pulpwood harvest or agricultural by-product* production <ul style="list-style-type: none"> Inputs: Land, Fuel (diesel, natural gas), Electricity, Fertilizers, Pesticides, Seeds, Water. Outputs: Air emissions, Water emissions, Waste (hazardous and non-hazardous). Stage 2: Dissolving Pulp Production** <ul style="list-style-type: none"> Inputs: Fuel (diesel, natural gas, black liquor, etc.), Electricity, Chemicals (sodium hydroxide, sulfuric acid, etc.), Water. Outputs: Air emissions, Water emissions, Waste (hazardous and non-hazardous). Stage 3: MMCF Production <ul style="list-style-type: none"> Inputs: Land, Fuel, Electricity, Chemicals (carbon disulfide, sulfuric acid, sodium hydroxide, NMMO***, etc.), Water. Outputs: Air emissions, Water emissions, Waste (hazardous and non-hazardous). <p>Transportation is indicated by icons: a truck for road transport, an airplane for air transport, and a ship for water transport. The final output is 'Transport to Market, Use and End-of-Life'. The entire process is labeled as 'Included in Scope'.</p> <p><small>*Applicable to Scenario 7 and Scenario 10 (short flax fibers). **Not applicable to Scenario 10. Scenario 5 produces pulp from recycled clothing input. ***Applicable only to Scenario 9</small></p>
Unidade Funcional	1 tonelada MMCF

Tabela 4 – Levantamento de informações relevantes do Relatório de Schultz et al. (2017), para o estudo comparativo (cont.).

<p>Pressupostos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pressupõe-se que todos as matérias-primas químicas necessários para a produção de celulose solúvel e MMCF sejam fabricados na mesma região em que as fábricas estão localizadas; - As fábricas de MMCF consideradas no Cenário 1 e Cenário 6 produzem fios de filamentos de viscose e não fibra de celulose artificial (fibra descontínua, MMCF); - Com base nos dados primários sobre o uso dos consumos energéticos das diferentes instalações produtivas também incluíam a energia consumida durante os processos de formação do fio. No entanto, o escopo deste estudo apenas inclui a fibra descontínua (MMCF). Assim, o uso de energia da instalação foi ajustado com base nos dados que foram usados para o cálculo do consumo médio de energia em relação a 1 tonelada de fibra cortada produzida, em todas as fábricas MMCF consideradas neste estudo. - O Cenário 2 explora um cenário hipotético. Este cenário é baseado na conversão iminente de muitas fábricas de papel e celulose que atualmente operam na região boreal em fábricas de celulose de grau solúvel. - Durante a extração, assumiu-se que a decomposição e/ou combustão de resíduos de extração acima do solo e carbono armazenado nas raízes das árvores ocorreram imediatamente, com todo o carbono assumido a ser convertido em emissões de CO₂ (isto é aplicável a todos os cenários, exceto 5, 7 e 10). Assume-se que o corte deixado no local é de 25% do volume da colheita. Presume-se que as raízes abaixo do solo tenham uma massa de carbono igual à do slash. - No caso do Cenário 6 e Cenário 7, assume-se que os resíduos deixados no campo têm uma contribuição insignificante para as emissões. - Não foi possível determinar se todos os processos unitários em todos os dez cenários estavam em regiões com escassez de água. - Foi assumido como distância padrão para todos os cenários, o transporte rodoviário de mercadorias de 200 milhas.
<p>Balancos mássicos e energéticos</p>	<p>Não são divulgadas as quantidades (retiradas da base de dados Ecoinvent)</p>
<p>Método LCIA e versão</p>	<p>CML – April 2013</p>
<p>Base de dados e versão</p>	<p>RISI Mill Asset; Ecoinvent V3.1</p>

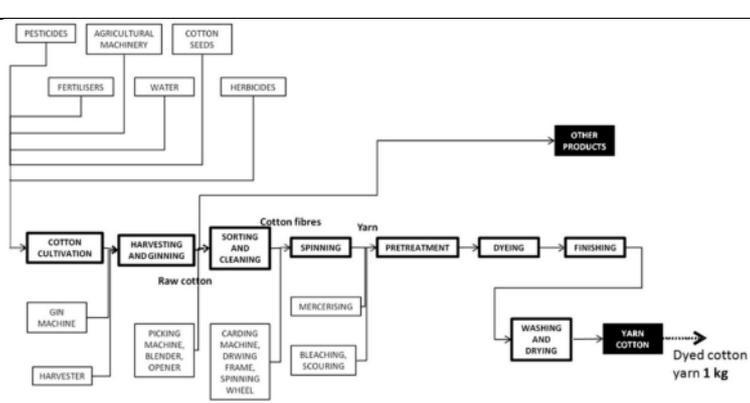
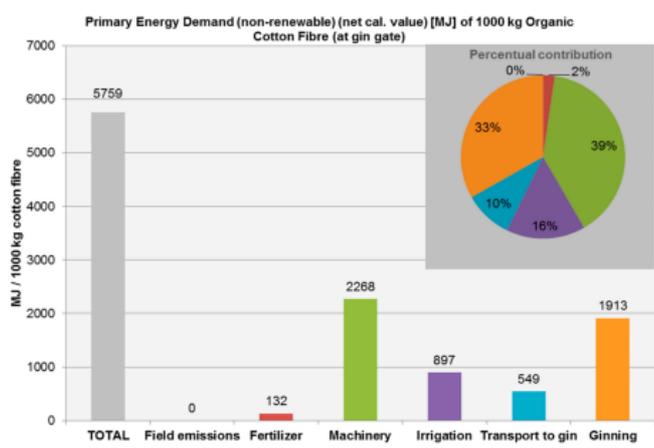
O relatório de Schultz et al. (2017) é um estudo bastante abrangente quanto à origem das matérias-primas e processos produtivos. O inventário do ciclo de vida (LCI) dos sistemas de produtos foi modelado com base em dados primários do processo de dissolução da celulose de três fábricas de fibras descontínuas e complementado a partir de bases de dados locais, como RISI e de empresas chinesas de pesquisa de mercado para outros cenários. A escassez de informação de certos processos unitários em determinadas unidades produtivas, a necessidade de estabelecer certos pressupostos e de recorrer a bases de dados, terão, por um lado, tido um forte contributo para a ampla variabilidade dos impactos calculados que vêm descritos no documento, por outro, introduzido também incerteza nos resultados obtidos. Tal dificulta a comparação dos resultados dos impactos entre as celuloses vegetais e a CB.

Para além disto, nesse relatório são incluídas 3 etapas: a produção da pasta de celulose, o processamento desta (dissolving pulp) e a produção da MMCF. No estudo da CB é apenas considerada a produção da CB. Assim, para ser possível fazer uma comparação dos resultados obtidos nos dois estudos seria necessário retirar os impactos da etapa de produção das MMCF do trabalho de Schultz et al. (2017) ou, alternativamente, acrescentar ao estudo da CB os impactos da produção de fibras artificiais pelos métodos Lyocell ou Viscose a partir da CB. Assim sendo, foi feita posteriormente uma análise de variação das fronteiras do sistema de produção de CB (**secção 4.3**) de modo a ser possível fazer uma comparação com a produção de MMCF.

4.1.2. Análise do artigo de La Rosa et al. (2019)

Neste estudo foi realizada uma LCA do **cultivo tradicional do algodão** e foi **comparada a outras fibras naturais** (nomeadamente, Juta e Kenaf) e **com o cultivo orgânico de algodão**. Este estudo surgiu com a crescente preocupação com os problemas ambientais significativos provocados pelo cultivo tradicional do algodão. A utilização de pesticidas (muitas vezes mal administrados), as grandes quantidades de água requeridas, a ocupação da terra e a sua salinização e o consumo de energia, são os principais problemas causados pelo cultivo tradicional de algodão. As informações mais relevantes deste estudo estão descritas na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Levantamento de informações relevantes do trabalho de La Rosa et al. (2019), utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Algodão, Kenaf e Juta
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Base de dados e literatura
Fronteiras do sistema (exemplo para o caso do algodão)	 <p>The diagram illustrates the cotton production process. It starts with 'COTTON CULTIVATION' which receives inputs from 'PESTICIDES', 'AGRICULTURAL MACHINERY', 'COTTON SEEDS', 'FERTILISERS', 'WATER', and 'HERBICIDES'. The process then moves to 'HARVESTING AND GINNING' (Raw cotton), which involves a 'GIN MACHINE' and 'HARVESTER'. This is followed by 'SORTING AND CLEANING' (Cotton fibres), which includes 'PICKING MACHINE, BLENDER, OPENER', 'CARDING MACHINE, DRAWING FRAME, SPINNING WHEEL', and 'BLEACHING, SCOURING'. The next step is 'SPINNING' (Yarn), which includes 'MERCERISING'. This leads to 'PRETREATMENT', 'DYEING', and 'FINISHING'. A branch from 'DYEING' leads to 'OTHER PRODUCTS'. The final step is 'WASHING AND DRYING' (YARN COTTON), which results in 'Dyed cotton yarn 1 kg'.</p>
Unidade Funcional	1 tonelada de têxteis de algodão, Kenaf e Juta
Pressupostos	- Supõem-se que os impactos da fibra de cânhamo são muito próximos dos das fibras de kenaf ou juta, uma vez que são plantas muito semelhantes
Balances mássicos e energéticos	<p>Não são indicados balanços mássicos.</p> <p>Balances energéticos:</p>  <p>The bar chart shows the Primary Energy Demand (non-renewable) in MJ for 1000 kg of Organic Cotton Fibre at the gin gate. The categories and their values are: TOTAL (5759), Field emissions (0), Fertilizer (132), Machinery (2268), Irrigation (897), Transport to gin (549), and Ginning (1913). The pie chart shows the Percentual contribution of each category: Field emissions (0%), Fertilizer (2%), Machinery (39%), Irrigation (16%), Transport to gin (10%), and Ginning (33%).</p>
Método LCIA e versão	CML, V3.02
Base de dados e versão	Ecoinvent 3 (software SimaPro V8.0.5.13)

Neste artigo existe uma tabela com dados relativos à produção de fibras de algodão, kenaf e juta, no entanto não é claro qual a metodologia utilizada para a análise nem a fonte dos dados. Existe também uma tabela que compara os impactos ambientais causados para a produção de

algodão orgânico e algodão tradicional, no entanto, mais uma vez não é indicada a metodologia utilizada. Para além destas dificuldades, ainda seria necessário acrescentar no estudo da CB a produção de MMCF para ser possível a comparação desta com o algodão. Posto isto, este artigo não foi utilizado no estudo comparativo.

4.1.3. Análise do artigo de Liu et al. (2020)

Este estudo concentrou-se em **avaliar e comparar os impactos ambientais na produção de fios a partir de fibras de algodão virgem e de fios de fibras de algodão reciclado**. Mais informações importantes estão descritas na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Informações importantes do Artigo de Liu et al. (2020) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Algodão
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Primária e Banco de dados
Fronteiras do sistema	<p>Algodão virgem:</p>
Unidade Funcional	1000 kg de fios de algodão
Pressupostos	<p>Foram excluídos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Trabalho humano, materiais de embalagem, manutenção de dispositivos e despesas gerais de administração; - Construção de máquinas; <p>Foi considerado que:</p> <ul style="list-style-type: none"> - A distância entre a origem do cultivo de algodão na província de Xinjiang e a fábrica na província de Zhejiang é de 4650 km por camião (esta distância foi considerada constante);

Tabela 6 - Informações importantes do Artigo de Liu et al. (2020) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

	Processes		Categories	Unit	Virgin cotton fiber	Recycled cotton fiber	
Balancos mássicos e energéticos	Cotton	-	Virgin cotton	kg	1210	0	
	Input	Planting	Cotton seeds	kg	4	0	
		Planting	Urea	kg	121	0	
		Planting	Compound fertilizer	kg	484	0	
		Planting	Pesticides	kg	12,1	0	
		Planting	Fuel oil	L	22,9	0	
		-	Recycled fabrics/yarns	kg	0	1450	
		Breaking	Electricity	kWh	0	157	
		Breaking	Industrial water	m ³	0	13,9	
		Breaking	Cleaning agents	kg	0	6	
		Breaking	H ₂ SO ₄ (98%)	kg	0	5,1	
		Breaking	FeSO ₄	kg	0	6	
		Breaking	PAC	kg	0	1,29	
		Breaking	PAM	kg	0	0,08	
		Breaking	NaClO (10%)	kg	0	10,5	
		Breaking	Urea	kg	0	0,04	
	Breaking	Scale inhibitor	kg	0	0,056		
	Breaking	NaHSO ₃	kg	0	0,056		
	Breaking	NaOH (98%)	kg	0	0,1		
	Breaking	HCl (35%)	kg	0	0,33		
	Mixing	Electricity	kWh	7	7		
	Spining	Industrial water	m ³	8,3	8,3		
	Spining	Electricity	kWh	3984	3984		
	Spining	Cartons	kg	77	77		
	Spining	PE plastic belt	kg	2,43	2,43		
	Output	Planting	NH ₃	kg	32,03	0	
		Planting	N ₂ O	kg	26,38	0	
		Planting	Heavy metal (total)	g	67,27	0	
		Breaking	Solidified sludge	kg	0	23,8	
		Breaking	COD	g	0	1675,9	
		Breaking	Ammonium	g	0	14,4	
		Breaking	Phosphorus	g	0	13,7	
		Breaking	Anilines	g	0	7,5	
		Breaking	Suspended substance	g	0	289,2	
		Breaking	BOD ₅	g	0	289,2	
		Breaking	Chlorine dioxide	g	0	1,04	
		Breaking	AOX	g	0	1,96	
		Breaking	Chromium(+VI)	g	0	0,11	
		Breaking	Nitrogen	g	0	63,6	
		Breaking	Sulfide	g	0	1,15	
		Breaking	Antimony	g	0	0,01	
		Product	Spining	Yarns	kg	1000	1000
			Spining	By-product	kg	210	210

* PAC poly aluminum chloride, PAM polyacrylamide, COD chemical oxygen demand, BOD₅ biochemical oxygen demand, AOX absorbable organic halogen

Método LCIA e versão	ReCiPe (H) Midpoint
Base de dados e versão	Banco de dados do software GaBi

Neste artigo os dados foram obtidos por recolha primária, ou seja, foram retirados no local em fábricas típicas desta produção. Foram também desconsiderados certos processos como a utilização de maquinaria agrícola e o embalamento, assim como o tipo de embalagens usadas, o que irá subestimar as categorias de impacto consideradas. No estudo de LCA da CB estes foram considerados, pelo que fica de fora da fronteira do sistema deste artigo. Para além disso, tratando-se de algodão seria ainda necessário acrescentar o processo de produção de MMCF na produção de CB. Assim sendo, este trabalho foi também desconsiderado. A alternativa seria remover alguns destes parâmetros no estudo da CB.

4.1.4. Análise do artigo de Stampino et al. (2021)

Neste estudo foram comparados diferentes métodos de preparação de nanofibras de celulose (NFC): (1) pré-tratamento enzimático seguido de homogeneização (ENZHO), (2) pré-tratamento oxidativo combinado com homogeneização (TOHO) ou (3) pré-tratamento oxidativo seguido de sonicação (TOSO). A análise foi realizada em fibras virgens de celulose e em materiais reciclados. O objetivo deste trabalho foi **estimar quais opções são mais sustentáveis, do ponto de vista ambiental**. Para isso foi realizado um estudo de LCA com o intuito de **comparar os desempenhos ambientais das diferentes vias de preparação**

desenvolvidas à escala laboratorial. Na **Tabela 7** estão retratadas as informações mais relevantes para o estudo comparativo.

Tabela 7 – Informações relevantes do Artigo de Stampino et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Hardwood Kraft Pulp, Industrial Waste Sludge, Cotton linters
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Primária e Banco de dados
Fronteiras do sistema	
Unidade Funcional	10 g de NFC em suspensão aquosa a 2%
Pressupostos	<p>Os limites do sistema abrangem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Todas as operações realizadas no laboratório, ou seja, produção de NFC a partir de fontes de celulose, incluindo usos de energia e água; - Síntese de todos os produtos químicos utilizados nos processos acima mencionados, ou seja, produtos auxiliares; - Produção de matéria-prima virgem; - Transporte de matéria-prima dos fornecedores até ao laboratório, considerando uma distância de referência de 200 km para todos os materiais; - Transporte de produtos químicos do fornecedor ao consumidor usando conjuntos de dados “market for” do banco de dados Ecoinvent 3.6. <p>Não são considerados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Os processos de tratamento de resíduos de produtos reciclados de matérias-primas.
Balanços mássicos e energéticos	Não são divulgadas as quantidades (retirados da Ecoinvent)
Método LCIA e versão	EF, V3.0
Base de dados e versão	Ecoinvent 3.6 (software SimaPro V9.1.1)

Este estudo parece ter condições de fronteira comparáveis às da produção de CB. Alguns dos dados foram retirados de atividades experimentais e o restante do banco de dados Ecoinvent. Assim, este artigo foi considerado no estudo comparativo deste trabalho.

4.1.5. Análise do artigo de Guo et al. (2021)

O objetivo deste estudo foi **analisar o impacto ambiental da indústria de fabricação de fibra de Viscose/fibra de Lyocell e obter informações de melhoria dos resultados da análise da China**. A LCA analisou o impacto ambiental da produção de fibras de Viscose e Lyocell desde as matérias-primas até ao final da produção (fibra). Concentrou-se no consumo de material, uso de energia e resíduos gerados durante a produção das duas fibras. Mais informações pertinentes estão indicadas na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Informações relevantes do Artigo de Guo et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Celulose (não é referida o tipo de celulose utilizada)
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Banco de dados
Fronteiras do sistema	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Lyocell:</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Viscose:</p> </div> </div>
Unidade Funcional	1 tonelada de filamentos
Pressupostos	<ul style="list-style-type: none"> - Não inclui o processo de transporte uma vez que esses dados não foram disponibilizados; - Foram apenas avaliados os processos do sistema que atendem ao ambiente superior a 0,1%; - Foi aplicada uma regra de corte (1%); - O peso das matérias-primas < 1% do produto final foi ignorado no inventário; - Da produção das duas fibras não resultam subprodutos;

Tabela 8 - Informações relevantes do Artigo de Guo et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.)

<p>Pressupostos</p>	<p>- Entre os produtos de saída, 98% dos produtos atendem às características especificadas. Os restantes 2% de produtos defeituosos são considerados resíduos (que podem ser reciclados dentro do processo).</p>																																																																																																																																																																													
<p>Balancos mássicos e energéticos</p>	<p>Lyocell:</p> <table border="1" data-bbox="512 439 879 994"> <thead> <tr> <th>Process</th> <th>Items</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3">Input</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Preparation for spinning fluid</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Continuous immersion and crushing</td> <td>Pulp</td> <td>1 t</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td>300 kg</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>10 t</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Ageing and yellowing</td> <td>NaOH</td> <td>150 kg</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>2.02 t</td> </tr> <tr> <td>CS2</td> <td>83 kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Dissolving</td> <td>Sulphonate</td> <td>9.7 m</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td>100 kg</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>8 t</td> </tr> <tr> <td>Electric power</td> <td>300 kwh</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Treatment before spinning</td> <td>Coal</td> <td>0.4721 t</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>10 t</td> </tr> <tr> <td>Ripening and defrosting</td> <td>Softened water</td> <td>10 t</td> </tr> <tr> <td>Third filtration</td> <td>Electric power</td> <td>140 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">The spinning process</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Acid station</td> <td>Softened water</td> <td>20 t</td> </tr> <tr> <td>H2SO4</td> <td>750 kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Spinning</td> <td>H2SO4</td> <td>25 kg</td> </tr> <tr> <td>ZnSO4</td> <td>55 kg</td> </tr> <tr> <td>Electric power</td> <td>100 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Fiber finishing</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Refining a filament tow</td> <td>NaOH</td> <td>50 kg</td> </tr> <tr> <td>H2SO4</td> <td>25 kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Oiling and drying</td> <td>Steam</td> <td>7.027 t</td> </tr> <tr> <td>Oil for spinning</td> <td>2.5 kg</td> </tr> <tr> <td>Electric power</td> <td>300 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Output</td> </tr> <tr> <td>Visioal fiber</td> <td></td> <td>≈ 1 t</td> </tr> <tr> <td>Wastewater</td> <td></td> <td>≈ 61 t</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Exhaust gas</td> <td>Steam</td> <td>≈ 0.5 t</td> </tr> <tr> <td>CS2</td> <td>4 kg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>H2S</td> <td>6 kg</td> </tr> <tr> <td>Fag-end</td> <td></td> <td>≈ 900 kg</td> </tr> </tbody> </table>			Process	Items	Value	Input			Preparation for spinning fluid			Continuous immersion and crushing	Pulp	1 t	NaOH	300 kg	Softened water	10 t	Ageing and yellowing	NaOH	150 kg	Softened water	2.02 t	CS2	83 kg	Dissolving	Sulphonate	9.7 m	NaOH	100 kg	Softened water	8 t	Electric power	300 kwh	Treatment before spinning	Coal	0.4721 t	Softened water	10 t	Ripening and defrosting	Softened water	10 t	Third filtration	Electric power	140 kwh	The spinning process			Acid station	Softened water	20 t	H2SO4	750 kg	Spinning	H2SO4	25 kg	ZnSO4	55 kg	Electric power	100 kwh	Fiber finishing			Refining a filament tow	NaOH	50 kg	H2SO4	25 kg	Oiling and drying	Steam	7.027 t	Oil for spinning	2.5 kg	Electric power	300 kwh	Output			Visioal fiber		≈ 1 t	Wastewater		≈ 61 t	Exhaust gas	Steam	≈ 0.5 t	CS2	4 kg		H2S	6 kg	Fag-end		≈ 900 kg	<p>Viscose:</p> <table border="1" data-bbox="979 439 1347 994"> <thead> <tr> <th>Process</th> <th>Items</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3">Input</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Preparation of spinning fluid</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Auxiliaries</td> <td>Auxiliaries</td> <td>10 kg</td> </tr> <tr> <td>Pulp</td> <td>1 t</td> </tr> <tr> <td>Continuous immersion and crushing</td> <td>Softened water 1.5 t</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Premixing and dissolving</td> <td>Softened water</td> <td>2.5 t</td> </tr> <tr> <td>NMMO</td> <td>40 kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Treatment before spinning</td> <td>Electric power</td> <td>750 kwh</td> </tr> <tr> <td>Cross-linking agent</td> <td>3 kg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Electric power</td> <td>100 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Solvent recovery</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Solvent recovered</td> <td>Oil for spinning</td> <td>0.8 kg</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>0.25 t</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Anion exchange purification</td> <td>NaOH</td> <td>200 kg</td> </tr> <tr> <td>HCL</td> <td>150 kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Evaporation of multiple effects</td> <td>Steam</td> <td>4 t</td> </tr> <tr> <td>Electric power</td> <td>50 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Fiber finishing</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Bunding, washing, and oiling</td> <td>Oil for spinning</td> <td>2.2 kg</td> </tr> <tr> <td>Softened water</td> <td>6 t</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Drying</td> <td>Steam</td> <td>6 t</td> </tr> <tr> <td>Electric power</td> <td>900 kwh</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Output</td> </tr> <tr> <td>Lyocell fiber</td> <td></td> <td>≈ 1 t</td> </tr> <tr> <td>Wastewater</td> <td></td> <td>≈ 20 t</td> </tr> <tr> <td>Exhaust gas</td> <td>Steam</td> <td>≈ 0.5 t</td> </tr> <tr> <td>Fag-end</td> <td></td> <td>≈ 300 kg</td> </tr> </tbody> </table>			Process	Items	Value	Input			Preparation of spinning fluid			Auxiliaries	Auxiliaries	10 kg	Pulp	1 t	Continuous immersion and crushing	Softened water 1.5 t	Premixing and dissolving	Softened water	2.5 t	NMMO	40 kg	Treatment before spinning	Electric power	750 kwh	Cross-linking agent	3 kg		Electric power	100 kwh	Solvent recovery			Solvent recovered	Oil for spinning	0.8 kg	Softened water	0.25 t	Anion exchange purification	NaOH	200 kg	HCL	150 kg	Evaporation of multiple effects	Steam	4 t	Electric power	50 kwh	Fiber finishing			Bunding, washing, and oiling	Oil for spinning	2.2 kg	Softened water	6 t	Drying	Steam	6 t	Electric power	900 kwh	Output			Lyocell fiber		≈ 1 t	Wastewater		≈ 20 t	Exhaust gas	Steam	≈ 0.5 t	Fag-end		≈ 300 kg
Process	Items	Value																																																																																																																																																																												
Input																																																																																																																																																																														
Preparation for spinning fluid																																																																																																																																																																														
Continuous immersion and crushing	Pulp	1 t																																																																																																																																																																												
	NaOH	300 kg																																																																																																																																																																												
	Softened water	10 t																																																																																																																																																																												
Ageing and yellowing	NaOH	150 kg																																																																																																																																																																												
	Softened water	2.02 t																																																																																																																																																																												
	CS2	83 kg																																																																																																																																																																												
Dissolving	Sulphonate	9.7 m																																																																																																																																																																												
	NaOH	100 kg																																																																																																																																																																												
	Softened water	8 t																																																																																																																																																																												
	Electric power	300 kwh																																																																																																																																																																												
Treatment before spinning	Coal	0.4721 t																																																																																																																																																																												
	Softened water	10 t																																																																																																																																																																												
Ripening and defrosting	Softened water	10 t																																																																																																																																																																												
Third filtration	Electric power	140 kwh																																																																																																																																																																												
The spinning process																																																																																																																																																																														
Acid station	Softened water	20 t																																																																																																																																																																												
	H2SO4	750 kg																																																																																																																																																																												
Spinning	H2SO4	25 kg																																																																																																																																																																												
	ZnSO4	55 kg																																																																																																																																																																												
	Electric power	100 kwh																																																																																																																																																																												
Fiber finishing																																																																																																																																																																														
Refining a filament tow	NaOH	50 kg																																																																																																																																																																												
	H2SO4	25 kg																																																																																																																																																																												
Oiling and drying	Steam	7.027 t																																																																																																																																																																												
	Oil for spinning	2.5 kg																																																																																																																																																																												
	Electric power	300 kwh																																																																																																																																																																												
Output																																																																																																																																																																														
Visioal fiber		≈ 1 t																																																																																																																																																																												
Wastewater		≈ 61 t																																																																																																																																																																												
Exhaust gas	Steam	≈ 0.5 t																																																																																																																																																																												
	CS2	4 kg																																																																																																																																																																												
	H2S	6 kg																																																																																																																																																																												
Fag-end		≈ 900 kg																																																																																																																																																																												
Process	Items	Value																																																																																																																																																																												
Input																																																																																																																																																																														
Preparation of spinning fluid																																																																																																																																																																														
Auxiliaries	Auxiliaries	10 kg																																																																																																																																																																												
	Pulp	1 t																																																																																																																																																																												
	Continuous immersion and crushing	Softened water 1.5 t																																																																																																																																																																												
Premixing and dissolving	Softened water	2.5 t																																																																																																																																																																												
	NMMO	40 kg																																																																																																																																																																												
Treatment before spinning	Electric power	750 kwh																																																																																																																																																																												
	Cross-linking agent	3 kg																																																																																																																																																																												
	Electric power	100 kwh																																																																																																																																																																												
Solvent recovery																																																																																																																																																																														
Solvent recovered	Oil for spinning	0.8 kg																																																																																																																																																																												
	Softened water	0.25 t																																																																																																																																																																												
Anion exchange purification	NaOH	200 kg																																																																																																																																																																												
	HCL	150 kg																																																																																																																																																																												
Evaporation of multiple effects	Steam	4 t																																																																																																																																																																												
	Electric power	50 kwh																																																																																																																																																																												
Fiber finishing																																																																																																																																																																														
Bunding, washing, and oiling	Oil for spinning	2.2 kg																																																																																																																																																																												
	Softened water	6 t																																																																																																																																																																												
Drying	Steam	6 t																																																																																																																																																																												
	Electric power	900 kwh																																																																																																																																																																												
Output																																																																																																																																																																														
Lyocell fiber		≈ 1 t																																																																																																																																																																												
Wastewater		≈ 20 t																																																																																																																																																																												
Exhaust gas	Steam	≈ 0.5 t																																																																																																																																																																												
Fag-end		≈ 300 kg																																																																																																																																																																												
<p>Método LCIA e versão</p>	<p>CLCD (esta metodologia não se encontra no GaBi)</p>																																																																																																																																																																													
<p>Base de dados e versão</p>	<p>eFootprint; Ecoinvent</p>																																																																																																																																																																													

A metodologia da ACV utilizada foi a **CLCD**, uma metodologia chinesa que não se encontra presente no software utilizado para este estudo (GaBi Professional). Assim, não foi feita a comparação e exclui-se este artigo do estudo comparativo.

4.1.6. Análise do artigo de Shen et al. (2010)

O objetivo deste estudo foi **avaliar o impacto ambiental das fibras de celulose artificiais**. A avaliação do ciclo de vida foi realizada para três tipos de fibras (Viscose, Modal e Tencel) produzidas pela Lenzing AG. Na **Tabela 9** estão indicadas mais informações importantes para o estudo comparativo.

Tabela 9 - Informações relevantes do Artigo de Shen et al. (2010) utilizado para o estudo comparativo.

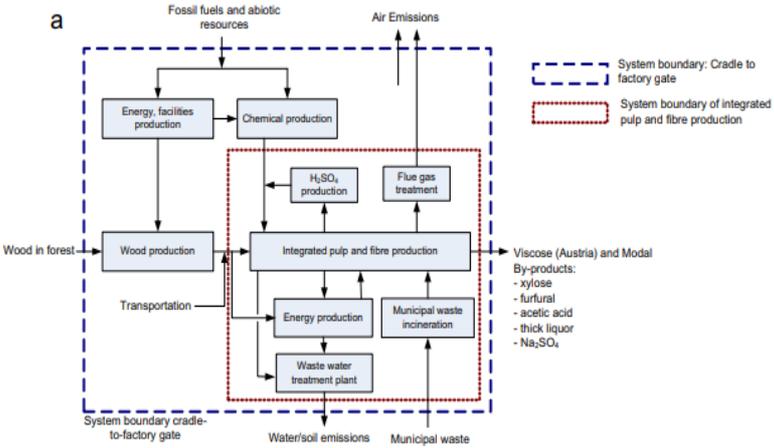
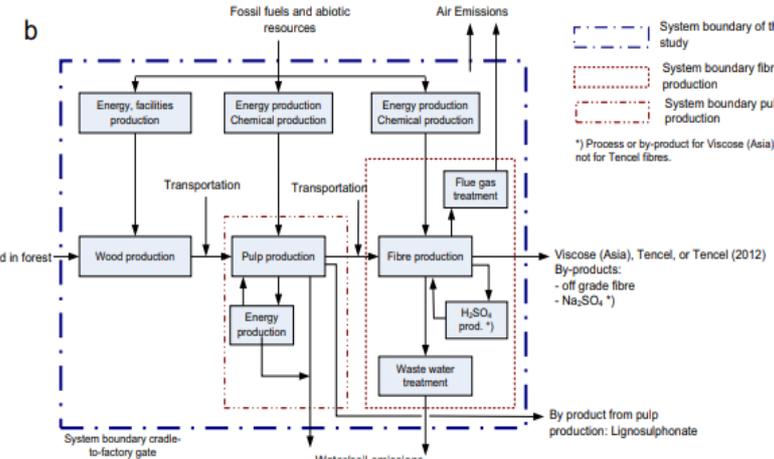
<p>Matéria-prima</p>	<p>Eucalipto e Faia</p>
<p>Âmbito</p>	<p>Cradle-to-gate</p>
<p>Recolha de dados</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dados específicos do local fornecidos pela Lenzing AG; - Literatura – trabalhos de Dinkel e Stettler – dados para o algodão; - Dados para produção de PET amorfo e de resina PP – PlasticsEurope; - Requisitos de energia do processo e fiação de fibras – dados de Brown et al. (1985); - Base de dados.
<p>Fronteiras do sistema</p>	<p>- As fronteiras dos sistemas incluem todas as etapas desde a extração de matérias-primas e combustíveis, seguidas de todas as etapas de conversão até a entrega do produto (fibra básica) na porta da fábrica.</p> <p>Viscose (Áustria) e Modal:</p>  <p>Viscose (Asia), Tencel e Tencel (2012):</p> 

Tabela 9 - Informações relevantes do Artigo de Shen et al. (2010) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

Unidade Funcional	1 tonelada de fibras descontínuas (staple fibre)
Pressupostos	- Nível tecnológico assumido representa meados dos anos 2000; - Dados fornecidos pela Lenzing AG são confidenciais pelo que não são relatados neste artigo;
Balancos mássicos e energéticos	Não tem quantidades
Método LCIA e versão	CML
Base de dados e versão	Ecoinvent (V1.3) – dados de eletricidade e eficiências;

Este artigo referiu-se à produção de fibras descontínuas, ou seja, incluiu a dissolução da celulose, fiação, corte e cardagem. Por este motivo (a fronteira do sistema não é comparável à da produção de CB) estes dados não puderam ser usados no estudo comparativo, a não ser que fosse mudada a fronteira do sistema para produção de CB.

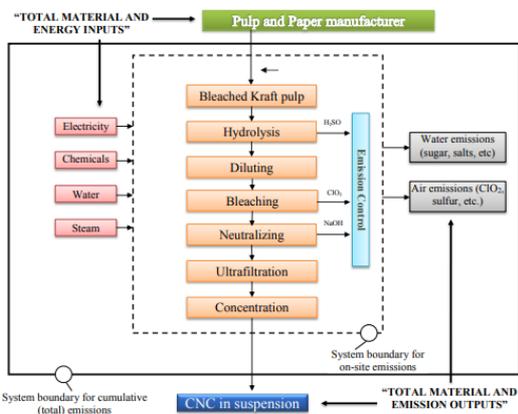
4.1.7. Análise do artigo de Gu et al. (2015)

Este estudo destinou-se a coletar os dados de inventário do ciclo de vida para nanocristais de celulose (NCC) produzidos a partir da planta piloto recém-desenvolvida da FPL e realizar uma avaliação preliminar do ciclo de vida para nanocelulose de biomassa lenhosa. Esta análise poderá ajudar a **entender os impactos ambientais do processo de fabricação do NCC e identificar os pontos críticos na cadeia produtiva de NCC**. O uso dos resultados de LCA desta linha piloto de produção NCC também poderá **orientar o projeto de produção de NCC em escala comercial para minimizar os impactos energéticos e ambientais**. Na **Tabela 10** encontram-se mais informações deste estudo de Gu et al. (2015).

Tabela 10 - Informações relevantes do Artigo de Gu et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Celulose kraft branqueada
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Banco de dados

Tabela 10 - Informações relevantes do Artigo de Gu et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

<p>Fronteiras do sistema</p>	<p>O limite do sistema inclui os recursos e manuseio de materiais a montante, transporte de produtos químicos e fabricação de CNC:</p> 																																																																																																																																																																									
<p>Unidade Funcional</p>	<p>1 kg de NCC</p>																																																																																																																																																																									
<p>Pressupostos</p>	<p>- Foi usada uma celulose kraft branqueada ao invés da celulose solúvel escolhida para este processo, uma vez que, no SimaPro nenhuma celulose de dissolução exata pode ser encontrada no banco de dados US LCI ou US Ecoinvent.</p>																																																																																																																																																																									
<p>Balancos mássicos e energéticos</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>Balancos mássicos:</p> <table border="1" data-bbox="446 1075 829 1803"> <thead> <tr> <th>Stage</th> <th>Output</th> <th>Amount</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">CNC Feedstock</td> <td>CNC shredded pulp (~10KMC)</td> <td>55.56</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>waste (pulp waste)</td> <td>0.05</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Input</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bleached kraft dissolving pulp</td> <td>55.61</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>feedstock transport</td> <td>1400</td> <td>km</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">CNC Hydrolysis reaction</td> <td>Output</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hydrolyzed CNC</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Sugar</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Input</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CNC shredded pulp</td> <td>55.56</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Sulfuric Acid</td> <td>296</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Steam</td> <td>21.8</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Electricity use in mixing</td> <td>3.357</td> <td>kWh</td> </tr> <tr> <td>Electricity use for pump</td> <td>11.19</td> <td>kWh</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">Dilution, Bleaching and Neutralization</td> <td>Output</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Neutralized CNC</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>ClO2</td> <td>0.2</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Input</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hydrolyzed CNC</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>RO water</td> <td>5735</td> <td>liter</td> </tr> <tr> <td>Sodium Hydroxide NaOH</td> <td>241.4</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Sodium Chlorite NaClO2</td> <td>1</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Clorox Sodium Hypochlorite</td> <td>0.111</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Electricity use in mixing</td> <td>6.994</td> <td>kWh</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">Ultrafiltration</td> <td>Output</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CNC product</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>waste water</td> <td>26552</td> <td>liter</td> </tr> <tr> <td>NaCl</td> <td>0.342</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Na2SO4</td> <td>427.8</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Input</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Neutralized CNC</td> <td>25</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>RO water</td> <td>21000</td> <td>liter</td> </tr> <tr> <td>Electricity use for RO water</td> <td>14.32</td> <td>kWh</td> </tr> <tr> <td>Electricity use for pump</td> <td>268.56</td> <td>kWh</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 48%;"> <p>Balancos energéticos:</p> <table border="1" data-bbox="989 1086 1436 1601"> <thead> <tr> <th>Produce 1 kg CNC</th> <th>MJ</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Total cumulate energy</td> <td>992.7</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>Feedstock - bleached pulp</td> <td>158.21</td> <td>15.94</td> </tr> <tr> <td>Total transportation</td> <td>6.47</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>Sulphuric acid</td> <td>26.22</td> <td>2.64</td> </tr> <tr> <td>RO water</td> <td>24.17</td> <td>2.44</td> </tr> <tr> <td>Sodium chloride</td> <td>0.093</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>Sodium hydroxide</td> <td>620.94</td> <td>62.55</td> </tr> <tr> <td>Sodium hypochlorite</td> <td>1.49</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>FPL process steam</td> <td>7.32</td> <td>0.74</td> </tr> <tr> <td>FPL process electricity</td> <td>147.68</td> <td>14.88</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="989 1400 1436 1601"> <thead> <tr> <th>Substance</th> <th>Unit</th> <th>Total</th> <th>(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Non-renewable fossil</td> <td>MJ</td> <td>826.56</td> <td>83.26%</td> </tr> <tr> <td>Non-renewable Nuclear</td> <td>MJ</td> <td>45.91</td> <td>4.63%</td> </tr> <tr> <td>Renewable, biomass</td> <td>MJ</td> <td>112.74</td> <td>11.36%</td> </tr> <tr> <td>Renewable (solar, wind and hydropower)</td> <td>MJ</td> <td>7.48</td> <td>0.75%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td></td> <td>992.7</td> <td>100%</td> </tr> </tbody> </table> </div> </div>	Stage	Output	Amount	Unit	CNC Feedstock	CNC shredded pulp (~10KMC)	55.56	kg	waste (pulp waste)	0.05	kg	Input				Bleached kraft dissolving pulp	55.61	kg		feedstock transport	1400	km	CNC Hydrolysis reaction	Output			Hydrolyzed CNC	25	kg	Sugar	25	kg	Input			CNC shredded pulp	55.56	kg	Sulfuric Acid	296	kg	Steam	21.8	kg	Electricity use in mixing	3.357	kWh	Electricity use for pump	11.19	kWh	Dilution, Bleaching and Neutralization	Output			Neutralized CNC	25	kg	ClO2	0.2	kg	Input			Hydrolyzed CNC	25	kg	RO water	5735	liter	Sodium Hydroxide NaOH	241.4	kg	Sodium Chlorite NaClO2	1	kg	Clorox Sodium Hypochlorite	0.111	kg	Electricity use in mixing	6.994	kWh	Ultrafiltration	Output			CNC product	25	kg	waste water	26552	liter	NaCl	0.342	kg	Na2SO4	427.8	kg	Input			Neutralized CNC	25	kg	RO water	21000	liter	Electricity use for RO water	14.32	kWh	Electricity use for pump	268.56	kWh	Produce 1 kg CNC	MJ	%	Total cumulate energy	992.7	100%	Feedstock - bleached pulp	158.21	15.94	Total transportation	6.47	0.65	Sulphuric acid	26.22	2.64	RO water	24.17	2.44	Sodium chloride	0.093	0.01	Sodium hydroxide	620.94	62.55	Sodium hypochlorite	1.49	0.15	FPL process steam	7.32	0.74	FPL process electricity	147.68	14.88	Substance	Unit	Total	(%)	Non-renewable fossil	MJ	826.56	83.26%	Non-renewable Nuclear	MJ	45.91	4.63%	Renewable, biomass	MJ	112.74	11.36%	Renewable (solar, wind and hydropower)	MJ	7.48	0.75%	Total		992.7	100%
Stage	Output	Amount	Unit																																																																																																																																																																							
CNC Feedstock	CNC shredded pulp (~10KMC)	55.56	kg																																																																																																																																																																							
	waste (pulp waste)	0.05	kg																																																																																																																																																																							
	Input																																																																																																																																																																									
	Bleached kraft dissolving pulp	55.61	kg																																																																																																																																																																							
	feedstock transport	1400	km																																																																																																																																																																							
CNC Hydrolysis reaction	Output																																																																																																																																																																									
	Hydrolyzed CNC	25	kg																																																																																																																																																																							
	Sugar	25	kg																																																																																																																																																																							
	Input																																																																																																																																																																									
	CNC shredded pulp	55.56	kg																																																																																																																																																																							
	Sulfuric Acid	296	kg																																																																																																																																																																							
	Steam	21.8	kg																																																																																																																																																																							
Electricity use in mixing	3.357	kWh																																																																																																																																																																								
Electricity use for pump	11.19	kWh																																																																																																																																																																								
Dilution, Bleaching and Neutralization	Output																																																																																																																																																																									
	Neutralized CNC	25	kg																																																																																																																																																																							
	ClO2	0.2	kg																																																																																																																																																																							
	Input																																																																																																																																																																									
	Hydrolyzed CNC	25	kg																																																																																																																																																																							
	RO water	5735	liter																																																																																																																																																																							
	Sodium Hydroxide NaOH	241.4	kg																																																																																																																																																																							
Sodium Chlorite NaClO2	1	kg																																																																																																																																																																								
Clorox Sodium Hypochlorite	0.111	kg																																																																																																																																																																								
Electricity use in mixing	6.994	kWh																																																																																																																																																																								
Ultrafiltration	Output																																																																																																																																																																									
	CNC product	25	kg																																																																																																																																																																							
	waste water	26552	liter																																																																																																																																																																							
	NaCl	0.342	kg																																																																																																																																																																							
	Na2SO4	427.8	kg																																																																																																																																																																							
	Input																																																																																																																																																																									
	Neutralized CNC	25	kg																																																																																																																																																																							
RO water	21000	liter																																																																																																																																																																								
Electricity use for RO water	14.32	kWh																																																																																																																																																																								
Electricity use for pump	268.56	kWh																																																																																																																																																																								
Produce 1 kg CNC	MJ	%																																																																																																																																																																								
Total cumulate energy	992.7	100%																																																																																																																																																																								
Feedstock - bleached pulp	158.21	15.94																																																																																																																																																																								
Total transportation	6.47	0.65																																																																																																																																																																								
Sulphuric acid	26.22	2.64																																																																																																																																																																								
RO water	24.17	2.44																																																																																																																																																																								
Sodium chloride	0.093	0.01																																																																																																																																																																								
Sodium hydroxide	620.94	62.55																																																																																																																																																																								
Sodium hypochlorite	1.49	0.15																																																																																																																																																																								
FPL process steam	7.32	0.74																																																																																																																																																																								
FPL process electricity	147.68	14.88																																																																																																																																																																								
Substance	Unit	Total	(%)																																																																																																																																																																							
Non-renewable fossil	MJ	826.56	83.26%																																																																																																																																																																							
Non-renewable Nuclear	MJ	45.91	4.63%																																																																																																																																																																							
Renewable, biomass	MJ	112.74	11.36%																																																																																																																																																																							
Renewable (solar, wind and hydropower)	MJ	7.48	0.75%																																																																																																																																																																							
Total		992.7	100%																																																																																																																																																																							
<p>Método LCIA e versão</p>	<p>TRACI 2.0</p>																																																																																																																																																																									
<p>Base de dados e versão</p>	<p>Ecoinvent (software SimaPro)</p>																																																																																																																																																																									

Uma vez que os dados foram retirados no banco de dados Ecoinvent (portanto, fidedignos) e que a fronteira do sistema é comparável com a da produção de CB, este trabalho foi considerado neste estudo comparativo.

4.1.8. Análise do artigo de Chen et al. (2021)

Os objetivos desta revisão foram: (1) explorar e documentar o estado atual da pesquisa de LCA com relação à carga ambiental dos têxteis de algodão, (2) identificar possibilidades para reduzir a carga ambiental dos têxteis de algodão e (3) identificar possíveis melhorias de LCA existentes usados na indústria têxtil de algodão. Mais informações deste estudo estão referidas na **Tabela 11**.

Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Algodão
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Literatura: Chapagain et al.; CmiA; Cotton Incorporated; Gunther et al.; Esteve-Turrillas et al.; Hedayati et al.; Paunonen et al.; Sandin et al.; Pfister et al.; Schmidt
Fronteiras do sistema	<p><i>Chapagain et al.:</i></p> <p>Legend</p> <p>Product fraction Value fraction</p>

Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

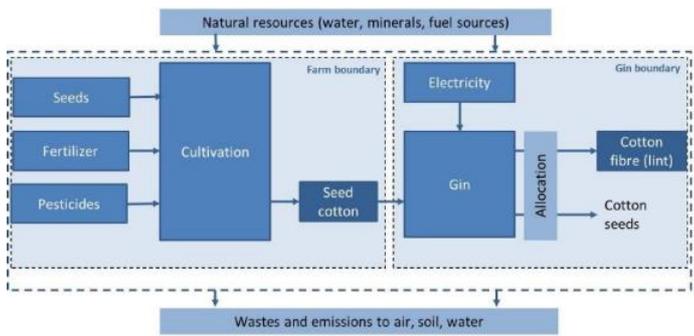
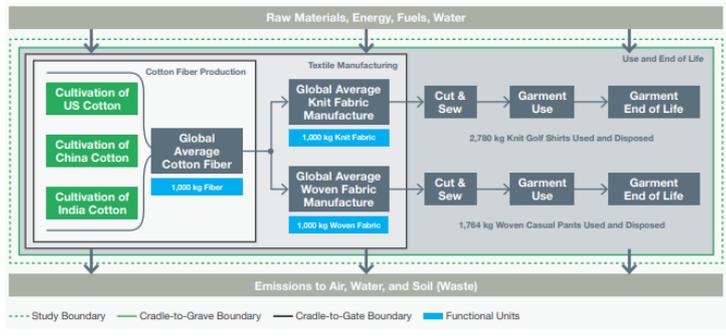
<p>Fronteiras do sistema</p>	<p>CmiA:</p>  <p>Cotton Incorporated:</p> 
<p>Unidade Funcional</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Chapagain et al.</i>: 1 ton de algodão; - <i>CmiA</i>: 1000 kg de algodão; - <i>Cotton Incorporated</i>: 1000 kg de fibra de algodão;
<p>Pressupostos</p>	<p>- CmiA:</p> <p>Estão incluídos: todos os fluxos materiais e energéticos necessários para as duas fases de produção (cultivo e beneficiamento) bem como todos os resíduos e emissões associados: produção de fertilizantes e pesticidas, bem como emissões de campo (por exemplo, N₂O), emissões relacionadas ao desmatamento (ou seja, a combustão de biomassa remanescente no campo do período de cultivo anterior) (por exemplo, CH₄, SO₂), eletricidade para descaroçamento e todos os transportes (fertilizante para o campo, caroço de algodão para descaroçamento).</p> <p>Excluem-se: os impactos ambientais associados aos animais de tração; o fim da vida útil dos resíduos, pois deixa o sistema livre de encargos e sem nenhum benefício para o produto principal; a construção de bens de capital e manutenção de equipamentos de apoio devido à sua contribuição mínima e à extrema dificuldade de os medir;</p>

Tabela 11 - Informações relevantes do Artigo de Chen et al. (2021) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

<p>Pressupostos</p>	<p>A soma dos fluxos de materiais excluídos não excede 5% de massa, energia ou relevância ambiental.</p> <p>- Cotton Incorporated:</p> <p>Incluído: crescimento, cultivo e descaroçamento de algodão; produção de material auxiliar (corantes, produtos químicos, etc.); energia e emissões para a produção de tecidos, incluindo despesas gerais da instalação; energia e materiais para criação de vestuário (cortar e costurar); transporte de intermediários e produtos acabados; transporte de tecido acabado para corte e costura; transporte do varejo para o cliente; fase de lavagem e secagem de tecidos (somente em residências - sem lavagem a seco considerada); fim da vida útil do tecido.</p> <p>Excluído: trabalho humano; construção de bens de capital; manutenção e operação de equipamentos de apoio; produção e transporte de materiais de embalagem.</p>																																	
<p>Balancos mássicos e energéticos</p>	<p>- Cotton Incorporated:</p> <table border="1" data-bbox="651 972 1332 1361"> <thead> <tr> <th>Operation</th> <th>Fuel use per Operation (L per ha)</th> <th>Reference</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shred Stalks</td> <td>7.0</td> <td>MSU (2004)</td> </tr> <tr> <td>Disking</td> <td>6.7</td> <td>West and Marland (2002)</td> </tr> <tr> <td>Reform Planting Beds</td> <td>3.7</td> <td>MSU (2004)</td> </tr> <tr> <td>Fertilizing – Spring</td> <td>9.8</td> <td>West and Marland (2002)</td> </tr> <tr> <td>Seeding/Planting</td> <td>4.9</td> <td>West and Marland (2002)</td> </tr> <tr> <td>Spraying (Tractor)</td> <td>1.2</td> <td>West and Marland (2002)</td> </tr> <tr> <td>Cultivation – Mechanical Weeding</td> <td>3.3</td> <td>West and Marland (2002)</td> </tr> <tr> <td>Side Dress N</td> <td>9.8</td> <td>MSU (2004)</td> </tr> <tr> <td>Harvest – Stripper Plus Boll-Buggy + Module Builder</td> <td>18.2</td> <td>Faukner et al. (2011)</td> </tr> <tr> <td>Harvest – Picker Plus Boll-Buggy + Module Builder</td> <td>27.5</td> <td>Willcutt and Barnes (2008)</td> </tr> </tbody> </table>	Operation	Fuel use per Operation (L per ha)	Reference	Shred Stalks	7.0	MSU (2004)	Disking	6.7	West and Marland (2002)	Reform Planting Beds	3.7	MSU (2004)	Fertilizing – Spring	9.8	West and Marland (2002)	Seeding/Planting	4.9	West and Marland (2002)	Spraying (Tractor)	1.2	West and Marland (2002)	Cultivation – Mechanical Weeding	3.3	West and Marland (2002)	Side Dress N	9.8	MSU (2004)	Harvest – Stripper Plus Boll-Buggy + Module Builder	18.2	Faukner et al. (2011)	Harvest – Picker Plus Boll-Buggy + Module Builder	27.5	Willcutt and Barnes (2008)
Operation	Fuel use per Operation (L per ha)	Reference																																
Shred Stalks	7.0	MSU (2004)																																
Disking	6.7	West and Marland (2002)																																
Reform Planting Beds	3.7	MSU (2004)																																
Fertilizing – Spring	9.8	West and Marland (2002)																																
Seeding/Planting	4.9	West and Marland (2002)																																
Spraying (Tractor)	1.2	West and Marland (2002)																																
Cultivation – Mechanical Weeding	3.3	West and Marland (2002)																																
Side Dress N	9.8	MSU (2004)																																
Harvest – Stripper Plus Boll-Buggy + Module Builder	18.2	Faukner et al. (2011)																																
Harvest – Picker Plus Boll-Buggy + Module Builder	27.5	Willcutt and Barnes (2008)																																
<p>Método LCIA e versão</p>	<p>- Chapagain et al.: footprint</p> <p>- CmiA: CML 2001 – Apr. 2013</p> <p>- Cotton Incorporated: CML (Nov. 2009)</p>																																	
<p>Base de dados e versão</p>	<p>- CmiA: Software GaBi v6.3</p> <p>- Cotton Incorporated: Software GaBi v4 e v5</p>																																	

Como dito anteriormente, para se comparar os impactos ambientais causados pela produção de CB e pela produção de algodão seriam necessários alguns ajustes na LCA da CB, de modo a ter-se condições de fronteira comparáveis. Assim sendo, este artigo foi também excluído deste estudo comparativo.

4.1.9. Análise do artigo de Piccinno et al. (2015)

O objetivo geral deste estudo foi **realizar a primeira LCA de um processo recém-desenvolvido para extração, funcionalização e orientação de nanofibras de celulose a partir de resíduos de alimentos vegetais**. Mais informações relevantes do artigo de Piccinno et al. (2015) estão descritas na **Tabela 12**.

Tabela 12 - Informações relevantes do Artigo de Piccinno et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Resíduos de vegetais
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	<p>Primária; alguns dados de consumo de energia foram estimados; base de dados:</p> <p>-Eletricidade:</p> <p>Europa: eletricidade, média tensão, produção UCTE, na rede; ecoinvent v2.2</p> <p>Brasil: eletricidade, baixa tensão, produção BR, na rede; ecoinvent v2.2</p> <p>EUA: eletricidade, mix de produção EUA; ecoinvent v2.2</p> <p>- Tratamento de resíduos: tratamento de águas residuais, classe 3, Suíça; ecoinvent v2.2.</p> <p>- Água: água da torneira, ao utilizador, Europa; ecoinvent v2.2.</p> <p>- Alginato de sódio: algas marinhas (não cultivadas) como matéria-prima, consideradas como insumo livre.</p> <p>- Produção de xiloglucano: semente de tamarindo (resíduos) como matéria-prima, considerada como insumo livre.</p> <p>- Produção de quitosana: casca de crustáceo (resíduos) como matéria-prima, considerada como insumo livre.</p> <p>- Resíduos perigosos: eliminação, mistura de solventes, para instalação de incineração de resíduos perigosos, Suíça; ecoinvent v2.2.</p> <p>- Produção de óxido de etileno: tem sido utilizado óxido de etileno em substituição ao poli(óxido de etileno) (PEO); ecoinvent v2.2.</p> <p>- Picolina borano: conjunto de dados global médio genérico para produtos químicos orgânicos usados; ecoinvent v2.2.</p> <p>- Produção de enzimas (etapa de todo o processo): resultados de LCI recebidos do parceiro do projeto.</p> <p>- água da torneira: a entrada de água foi aplicada com 30% para refletir 70% de reciclagem.</p>

Tabela 12 - Informações relevantes do Artigo de Piccinno et al. (2015) utilizado para o estudo comparativo (cont.)

<p>Fronteiras do sistema</p>																																																																																																																																																																																					
<p>Unidade Funcional</p>	<p>1 g de MFC</p>																																																																																																																																																																																				
<p>Pressupostos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Os valores deste artigo são resultantes de uma atividade experimental; esta experiência não foi realizada com várias execuções na escala estipulada, pelo que não foi possível obter vários valores experimentais; como resultado não foi obtida a incerteza envolvida no estudo. - Optaram por incluir uma análise de cenário para os estudos comparativos contabilizando diretamente a produção de cenoura; neste cenário considerou-se que as cenouras eram exclusivamente produzidas para a produção de nanocelulose. - Assume-se que todas as partes do processo ocorreram num só lugar. 																																																																																																																																																																																				
<p>Balancos mássicos e energéticos</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>liberated MFC</th> <th>yarn route 1b</th> <th>yarn route 1a</th> <th>yarn route 2</th> <th>GripX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="6">inputs</td> </tr> <tr> <td>carrot waste [g]</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>electricity [kWh]</td> <td>0.198</td> <td>0.008</td> <td>0.008</td> <td>2.859</td> <td></td> </tr> <tr> <td>tap water [kg]</td> <td>0.032</td> <td>0.037</td> <td>0.036</td> <td>0.012</td> <td></td> </tr> <tr> <td>enzymes [g]</td> <td>0.160</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MFC [g]</td> <td></td> <td>0.59</td> <td>0.53</td> <td>0.25</td> <td></td> </tr> <tr> <td>sodium alginate [g]</td> <td></td> <td>0.72</td> <td>0.65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>acetone</td> <td></td> <td>0.21</td> <td>0.19</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>GripX [g]</td> <td></td> <td></td> <td>0.13</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PEO [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1.4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>other chemicals [g]</td> <td></td> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.3</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">outputs</td> </tr> <tr> <td>MFC [g]</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>spun yarn [g]</td> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>wastewater [l]</td> <td>0.201</td> <td>0.054</td> <td>0.052</td> <td>0.004</td> <td></td> </tr> <tr> <td>acetone into air [g]</td> <td></td> <td>0.21</td> <td>0.19</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">inputs</td> </tr> <tr> <td>chitosan [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>electricity [kWh]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.138</td> </tr> <tr> <td>xyloglucan [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.015</td> </tr> <tr> <td>DMSO [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2.751</td> </tr> <tr> <td>acetic acid [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.027</td> </tr> <tr> <td>H₂O [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>EtOH [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3.945</td> </tr> <tr> <td>picoline borane [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.000285</td> </tr> <tr> <td>cooling water [m³]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.003</td> </tr> <tr> <td colspan="6">outputs</td> </tr> <tr> <td>GripX [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>hazardous waste [g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>6.973</td> </tr> </tbody> </table>		liberated MFC	yarn route 1b	yarn route 1a	yarn route 2	GripX	inputs						carrot waste [g]	100					electricity [kWh]	0.198	0.008	0.008	2.859		tap water [kg]	0.032	0.037	0.036	0.012		enzymes [g]	0.160					MFC [g]		0.59	0.53	0.25		sodium alginate [g]		0.72	0.65			acetone		0.21	0.19			GripX [g]			0.13			PEO [g]				1.4		other chemicals [g]		0.08	0.08	0.3		outputs						MFC [g]	1					spun yarn [g]		1	1	1		wastewater [l]	0.201	0.054	0.052	0.004		acetone into air [g]		0.21	0.19			inputs						chitosan [g]					1	electricity [kWh]					0.138	xyloglucan [g]					0.015	DMSO [g]					2.751	acetic acid [g]					0.027	H ₂ O [g]					0.25	EtOH [g]					3.945	picoline borane [g]					0.000285	cooling water [m ³]					0.003	outputs						GripX [g]					1	hazardous waste [g]					6.973
	liberated MFC	yarn route 1b	yarn route 1a	yarn route 2	GripX																																																																																																																																																																																
inputs																																																																																																																																																																																					
carrot waste [g]	100																																																																																																																																																																																				
electricity [kWh]	0.198	0.008	0.008	2.859																																																																																																																																																																																	
tap water [kg]	0.032	0.037	0.036	0.012																																																																																																																																																																																	
enzymes [g]	0.160																																																																																																																																																																																				
MFC [g]		0.59	0.53	0.25																																																																																																																																																																																	
sodium alginate [g]		0.72	0.65																																																																																																																																																																																		
acetone		0.21	0.19																																																																																																																																																																																		
GripX [g]			0.13																																																																																																																																																																																		
PEO [g]				1.4																																																																																																																																																																																	
other chemicals [g]		0.08	0.08	0.3																																																																																																																																																																																	
outputs																																																																																																																																																																																					
MFC [g]	1																																																																																																																																																																																				
spun yarn [g]		1	1	1																																																																																																																																																																																	
wastewater [l]	0.201	0.054	0.052	0.004																																																																																																																																																																																	
acetone into air [g]		0.21	0.19																																																																																																																																																																																		
inputs																																																																																																																																																																																					
chitosan [g]					1																																																																																																																																																																																
electricity [kWh]					0.138																																																																																																																																																																																
xyloglucan [g]					0.015																																																																																																																																																																																
DMSO [g]					2.751																																																																																																																																																																																
acetic acid [g]					0.027																																																																																																																																																																																
H ₂ O [g]					0.25																																																																																																																																																																																
EtOH [g]					3.945																																																																																																																																																																																
picoline borane [g]					0.000285																																																																																																																																																																																
cooling water [m ³]					0.003																																																																																																																																																																																
outputs																																																																																																																																																																																					
GripX [g]					1																																																																																																																																																																																
hazardous waste [g]					6.973																																																																																																																																																																																
<p>Método LCIA e versão</p>	<p>ReCiPe, Midpoint</p>																																																																																																																																																																																				
<p>Base de dados e versão</p>	<p>Ecoinvent v2.2</p>																																																																																																																																																																																				

Esse estudo teve como base trabalhos laboratoriais com condições muito específicas, por exemplo, a fonte de matéria-prima. Para além disso, retira-se pouca informação relativamente

aos impactos causados (apenas 2 fatores de impacto). Dado isto, este artigo foi excluído do estudo comparativo.

4.1.10. Análise do artigo de Figueirêdo et al. (2012)

Neste estudo foram avaliados aspetos ambientais particulares e impactos relacionados de dois sistemas de produtos de **nanowhiskers de celulose: nanonowhiskers extraídos de fibras de coco verdes** (sistema EUC) e de **fibras de algodão branco** (sistema EC). As informações mais relevantes deste artigo estão apresentadas na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Informações relevantes do Artigo de Figueirêdo et al. (2012) utilizado para o estudo comparativo.

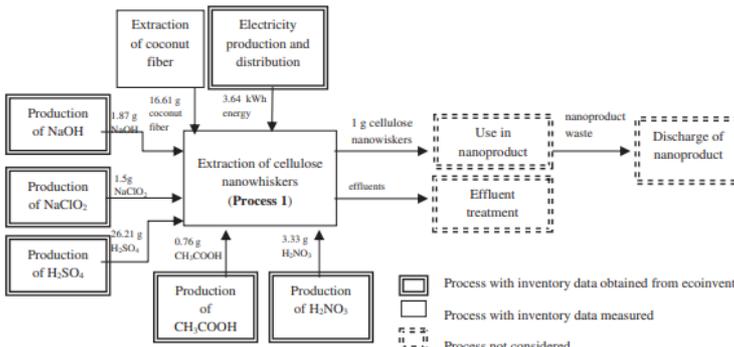
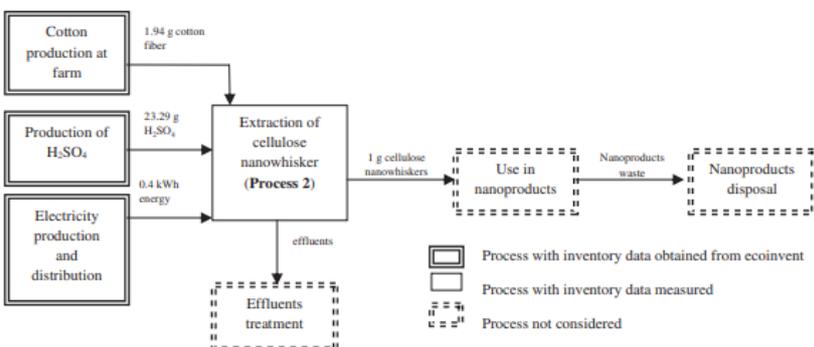
Matéria-prima	Algodão e côco
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Primária (dados da extração da fibra de coco verde e nanowhiskers de celulose) e base de dados (dados relacionados à produção e distribuição de eletricidade e produção de reagentes).
Fronteiras do sistema	<p>Sistema EUC:</p>  <p>Sistema EC:</p>  <p>Legend: Process with inventory data obtained from ecoinvent Process with inventory data measured Process not considered</p>

Tabela 13 - Informações relevantes do Artigo de Figueirêdo et al. (2012) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

Unidade Funcional	1 g nanowhiskers																																																																																																																																																																														
Pressupostos	<p>- Neste estudo não foi considerada a produção de côco verde uma vez que é considerado um resíduo sem valor de mercado.</p> <p>- O transporte da casca de côco para unidades de produção de fibra foi desconsiderado, pois muitas dessas unidades estão instaladas próximas a empresas que extraem água de côco.</p> <p>- O transporte de materiais (como produtos químicos e fibras) não foi incluído no EC e EUC porque os processos de extração das nanowhiskers de celulose ainda estão em fase laboratorial e as localizações das unidades de produção ainda não foram determinadas.</p> <p>- Este estudo não considerou outras substâncias que podem ser libertadas no ar ou na água, como as emissões de óxidos de nitrogénio e enxofre (no ar) e sulfatos e ácido sulfúrico (na água).</p>																																																																																																																																																																														
Balancos mássicos e energéticos	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Substances</th> <th>Compartments</th> <th>Unit</th> <th>EC</th> <th>EUC</th> <th>Occurrences of EC ≥ EUC in Monte Carlo uncertainty analysis, with 95% of confidence^a</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energy, gross calorific value, in biomass</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>136.03</td> <td>801.50</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>0.003</td> <td>0.007</td> <td>5%</td> </tr> <tr> <td>Energy, kinetic (in wind), converted</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>0.67</td> <td>6.01</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Energy, potential (in hydropower reservoir), converted</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>1663.52</td> <td>15,136.18</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Energy, solar, converted</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>0.01</td> <td>0.05</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>Raw material</td> <td>kJ</td> <td>1800.23</td> <td>15,943.75</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Water, cooling, unspecified natural origin/m³</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>0.94</td> <td>4.20</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, lake</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>0.001</td> <td>0.008</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, river</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>0.24</td> <td>2.05</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, salt, ocean</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>0.01</td> <td>0.08</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, salt</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>0.003</td> <td>0.02</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, turbine use, unspecified natural origin</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>3602.41</td> <td>32,672.16</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Water, unspecified natural origin/m³</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>139.85</td> <td>133.75</td> <td>54%</td> </tr> <tr> <td>Water, well, in ground</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>2.87</td> <td>0.11</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>Raw material</td> <td>L</td> <td>3746.32</td> <td>32,812.38</td> <td></td> </tr> <tr> <td>BOD₅, Biological Oxygen Demand</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.11</td> <td>3.12</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>COD, Chemical Oxygen Demand</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.37</td> <td>6.35</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Furfural</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>nd^b</td> <td>0.151</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>HMF</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>nd^b</td> <td>0.08</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Nitrate</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.06</td> <td>0.05</td> <td>11%</td> </tr> <tr> <td>Nitrogen</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.0004</td> <td>0.001</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Nitrogen, organic bound</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.0003</td> <td>0.002</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Nitrogen, total</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.0001</td> <td>0.009</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.001</td> <td>0.01</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Phenol</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.00004</td> <td>0.10</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Phosphorus</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.004</td> <td>0.0007</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>Phosphorus, total</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.00001</td> <td>0.004</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>Water</td> <td>g</td> <td>0.004</td> <td>0.005</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>^a Monte Carlo uncertainty analysis, with 100 cycles. ^b Not detected by the method. Source: Prepared by the authors.</p>	Substances	Compartments	Unit	EC	EUC	Occurrences of EC ≥ EUC in Monte Carlo uncertainty analysis, with 95% of confidence ^a	Energy, gross calorific value, in biomass	Raw material	kJ	136.03	801.50	0%	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Raw material	kJ	0.003	0.007	5%	Energy, kinetic (in wind), converted	Raw material	kJ	0.67	6.01	0%	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Raw material	kJ	1663.52	15,136.18	0%	Energy, solar, converted	Raw material	kJ	0.01	0.05	0%	Total	Raw material	kJ	1800.23	15,943.75		Water, cooling, unspecified natural origin/m ³	Raw material	L	0.94	4.20	0%	Water, lake	Raw material	L	0.001	0.008	0%	Water, river	Raw material	L	0.24	2.05	0%	Water, salt, ocean	Raw material	L	0.01	0.08	0%	Water, salt	Raw material	L	0.003	0.02	0%	Water, turbine use, unspecified natural origin	Raw material	L	3602.41	32,672.16	0%	Water, unspecified natural origin/m ³	Raw material	L	139.85	133.75	54%	Water, well, in ground	Raw material	L	2.87	0.11	100%	Total	Raw material	L	3746.32	32,812.38		BOD ₅ , Biological Oxygen Demand	Water	g	0.11	3.12	0%	COD, Chemical Oxygen Demand	Water	g	0.37	6.35	0%	Furfural	Water	g	nd ^b	0.151	0%	HMF	Water	g	nd ^b	0.08	0%	Nitrate	Water	g	0.06	0.05	11%	Nitrogen	Water	g	0.0004	0.001	0%	Nitrogen, organic bound	Water	g	0.0003	0.002	0%	Nitrogen, total	Water	g	0.0001	0.009	0%	Total	Water	g	0.001	0.01		Phenol	Water	g	0.00004	0.10	0%	Phosphorus	Water	g	0.004	0.0007	100%	Phosphorus, total	Water	g	0.00001	0.004	0%	Total	Water	g	0.004	0.005	
Substances	Compartments	Unit	EC	EUC	Occurrences of EC ≥ EUC in Monte Carlo uncertainty analysis, with 95% of confidence ^a																																																																																																																																																																										
Energy, gross calorific value, in biomass	Raw material	kJ	136.03	801.50	0%																																																																																																																																																																										
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Raw material	kJ	0.003	0.007	5%																																																																																																																																																																										
Energy, kinetic (in wind), converted	Raw material	kJ	0.67	6.01	0%																																																																																																																																																																										
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Raw material	kJ	1663.52	15,136.18	0%																																																																																																																																																																										
Energy, solar, converted	Raw material	kJ	0.01	0.05	0%																																																																																																																																																																										
Total	Raw material	kJ	1800.23	15,943.75																																																																																																																																																																											
Water, cooling, unspecified natural origin/m ³	Raw material	L	0.94	4.20	0%																																																																																																																																																																										
Water, lake	Raw material	L	0.001	0.008	0%																																																																																																																																																																										
Water, river	Raw material	L	0.24	2.05	0%																																																																																																																																																																										
Water, salt, ocean	Raw material	L	0.01	0.08	0%																																																																																																																																																																										
Water, salt	Raw material	L	0.003	0.02	0%																																																																																																																																																																										
Water, turbine use, unspecified natural origin	Raw material	L	3602.41	32,672.16	0%																																																																																																																																																																										
Water, unspecified natural origin/m ³	Raw material	L	139.85	133.75	54%																																																																																																																																																																										
Water, well, in ground	Raw material	L	2.87	0.11	100%																																																																																																																																																																										
Total	Raw material	L	3746.32	32,812.38																																																																																																																																																																											
BOD ₅ , Biological Oxygen Demand	Water	g	0.11	3.12	0%																																																																																																																																																																										
COD, Chemical Oxygen Demand	Water	g	0.37	6.35	0%																																																																																																																																																																										
Furfural	Water	g	nd ^b	0.151	0%																																																																																																																																																																										
HMF	Water	g	nd ^b	0.08	0%																																																																																																																																																																										
Nitrate	Water	g	0.06	0.05	11%																																																																																																																																																																										
Nitrogen	Water	g	0.0004	0.001	0%																																																																																																																																																																										
Nitrogen, organic bound	Water	g	0.0003	0.002	0%																																																																																																																																																																										
Nitrogen, total	Water	g	0.0001	0.009	0%																																																																																																																																																																										
Total	Water	g	0.001	0.01																																																																																																																																																																											
Phenol	Water	g	0.00004	0.10	0%																																																																																																																																																																										
Phosphorus	Water	g	0.004	0.0007	100%																																																																																																																																																																										
Phosphorus, total	Water	g	0.00001	0.004	0%																																																																																																																																																																										
Total	Water	g	0.004	0.005																																																																																																																																																																											
Método LCIA e versão	ReCiPe (H), Midpoint																																																																																																																																																																														
Base de dados e versão	Ecoinvent V2																																																																																																																																																																														

À semelhança do artigo anterior, este artigo tem condições de operação muito específicas, nomeadamente a fonte de matéria-prima. Para além disso os fatores de impactos poderão estar

subestimados tendo em conta os pressupostos apresentados na **Tabela 15**. Por estes motivos, não é relevante para o estudo comparativo que se está a desenvolver.

4.1.11. Análise do artigo de Nascimento et al. (2016)

O objetivo deste estudo foi **investigar os impactos ambientais de 4 métodos de extração de nanocristais de celulose de fibras de coco** estudados e **determinar o método mais ambientalmente sustentável usando a Avaliação do Ciclo de Vida**. Os quatro métodos estudados recuperaram a lenhina das fibras de coco e utilizaram as seguintes alternativas para hidrolisar a celulose: **(1)** ácido sulfúrico diluído (CNH1); **(2)** ácido sulfúrico concentrado (CNH2); **(3)** persulfato de amoníaco (CNO); e **(4)** ultrassom de alta potência (CNO). Na **Tabela 14** estão descritas as informações mais relevantes deste artigo.

Tabela 14 - Informações relevantes do Informações relevantes do Artigo de Nascimento et al. (2016) utilizado para o estudo comparativo.

Matéria-prima	Fibras de côco
Âmbito	Cradle-to-gate
Recolha de dados	Primária (dados referentes ao consumo de água, energia elétrica e reagentes, bem como a concentração de poluentes nos efluentes líquidos da extração de nanocristais de celulose), banco de dados (dados de inventário relacionados à produção de reagentes químicos e energia) e literatura (dados relacionados ao fracionamento da casca de coco verde foram obtidos <i>de Rosa et al. (2010)</i>).
Fronteiras do sistema	<pre> graph TD A[Extraction of coconut fiber] --> C[Extraction of cellulose nanocrystal] B[Electricity production and distribution] --> C D[Production of chemicals] --> C C --> E[Use] E --> F[Discharge] C --> G[Effluent treatment] style A fill:#ccc style B fill:#ccc style C fill:#333,color:#fff style D fill:#ccc style E fill:#fff style F fill:#fff style G fill:#fff </pre>
Unidade Funcional	1 g de NCC
Pressupostos	<p>- Dados relativos à produção de persulfato de amónia [(NH₄)₂S₂O₈] (APS) não foram encontrados na base de dados utilizada, sendo substituídos pelo inventário de sulfato de amónia (NH₄SO₄) da ecoinvent, que foi considerado um produto químico similar.</p> <p>- Uma vez que os dados do inventário de <i>Figueirêdo et al. (2012)</i> se basearam na avaliação utilizando uma versão anterior do ecoinvent (v.2) e Simapro (7.2), uma nova avaliação foi realizada utilizando a versão ecoinvent 3.0 e Simapro 8.0.3.</p>

Tabela 14 - Informações relevantes do Informações relevantes do Artigo de Nascimento et al. (2016) utilizado para o estudo comparativo (cont.).

Balancos mássicos e energéticos	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Cellulose nanocrystal extraction methods^a</th> </tr> <tr> <th>Outputs</th> <th>Unit</th> <th>CNH1</th> <th>CNH2</th> <th>CNO</th> <th>CNU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cellulose nanocrystal</td> <td>g</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>Lignin</td> <td>g</td> <td>1.3</td> <td>2.4</td> <td>2.2</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Mass allocation</td> </tr> <tr> <td>Cellulose nanocrystal</td> <td>%</td> <td>44</td> <td>29</td> <td>31</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>Lignin</td> <td>%</td> <td>56</td> <td>71</td> <td>69</td> <td>47</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Economic allocation</td> </tr> <tr> <td>Cellulose nanocrystal(11 \$/g)^b</td> <td>%</td> <td>86</td> <td>77</td> <td>78</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Lignin (1.4\$/g)^c</td> <td>%</td> <td>14</td> <td>23</td> <td>22</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Cellulose nanocrystal extraction methods ^a						Outputs	Unit	CNH1	CNH2	CNO	CNU	Cellulose nanocrystal	g	1.0	1.0	1.0	1.0	Lignin	g	1.3	2.4	2.2	0.9	Mass allocation						Cellulose nanocrystal	%	44	29	31	53	Lignin	%	56	71	69	47	Economic allocation						Cellulose nanocrystal(11 \$/g) ^b	%	86	77	78	90	Lignin (1.4\$/g) ^c	%	14	23	22	10																																																																																									
	Cellulose nanocrystal extraction methods ^a																																																																																																																																																					
Outputs	Unit	CNH1	CNH2	CNO	CNU																																																																																																																																																	
Cellulose nanocrystal	g	1.0	1.0	1.0	1.0																																																																																																																																																	
Lignin	g	1.3	2.4	2.2	0.9																																																																																																																																																	
Mass allocation																																																																																																																																																						
Cellulose nanocrystal	%	44	29	31	53																																																																																																																																																	
Lignin	%	56	71	69	47																																																																																																																																																	
Economic allocation																																																																																																																																																						
Cellulose nanocrystal(11 \$/g) ^b	%	86	77	78	90																																																																																																																																																	
Lignin (1.4\$/g) ^c	%	14	23	22	10																																																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Inputs</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Unit</th> <th>CNH1</th> <th>CNH2</th> <th>CNO</th> <th>CNU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fiber</td> <td>g</td> <td>13.70</td> <td>25.38</td> <td>23.40</td> <td>9.22</td> </tr> <tr> <td>Acetic acid</td> <td>g</td> <td>127.90</td> <td>236.68</td> <td>218.34</td> <td>86.23</td> </tr> <tr> <td>HCl</td> <td>g</td> <td>1.37</td> <td>2.54</td> <td>2.34</td> <td>0.92</td> </tr> <tr> <td>H₂SO₄</td> <td>g</td> <td>9.23</td> <td>56.87</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>HNO₃</td> <td>g</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>NaOH</td> <td>g</td> <td>7.72</td> <td>13.78</td> <td>-</td> <td>5.02</td> </tr> <tr> <td>H₂O₂</td> <td>g</td> <td>11.31</td> <td>20.99</td> <td>-</td> <td>7.65</td> </tr> <tr> <td>KOH</td> <td>g</td> <td>2.04</td> <td>3.79</td> <td>-</td> <td>1.38</td> </tr> <tr> <td>NaClO₂</td> <td>g</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>(NH₄)₂S₂O₈</td> <td>g</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>108.65</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Water</td> <td>l</td> <td>6.43</td> <td>8.80</td> <td>1.89</td> <td>1.67</td> </tr> <tr> <td>Energy</td> <td>MJ</td> <td>4.38</td> <td>5.15</td> <td>4.54</td> <td>2.48</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Emissions</td> </tr> <tr> <td>BOD</td> <td>g</td> <td>3.28</td> <td>3.88</td> <td>1.95</td> <td>1.74</td> </tr> <tr> <td>COD</td> <td>g</td> <td>3.63</td> <td>5.67</td> <td>2.82</td> <td>2.63</td> </tr> <tr> <td>Total nitrogen</td> <td>g</td> <td>1.156 × 10⁻²</td> <td>2.2 × 10⁻²</td> <td>5.13</td> <td>7.89 × 10⁻³</td> </tr> <tr> <td>Total phosphorus</td> <td>g</td> <td>1.366 × 10⁻³</td> <td>2.518 × 10⁻³</td> <td>8.026 × 10⁻⁴</td> <td>9.255 × 10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Phenol</td> <td>g</td> <td>5.508 × 10⁻⁴</td> <td>9.74 × 10⁻⁴</td> <td>3.841 × 10⁻⁵</td> <td>3.570 × 10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>Furfural</td> <td>g</td> <td>0.25</td> <td>0.31</td> <td>0.30</td> <td>0.21</td> </tr> <tr> <td>HMF</td> <td>g</td> <td>3.415 × 10⁻³</td> <td>4.177 × 10⁻³</td> <td>4.12 × 10⁻³</td> <td>2.781 × 10⁻³</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Products</td> </tr> <tr> <td>CN</td> <td>g</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Lignin</td> <td>g</td> <td>1.29</td> <td>2.40</td> <td>2.21</td> <td>0.87</td> </tr> </tbody> </table> <p>^a CNH1: extraction with diluted acid; CNH2: extraction with concentrated acid; CNO: extraction with ammonium persulfate; CNU: extraction with high power ultrasound.</p>	Inputs							Unit	CNH1	CNH2	CNO	CNU	Fiber	g	13.70	25.38	23.40	9.22	Acetic acid	g	127.90	236.68	218.34	86.23	HCl	g	1.37	2.54	2.34	0.92	H ₂ SO ₄	g	9.23	56.87	-	-	HNO ₃	g	-	-	-	-	NaOH	g	7.72	13.78	-	5.02	H ₂ O ₂	g	11.31	20.99	-	7.65	KOH	g	2.04	3.79	-	1.38	NaClO ₂	g	-	-	-	-	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	g	-	-	108.65	-	Water	l	6.43	8.80	1.89	1.67	Energy	MJ	4.38	5.15	4.54	2.48	Emissions						BOD	g	3.28	3.88	1.95	1.74	COD	g	3.63	5.67	2.82	2.63	Total nitrogen	g	1.156 × 10 ⁻²	2.2 × 10 ⁻²	5.13	7.89 × 10 ⁻³	Total phosphorus	g	1.366 × 10 ⁻³	2.518 × 10 ⁻³	8.026 × 10 ⁻⁴	9.255 × 10 ⁻⁴	Phenol	g	5.508 × 10 ⁻⁴	9.74 × 10 ⁻⁴	3.841 × 10 ⁻⁵	3.570 × 10 ⁻⁴	Furfural	g	0.25	0.31	0.30	0.21	HMF	g	3.415 × 10 ⁻³	4.177 × 10 ⁻³	4.12 × 10 ⁻³	2.781 × 10 ⁻³	Products						CN	g	1.00	1.00	1.00	1.00	Lignin	g	1.29	2.40	2.21	0.87
Inputs																																																																																																																																																						
	Unit	CNH1	CNH2	CNO	CNU																																																																																																																																																	
Fiber	g	13.70	25.38	23.40	9.22																																																																																																																																																	
Acetic acid	g	127.90	236.68	218.34	86.23																																																																																																																																																	
HCl	g	1.37	2.54	2.34	0.92																																																																																																																																																	
H ₂ SO ₄	g	9.23	56.87	-	-																																																																																																																																																	
HNO ₃	g	-	-	-	-																																																																																																																																																	
NaOH	g	7.72	13.78	-	5.02																																																																																																																																																	
H ₂ O ₂	g	11.31	20.99	-	7.65																																																																																																																																																	
KOH	g	2.04	3.79	-	1.38																																																																																																																																																	
NaClO ₂	g	-	-	-	-																																																																																																																																																	
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	g	-	-	108.65	-																																																																																																																																																	
Water	l	6.43	8.80	1.89	1.67																																																																																																																																																	
Energy	MJ	4.38	5.15	4.54	2.48																																																																																																																																																	
Emissions																																																																																																																																																						
BOD	g	3.28	3.88	1.95	1.74																																																																																																																																																	
COD	g	3.63	5.67	2.82	2.63																																																																																																																																																	
Total nitrogen	g	1.156 × 10 ⁻²	2.2 × 10 ⁻²	5.13	7.89 × 10 ⁻³																																																																																																																																																	
Total phosphorus	g	1.366 × 10 ⁻³	2.518 × 10 ⁻³	8.026 × 10 ⁻⁴	9.255 × 10 ⁻⁴																																																																																																																																																	
Phenol	g	5.508 × 10 ⁻⁴	9.74 × 10 ⁻⁴	3.841 × 10 ⁻⁵	3.570 × 10 ⁻⁴																																																																																																																																																	
Furfural	g	0.25	0.31	0.30	0.21																																																																																																																																																	
HMF	g	3.415 × 10 ⁻³	4.177 × 10 ⁻³	4.12 × 10 ⁻³	2.781 × 10 ⁻³																																																																																																																																																	
Products																																																																																																																																																						
CN	g	1.00	1.00	1.00	1.00																																																																																																																																																	
Lignin	g	1.29	2.40	2.21	0.87																																																																																																																																																	
Método LCIA e versão	ReCiPe (H), Midpoint																																																																																																																																																					
Base de dados e versão	Ecoinvent 3.1 (dados de inventário relacionados à produção de reagentes químicos e energia); Ecoinvent 3.0 (software SimaPro V8.0.3) (nova avaliação)																																																																																																																																																					

À semelhança dos dois artigos anteriores, este refere-se à produção de NCC a partir de uma matéria-prima específica (fibras de côco), pelo que não foi incluído no estudo.

4.2. Resultados obtidos do estudo comparativo

Os artigos selecionados em 4.1 para a realização do estudo comparativo foram os estudos de Schultz et al. (2017), Stampino et al. (2021) e Gu et al. (2015), sendo estes referentes à produção de MMCF, CNF e CNC, respetivamente.

Os dados referentes aos impactos calculados por Forte et al. (2021) estão indicados nas **Tabela 15**.

Tabela 15 - Resultados obtidos dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CB (Forte et al. 2021).

Categorias de impacto	Unidades	Total	Produção de matérias-primas	Transporte de matérias-primas	Preparação do meio de cultura	Propagação do inóculo	Cultura de fermentação estática	Purificação da CB	Tratamento da água poluída
Alterações climáticas, exc. Carbono biogénico	kg CO2 eq.	16.774	7.350E+00	3.200E-01	1.030E+00	8.330E-01	2.670E+00	2.940E+00	1.620E+00
Alterações climáticas, inc. Carbono biogénico	kg CO2 eq.	16.729	6.410E+00	3.200E-01	1.030E+00	8.310E-01	2.670E+00	2.940E+00	2.520E+00
Formação de matéria particulada fina	kg PM2.5 eq.	0.016	1.234E-02	3.580E-04	2.830E-04	3.250E-04	8.370E-04	9.130E-04	6.420E-04
Depleção fóssil	kg combustível eq.	6.565	3.785E+00	1.050E-01	3.610E-01	2.340E-01	8.880E-01	9.380E-01	2.560E-01
Consumo de água doce	m2	0.470	7.740E-01	2.800E-05	8.590E-01	1.170E-01	3.290E-02	1.180E+00	-2.500E+00
Ecotox. Água doce	kg 1,4-DB eq.	0.086	5.999E-02	9.450E-06	1.820E-04	5.360E-05	5.020E-05	3.000E-04	2.580E-02
Eutro. Água doce	kg P eq.	0.004	2.390E-03	5.290E-08	1.020E-05	2.870E-06	7.480E-06	1.670E-05	1.550E-03
Tox. Humana, cancerígena	kg 1,4-DB eq.	0.826	2.390E-03	9.260E-06	1.250E-03	6.600E-04	1.250E-03	2.730E-03	1.280E-01
Tox. Humana, não cancerígena	kg 1,4-DB eq.	13.765	7.648E+00	2.090E-03	4.640E-02	1.730E-02	1.700E-02	8.080E-02	5.950E+00
Radiação ionizante	Bq C-60 eq. para o ar	0.342	3.009E-01	6.460E-05	1.550E-03	2.540E-03	2.940E-03	6.610E-03	2.680E-02
Uso da terra	Colheitas anuais eq. * ano	0.967	6.260E-01	0.000E+00	1.370E-02	7.030E-02	8.420E-02	1.400E-01	3.320E-02
Ecot. marinha	kg 1,4-DB eq.	0.123	8.563E-02	2.680E-04	3.380E-04	1.670E-04	1.840E-04	6.290E-04	3.530E-02
Eutro. marinha	kg 1,4-DB eq.	0.004	1.020E-03	4.080E-07	2.230E-05	1.740E-05	1.920E-05	5.630E-05	2.950E-03

Tabela 15 - Resultados obtidos dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CB (Forte et al. 2021) (cont.).

Categorias de impacto	Unidades	Total	Produção de matérias-primas	Transporte de matérias-primas	Preparação do meio de cultura	Propagação do inóculo	Cultura de fermentação estática	Purificação da CB	Tratamento da água poluída
Depleção de metal	kg Cu eq.	0.113	6.388E-02	1.540E-05	2.400E-02	3.160E-03	1.230E-03	2.760E-02	-7.000E-03
Formação de ozono fotoquímico – ecossistemas	kg NO _x eq.	0.030	1.746E-02	2.440E-03	9.900E-04	1.100E-03	2.840E-03	3.280E-03	2.070E-03
Formação de ozono fotoquímico – saúde humana	kg NO _x eq.	0.029	1.628E-02	2.420E-03	9.700E-04	1.090E-03	2.800E-03	3.240E-03	2.050E-03
Depleção de ozono estratosférico	kg CFC-11 eq.	0.000	5.375E-06	7.530E-08	4.700E-07	2.930E-07	9.450E-07	1.200E-06	6.990E-06
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq.	0.043	3.229E-02	1.010E-03	8.150E-04	1.010E-03	2.650E-03	2.790E-03	2.000E-03
Ecotox. terrestre	kg 1,4-DB eq.	15.625	1.427E+01	3.170E-02	1.800E-01	1.530E-01	1.870E-01	3.660E-01	3.950E-01

Os resultados descritos na **Tabela 16**, referentes ao artigo de Schultz et al. (2017), utilizam a metodologia **CML – April 2013** e são referentes a uma unidade funcional de **1 ton de MMCF**.

Tabela 16 - Resultados da produção de 1 tonelada de MMCF calculados pelo método CML – April 2013 (Schultz et al. 2017).

Categorias de Impacto por Grupo	Unidades	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
Potencial de Acidificação	kg SO ₂ eq	36	44	65	65	64	64	48	20
Alterações climáticas – GWP100	ton CO ₂ eq	4.1	7.2	8.3	8.3	6.8	7.4	3.3	4.5
Depleção de recursos Abióticos – elementos, reservas finais	ton atômica	4.4E-05	9.8E-05	3.4E-05	3.4E-05	5.1E-05	3.6E-05	3.0E-05	1.1E-05
Depleção de recursos Abióticos – combustível fóssil	mil MJ	28	26	41	41	15	18	14	22
Eutrofização	ton PO ₄ eq * 1000	4.2	4.9	5.3	5.3	6.4	6.7	5.2	3.7
Ecotoxicidade de água doce	ton 1, 4-diclorobenzeno eq	2.4E-02	2.2E-02	3.4E-02	3.4E-02	2.0E-02	3.1E-02	2.5E-02	8.1E-02
Toxicidade Humana	ton 1, 4-diclorobenzeno eq	0.78	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.4	0.69
Ecotoxicidade Marinha	ton 1, 4-diclorobenzeno eq	1.6	2.4	2.5	2.5	2.9	3.0	3.4	2.7
Destrução da Camada do Ozono	ton CFC-11 eq	1.1E-07	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	9.6E-07	9.8E-07	7.8E-07	6.9E-07
Oxidação fotoquímica	ton etileno eq	1.8E-03	2.1E-03	2.9E-03	2.9E-03	2.5E-03	2.4E-03	2.0E-03	9.0E-04
Ecotoxicidade Terrestre	ton 1, 4-diclorobenzeno eq	2.0E-3	2.0E-3	2.5e-3	2.5e-3	1.5E-3	0.243	1.7E-3	1.3E-3

Como mencionado na secção 4.1 a fronteira do sistema de produção de MMCF por Schultz et al. (2017) é diferente da fronteira do sistema de produção de CB por Forte et al. (2021). Assim sendo, os resultados obtidos por Schultz et al. (2017) (representados na Tabela 16) não podem ser comparados com os resultados obtidos para a CB. Para esta comparação ser possível é necessário mudar a fronteira do sistema de produção de CB, introduzindo a etapa de produção de MMCF (ver secção 4.3).

Os resultados obtidos por Stampino et al. (2021) para a produção de nanofibras de celulose por 3 vias de preparação diferentes (ENZHO, TOHO e TOSO) foram comparados com os resultados obtidos por Forte et al. (2021) para a produção de CB. Esta comparação está representada na Tabela 17. Os valores obtidos nas diversas categorias de impacto, conforme apresentados no artigo, foram convertidas de acordo com a proporção das UF nos dois trabalhos (0.0002 g no artigo de Stampino et al. 2021 e de 1 kg no artigo de Forte et al. 2021).

Neste artigo foram comparados os impactos ambientais causados por materiais virgens e materiais reciclados. No entanto, a obtenção destas fibras recicladas estava fora das condições de fronteira consideradas para a produção de CB. Assim, estes dados foram excluídos do estudo.

Tabela 17 - Comparação dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CNF usando diferentes métodos de preparação com a produção de 1 kg de CB (Stampino et al. 2021).

Categorias de Impacto	Unidade	ENZHO	TOHO	TOSO	CB
		Materiais Virgens (celulose Kraft de madeira dura)	Materiais virgens (linters de algodão)	Materiais virgens (linters de algodão)	
Alterações Climáticas	kg CO ₂ eq	930	3160	4400	16.9
Destruição do ozono	kg CFC 11 eq	1.27E-4	4.105E-4	5.80E-4	5.08E-7
Radiação ionizante	KBq U-235 eq	115.5	364	510	0.936
Formação fotoquímica de ozono	kg NMVOC eq	2.26	7.8	10.7	4.28E-2

Tabela 17 - Comparação dos impactos ambientais causados pela produção de 1 kg de CNF usando diferentes métodos de preparação com a produção de 1 kg de CB (Stampino et al. 2021) (cont.).

Categorias de Impacto	Unidade	ENZHO	TOHO	TOSO	CB
		Materiais Virgens (celulose Kraft de madeira dura)	Materiais virgens (linters de algodão)	Materiais virgens (linters de algodão)	
Matéria particulada	doença inc.	2.565E-5	9.55E-5	1.28E-4	1.08E-6
Toxicidade humana, não cancerígena	CTUh	9.65E-6	3.41E-5	4.655E-5	8.78E-7
Toxicidade humana, cancerígena	CTUh	3.66E-7	1.99E-6	2.565E-6	4.8E-8
Acidificação	mol H ⁺ eq	5.1	20.65	28.1	6.42E-2
Eutrofização de água doce	kg P eq	0.271	1.05	1.435	3.98E-3
Eutrofização marinha	kg N eq	0.795	10.55	13.25	1.99E-2
Eutrofização terrestre	mol N eq	9.7	50	66.5	0.155
Ecotoxicidade de água doce	CTUe	22000	65000	90000	353
Uso da terra	PT	17600	39200	50000	115
Uso da água	m ³ privado	1945	10850	11650	20.5
Uso de recursos, fósseis	MJ	13500	44200	60000	279
Uso de recursos, minerais e metais	kg Sb eq	7.85E-3	2.68E-2	3.685E-2	5.3E-5

Apesar das condições de fronteira destes dois artigos (Stampino et al. 2021 e Forte et al. 2021) serem semelhantes, ainda existem alguns passos diferentes, pelo que foi feita uma análise da variação das fronteiras do sistema (ver secção 4.3) de modo a que a comparação fosse mais correta. No entanto, numa primeira análise, já é possível perceber que os impactos obtidos por Stampino et al. (2021) para nanofibras de celulose são significativamente superiores aos obtidos por Forte et al (2021) para CB. Esta diferença de duas ordens de grandeza deve-se ao facto da UF utilizada por Stampino et al. (2021) ser muito inferior à UF utilizada para a produção de CB, o que pode induzir a erros significativos.

Os resultados obtidos por **Gu et al. (2015)** para a produção de 1 kg nanocristais de celulose (CNC) foram comparados com os resultados obtidos para a produção de 1 kg CB na **Tabela 18**. O método utilizado para a LCA foi o TRACI V.2.0. A versão mais próxima no software GaBi Professional é o **TRACI V.2.1**.

Tabela 18 - Resultados da comparação dos impactos causados pela produção de 1 kg de CNC com a produção de 1 kg de CB (Gu et al. 2015).

Categoria de Impacto	Unidade/kg CNC	CNC	CB
Depleção de Ozono	kg CFC-11 eq	1,11E-6	5,53E-7
Aquecimento Global	kg CO ₂ eq	29,64	16
Smog	kg O ₃ eq	1,68	0,695
Acidificação	kg SO ₂ eq	0,54	0,0595
Eutrofização	kg N eq	0,05	0,0557
Cancerígenos	CTUh	8,25E-7	1,15E-6
Não Cancerígenos	CTUh	8,71E-6	1,14E-5
Efeitos Respiratórios	kg PM2.5 eq	0,03	8,28E-3
Ecotoxicidade	CTUe	96,81	56,4
Depleção de Combustíveis Fósseis	MJ excedente	72,11	30,4

Do mesmo modo do que o artigo de Stampino et al. (2021), este artigo tem uma fronteira de sistema semelhante ao de Forte et al. (2021), no entanto, não é igual, pelo que foi igualmente feita uma análise da variação das fronteiras do sistema (ver secção 4.3). Assim, é possível verificar por análise dos impactos obtidos por Gu et al. (2015) para a produção de CNC,

representados na **Tabela 18**, que estes são superiores aos obtidos por Forte et al. (2021) para a produção de CB, no entanto, são da mesma ordem de grandeza.

4.3. Análise da variação das fronteiras do sistema – exclusão e inclusão de processos

Os artigos de **Stampino et al. (2021)** e **Gu et al. (2015)** foram selecionados para o estudo comparativo. Ambos têm fronteiras de sistema semelhantes ao artigo de Forte et al. (2021). No entanto, aqueles artigos não incluem a etapa de **tratamento de águas residuais**, a etapa de **embalamento** nem os impactos associados à **construção de equipamentos**, portanto, os impactos calculados por esses autores foram subestimados relativamente aos impactos calculados por Forte et al. (2021). Assim, foram estimados, novamente, os impactos causados pela produção de CB, excluindo todas estas etapas. Os resultados encontram-se na **Tabela 19**. Foram utilizadas as metodologias EF (v.3.0) e TRACI (v.2.0) para calcular estes impactos, de modo a serem comparáveis com os resultados obtidos por Stampino et al. (2021) e Gu et al. (2015), respetivamente.

Tabela 19 - Resultados dos impactos ambientais da produção de 1 kg de CB excluindo as etapas de tratamento de águas residuais, embalagem e os impactos causados pela construção de equipamentos.

Categorias de impacto	Metodologias					
	EF V3.0 (exc. as etapas)				TRACI V2.0 (exc. as etapas)	
	CB	Stampino et al. (2021)			CB	Gu et al. (2015)
		ENZHO	TOHO	TOSO		
Alterações Climáticas (kg CO2 eq)	14.8	930	3160	4400	14.2	29.64
Destruição do Ozono (kg CFC-11)	5.02E-07	1.27E-04	4.105E-04	5.80E-04	5.56E-07	1.11E-06
Uso de água (m3)	126	1945	10850	11650	-	-
Ecotox. água doce (CTUe)	142	22000	65000	90000	60.9	96.81
Eutrofização (kg N eq)	1.42E-01	7.95E-01	10.55	13.25	2.94E-02	5E-02
Uso da Terra (PT)	105	17600	39200	50000	-	-
Toxicidade Humana, não canc. (CTUh)	1.37E-07	9.65E-06	3.41E-05	4.655E-05	5.4E-07	8.71E-06
Toxicidade Humana, canc. (CTUh)	4.03E-08	3.66E-07	1.99E-06	2.565E-06	7.38E-09	8.25E-07
Depleção fóssil (MJ)	262	13500	44200	60000	-	-

Analisando a **Tabela 19**, é possível concluir que os impactos obtidos para a produção de NFC e NCC, por Stampino et al. (2021) e Gu et al. (2015), respectivamente, são superiores aos obtidos para a produção de CB por Forte et al. (2021).

O relatório de **Schultz et al. (2017)** contém muita informação relevante para este estudo, no entanto, a fronteira do sistema inclui a produção de MMCF, o que não acontece no artigo de Forte et al. (2021). Assim, visto que no relatório de Schultz et al. (2017) estão indicadas as porcentagens que cada etapa do processo contribuí para cada um dos impactos estudados, é possível determinar os impactos associados exclusivamente à produção de MMCF. Dispondo desses valores, foi possível em seguida adicionar a etapa de produção de MMCF ao de produção de CB. Na **Tabela 20**, estão representadas, para cada impacto calculado, as porcentagens que a etapa de produção de MMCF contribuí, assim como o valor numérico correspondente aos impactos para os 2 cenários do estudo que foram considerados (Cenário 1 e Cenário 9, descritos na **Tabela 3**) para a produção de 1 kg de MMCF (foi feita a conversão de 1000 ton de MMCF para 1 kg de MMCF para que toda a informação dos artigos estarem na mesma UF).

Tabela 20 - Impactos causados pela produção de MMCF para cada cenário considerado para a produção de 1 kg de MMCF.

	Cenário 1			Cenário 9		
	% impacto da produção de MMCF	Valor total do impacto	Valor numérico do impacto da produção de MMCF	% impacto da produção de MMCF	Valor total do impacto	Valor numérico do impacto da produção de MMCF
Alterações climáticas (kg CO₂)	22%	5.2	1.144	9%	3.4	0.306
Acidificação (kg SO₂)	54%	3.3E-02	1.78E-02	45%	1.4E-02	6.30E-03
Esgotamento de recursos fósseis (MJ)	24%	22	5.28	24%	25	6

Os valores numéricos dos impactos da produção de MMCF apresentados na **Tabela 20** foram calculados de acordo com o **Anexo A**. Com estes valores é possível adicionar a etapa de produção de MMCF ao processo de produção de CB, admitindo que o tipo de celulose é igual

em ambos os processos. Assim, o limite de fronteira deste processo passa a incluir a produção de fibras através do processo de Viscose (Cenário A) e Lyocell (Cenário B). No software utilizado (GaBi Professional) para a metodologia e versão utilizada por Schultz et al. (2017) – CML April 2013 – apenas foi possível incluir as categorias de impactos **Alterações climáticas**, **Acidificação** (regional) e **Esgotamento de recursos de energia não renovável** (fósseis).

Foi admitido que a produção de MMCF foi feita numa fábrica dedicada apenas à produção destas fibras e que esta foi acoplada à fábrica já existente para produção de CB. Assim, esta não é embalada. Considerou-se também que o rendimento do processo de produção de MMCF a partir da CB é de 100 %. Os impactos causados pela construção de máquinas e equipamentos não foram incluídos nesta análise, uma vez que não está na fronteira do sistema no trabalho de Schultz et al. (2017).

Os impactos ambientais causados pela produção de CB através da metodologia CML April 2013 estão indicados na **Tabela 21**, assim como os resultados obtidos da adição dos novos processos de produção de CB (**Cenário A – Viscose** e **Cenário B – Lyocell**). Na **Tabela 21** estão ainda indicados os valores obtidos para os respetivos impactos ambientais para o processo feito por Schultz et al. (2017), de modo a ser feita a comparação.

Tabela 21– Comparação dos resultados obtidos para o novo processo de produção de CB, incluindo a etapa de produção de Viscose (Cenário A) e a etapa de produção de Lyocell (Cenário B) com os resultados obtidos, respetivamente, no Cenário 1 e no Cenário 9 por Schultz et al. (2017) para a produção de 1 kg de MMCF, pela metodologia CML April 2013.

	Cenário 1, Viscose (Schultz et al. 2017)	Cenário 9, Lyocell (Schultz et al. 2017)	CB	Cenário A – Viscose (novo)	Cenário B – Lyocell (novo)
Alterações climáticas (kg CO₂)	5.2	3.4	13.2	14.34	13.51
Acidificação (kg SO₂)	3.3E-02	1.4E-02	4.82E-02	6.60E-02	5.45E-02
Esgotamento de recursos (MJ)	22	25	247	252.28	253

Os cálculos dos impactos ambientais causados para os novos processos de produção de CB (Cenário A e Cenário B) estão indicados no **Anexo B**.

Analisando a **Tabela 21** é possível concluir que os impactos obtidos para a produção de MMCF por Schultz et al. (2017) são inferiores aos impactos obtidos para os novos processos de produção de CB, o que pode também dever-se ao facto da UF utilizada por Schultz et al. (2017)

ser 1000 vezes superior do que a UF utilizada por Forte et al. (2021) e, ao fazer a conversão, foram induzidos erros significativos.

4.4. Normalização dos dados

Na secção 4.3 obtiveram-se os resultados do estudo comparativo. Para fazer uma comparação mais adequada, procedeu-se a uma normalização dos dados. Para isso, considerou-se como referência os dados obtidos do estudo de ACV da CB (ou seja, definem-se como 1 as categorias de impacto ambiental). Os cálculos para a normalização estão exemplificados no **Anexo C**. Na **Tabela 22** estão apresentados os resultados da normalização dos dados.

Foram usadas as categorias de impacto que tinham correspondência entre as metodologias utilizadas (EF 3.0, TRACI 2.0 e CML April 2013): Alterações climáticas, Depleção fóssil, Ecotoxicidade, Eutrofização, Uso da terra, Destruição do ozono, Toxicidade humana (não cancerígena e cancerígena) e Acidificação.

Tabela 22 – Normalização dos dados obtidos por Stampino et al. (2021), Gu et al. (2015) e Schultz et al. (2017) tendo como referência os resultados obtidos por Forte et al. (2021), usando pressupostos comparáveis

Categorias de impacto	Forte et al. 2021	Stampino et al. 2021			Gu et al. 2015	Schultz et al. (2017)	
		ENZHO	TOHO	TOSO		Viscose	Lyocell
Alterações climáticas	1.00	62.84	213.51	297.30	2.25	3.63E-01	2.52E-01
Depleção fóssil	1.00	51.53	168.70	229.01	-	8.72E-02	9.88E-02
Ecotoxicidade	1.00	154.93	457.75	633.80	1.59	-	-
Eutrofização	1.00	68.31	352.11	468.31	121.43	-	-
Uso da terra	1.00	167.62	373.33	476.19	-	-	-
Destruição do ozono	1.00	252.99	817.73	1155.38	2.00	-	-
Toxicidade humana, não cancerígena	1.00	70.44	248.91	339.78	-	-	-
Toxicidade humana, cancerígena	1.00	9.08	49.38	63.65	-	-	-
Acidificação	1,00	85.57	346.48	471.48	-	5.00E-01	2.57E-01

4.5. Discussão

Analisando a **Tabela 22** (Secção 4.4), é possível verificar que os impactos calculados pela produção de NFC e NCC, dos trabalhos de Stampino et al. (2021) e Gu et al. (2015), respetivamente, são maiores do que os impactos calculados por Forte et al. (2021) para a produção de CB.

Os impactos calculados por Stampino et al. (2021) chegam a ser mais de 1000 vezes superiores em comparação com os da produção de CB, para a categoria de impacto de Destruição do ozono pelo método de preparação TOSO. Estes valores tão elevados, como dito anteriormente, podem dever-se ao facto das UF utilizadas serem muito diferentes (duas ordens de grandeza) o que leva a erros grosseiros na conversão dos resultados.

Os impactos calculados por Gu et al. (2015) para a produção de NCC são menores do que os resultados obtidos por Stampino et al. (2021). No entanto, continuam a ser superiores aos impactos calculados para a produção de CB. No caso da categoria de impacto de Eutrofização, os impactos são mais de 100 vezes maiores.

Constatou-se, também, que os novos processos de produção de fibras artificiais a partir de CB (Viscose e Lyocell) têm mais impactos do que os dos processos de produção de Viscose e Lyocell de Schultz et al. (2017). No caso da categoria de impacto de Depleção fóssil (ou Esgotamento de recursos fósseis/não renováveis) a diferença de valores pode ser explicada pela utilização de diferentes processos de geração de energia. O consumo de eletricidade para a produção do CB foi avaliado com base no mix médio da rede elétrica portuguesa (que inclui carvão, energia eólica, gás natural e energia hidroelétrica), enquanto que o conjunto de dados de eletricidade usada por Schultz et al. (2017) para produção de MMCF, foi modelado usando o mercado Ecoinvent 3.1 para eletricidade (média tensão-SE) na Suécia (inclui a geração de vapor através de caldeiras industriais e biogás a partir de matéria orgânica).

5. Conclusões

Após a análise da literatura diversa, apenas foi possível comparar 3 artigos: um referente à produção de nanofibras de celulose, outro para a produção de Nanocristais de celulose e, por fim, um relatório referente à produção de fibras de celulose artificiais. Foi necessário fazer alterações na fronteira do sistema de produção de CB, para ser possível efetuar uma análise comparativa dos impactos ambientais de cada tipo de processo.

Para a comparação com os artigos de Stampino et al. (2021) e Gu et al. (2015), foram retiradas as etapas de tratamento de águas residuais, de embalagem e os impactos associados à construção de equipamentos. Concluiu-se, após a normalização dos dados, que os impactos causados pela produção de CB são inferiores, isto é, o processo de produção de CB apresenta melhor desempenho a nível de sustentabilidade quando comparado com os processos de produção de nanofibras de celulose e nanocristais de celulose.

Para assemelhar as fronteiras de sistema do relatório de Schultz et al. (2017) e da produção de CB, foi necessário adicionar as etapas de produção de Viscose e Lyocell ao processo de CB, assim como retirar as etapas referidas no parágrafo anterior. Assim, concluiu-se que os impactos causados pelos novos processos de CB (Cenário A – Viscose e Cenário B – Lyocell) são maiores, isto é, neste caso, os novos processos de produção de CB não apresentam um melhor resultado a nível da sustentabilidade em comparação com os resultados obtidos por Schultz et al. (2017).

Futuramente será necessário modificar a fronteira do sistema de produção de CB para ser possível fazer um estudo comparativo mais alargado, nomeadamente com fibras de algodão, um material muito utilizado na indústria têxtil e responsável pelo esgotamento de água e ocupação de grandes extensões de terra. Sugere-se também que a fonte de energia utilizada no processo de produção de CB seja modificada, uma vez que pode estar na origem de impactos associados às alterações climáticas e esgotamento de recursos fósseis.

Referências

Chen F., Ji X., Chu J., Xu P., Wang L. (2021). A review: life cycle assessment of cotton textiles. Special issue on Circular economy, p. 72:19-29. DOI: 10.35530/IT.072.01.1797.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD). Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. Eur 24378 En -2010. European Commission. 1st ed. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/94987>.

Fernandes M., Gama M., Dourado F., Souto A.P. (2019). Development of novel bacterial cellulose composites for the textile and shoe industry. *Sfam (society for applied microbiology), Microbial biotechnology*, p. 12:650-661. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13387>.

Figueirêdo M. C. B., Rosa M. F., Ugaya C. M. L., Filho M. S. M. S., Braid A. C. C. S., Melo L. F. L. (2012). Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers. *Journal of Cleaner Production*, p. 35:130-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.033>.

Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D., Suh S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, p.91:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>.

Foroughi F., Ghomi E. R., Dehaghi F. M., Borayek R., Ramakrishna S. (2021). A Review on the Life Cycle Assessment of Cellulose: From Properties to the Potential of Making It a Low Carbon Material. *Materials*, 14, 714. <https://doi.org/10.3390/ma14040714>.

Forte A., Dourado F., Mota A., Neto B., Gama M., Ferreira E.C. (2021). Life cycle assessment of bacterial cellulose production. *The International Journal of Life Cycle Assessment, LCA for Agriculture Practices and Biobased Industrial Products*, p. 26:864–878. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01904-2>.

Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., Schryver A.D., Struijs J., Zelm R.v. (2009). “ReCiPe 2008 - A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. 1st ed. Report I: Characterisation”. https://www.researchgate.net/publication/230770853_Recipe_2008.

Guo S., Li X., Zhao R., Gong Y. (2021). Comparison of life cycle assessment between fiber and viscose fiber in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, p. 26:1545–1555. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01916-y>.

Gu H., Reiner R., Gergman R., Rudie A. (2015). LCA study for pilot scale production of cellulose nano crystals (CNC) from wood pulp. *Proceedings from the LCA XV Conference – A bright green future*, p.33-42. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/50827>.

Hauschild M.Z., Huijbregts M.A.J. (2015) Introducing Life Cycle Impact Assessment. *Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*, p.1-16. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3_1.

Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M., Zijp M., Hollander A., van Zelm R. (2017). “ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level.” *International Journal of Life Cycle Assessment*, p. 22:138–47. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

Jacek P., Dourado F., Gama M., Bielecki S. (2019). Molecular aspects of bacterial nanocellulose biosynthesis. *Microbial Biotechnology*, 12 (4), p. 633-649. doi:10.1111/1751-7915.13386.

La Rosa A. D., Grammatikos S. A. (2019). Comparative Life Cycle Assessment of Cotton and Other Natural Fibers for Textile Applications. *Fibers*, 7 (12), 101. doi:10.3390/fib7120101.

Liu Y., Huang H., Zhu L., Zhang C., Ren F., Liu Z. (2020). Could the recycled yarns substitute for the virgin cotton yarns: a comparative LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, p. 25:2050–2062. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01815-8>.

Nascimento D. M., Dias A. F., Junior C. P. A., Rosa M. F., Morais J. P. S., Figuerirêdo M. C. B. (2016). A comprehensive approach for obtaining cellulose nanocrystal from coconut fiber. Part II: Environmental assessment of technological pathways. *Industrial Crops and Products*, p. 93:58–65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.063>.

Naomi R., Idrus R. B. H., Fauzi M. B. (2020). Plant- vs Bacterial-Derived Cellulose for Wound Healing: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, p.17,6803. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186803>.

OGM | AGRICULTORES DO ZIMBÁBUE QUEREM PRODUZIR ALGODÃO GENETICAMENTE MODIFICADO. Obtido de CiB (Centro de informação de biotecnologia): <https://cibpt.org/2021/09/17/ogm-agricultores-do-zimbabue-querem-produzir-algodao-geneticamente-modificado/> (accessed on 21/10/2022).

Piccinno F., Hischier R., Seeger S., Som C. (2015). Life Cycle Assessment of a New Technology to Extract, Functionalize and Orient Cellulose Nanofibers from Food Waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, p.3:1047–1055. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00209.

Piccinno F., Hischier R., Seeger S., Som C. (2018). Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: Application of the life cycle assessment scale-up framework. *Journal of Cleaner Production*, p. 174:283-295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.226>.

Schultz T., Suresh A. (2017). Life Cycle Assessment Comparing Ten Sources of Manmade Cellulose Fiber. SCS Global Services Final Report, p. 1:158. https://cdn.scsglobalservices.com/files/program_documents/SCS-Stella-LCA-MainReport-101017.pdf (accessed on 16/03/2022).

Shen L., Worrell E., Patel M. K. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, p. 55:260–274. doi:10.1016/j.resconrec.2010.10.001.

Sphera – GaBi solutions (2022). Professional Database. Publications on Sphera website. <https://gabi.sphera.com/databases/professional>.

Stampino P. G., Riva L., Punta C., Elegir G., Bussini D., Dotelli G. (2021). Comparative Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibers Production Routes from Virgin and Recycled Raw Materials. *Molecules*, p. 26:2558. <https://doi.org/10.3390/molecules26092558>.

Velden N.M.v.d., Patel M.K., Vogtländer J.G. (2014). LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. *Int J Life Cycle Assess, Life Cycle Impact Assessment*, p. 19:331–356. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9>.

Anexos

Anexo A

Para calcular os valores numéricos correspondentes às percentagens relativas à produção de MMCF para cada categoria de impacto e para cada cenário, procedeu-se de acordo com a **Equação 1**. No cenário 1, o impacto total das alterações climáticas foi de 5.2 kg de CO₂ para a produção de 1 kg de MMCF. A percentagem deste impacto associada apenas à etapa de produção de MMCF é 22%. Assim, o valor, em kg de CO₂, obtido nesta etapa é:

$$x = 0.22 \times 5.2 = 1.144 \text{ kg de } CO_2$$

Equação 1 – Exemplo de cálculo do valor numérico associado à percentagem dos impactos estudados referente à etapa de produção de MMCF.

Anexo B

Para calcular os impactos ambientais causados para os novos processos de produção de CB (Cenário A e Cenário B) foi necessário somar os valores absolutos obtidos das percentagens associadas ao impacto da produção de MMCF aos valores obtidos apenas da produção de CB. Assim, a título de exemplo, para o **Cenário A** para a categoria de impacto **Alterações Climáticas**, o valor do impacto causado é dado pela **Equação 2**.

$$x = (13.2 + 1.144) \text{ kg } CO_2 = 14.34 \text{ kg } CO_2$$

Equação 2 – Exemplo de cálculo do valor do impacto nas alterações climáticas para a produção do novo processo de CB (Cenário A).

Anexo C

Para a normalização dos dados obtidos dos três artigos utilizados para este estudo comparativo, foi necessário fazer os cálculos exemplificados na **Equação 3**, para todos os resultados dos impactos ambientais causados. Considerou-se os resultados das categorias de impacto ambiental da produção de CB como **1**. Por exemplo, para a categoria de impacto “Alterações climáticas”, o valor obtido para a produção de CB, utilizando a metodologia EF V3.0, foi de 14.8 kg CO₂ e o valor obtido para a mesma categoria mas para a produção de nanofibras de celulose pelo método ENZHO foi de 930 kg CO₂. Através da **Equação 3** obteve-se o resultado da normalização para este parâmetro.

$$x = \frac{930 \times 1}{14.8} = 62.84$$

Equação 3 – Exemplo do cálculo para normalização dos dados.