

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ELIANA MARIA ANDRIANI GUERREIRO

**ANÁLISE MULTINÍVEIS DE CIRCULARIDADE DO SISTEMA DE
MANUFATURA DE UM PRODUTO INDUSTRIAL COM E SEM
BIODIGESTOR**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2022

ELIANA MARIA ANDRIANI GUERREIRO

**ANÁLISE MULTINÍVEIS DE CIRCULARIDADE DO SISTEMA DE
MANUFATURA DE UM PRODUTO INDUSTRIAL COM E SEM
BIODIGESTOR**

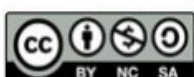
**Multilevel Analysis of Circularity of an Industrial Product
Manufacturing System with and without Biodigester**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção do Programa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa



ELIANA MARIA ANDRIANI GUERREIRO

ANÁLISE MULTINÍVEIS DE CIRCULARIDADE DO SISTEMA DE MANUFATURA DE UM PRODUTO INDUSTRIAL COM E SEM BIODIGESTOR.

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 28 de Setembro de 2022

Dr. Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)
Dr. Antonio Carlos De Francisco, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dr. Daniel Poletto Tesser, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dr. Fabio Neves Puglieri, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dr. Murillo Vetroni Barros, Doutorado - Universidade Estadual do Paraná (Unespar)
Dr. Rodrigo Salvador, Doutorado - Technical University Of Denmark

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 28/09/2022.

Dedico este trabalho à minha família e amigos,
pelos momentos de ausência; aos meus
orientadores, pela paciência demonstrada no
decorrer do trabalho; e principalmente, ao meu
marido por ter me dado todo apoio necessário para
que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder a dádiva da vida e nela realizar tantos sonhos. Obrigada por me permitir errar, aprender e crescer, por ter me dado uma família tão especial, enfim, obrigada por tudo.

Expresso aqui toda minha gratidão e apreço àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se concretizasse. Certamente a elaboração deste trabalho não alcançaria êxito sem o precioso apoio, colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas.

Um agradecimento especial, ao meu orientador, o Professor Dr. Cassiano Moro Piekarski, e ao meu coorientador, o Professor Dr. Daniel Poletto Tesser, por toda paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientaram neste trabalho e em todos aqueles realizados durante o curso. Agradeço também especialmente, ao colega de laboratório, Murillo Vetroni Barros, pela disponibilidade e generosidade na partilha de conhecimentos e dicas essenciais na aplicação dos dados e análise dos resultados. Muito obrigada por terem me corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar, suas orientações foram de grande valia para o resultado alcançado.

Quero agradecer também, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), ao Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis (LESP). Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas e professores, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Aos meus queridos familiares e amigos quero registrar meu eterno agradecimento, pelo apoio incondicional que me deram, especialmente meu amado marido pelas revisões incansáveis ao longo da elaboração deste e outros trabalhos.

Agradeço também à empresa e cooperativas que participaram desta pesquisa, fornecendo as informações necessárias para o alcance dos resultados encontrados e para a conclusão deste estudo.

Ainda, agradeço à Fundação de Apoio à Educação, Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (FUNTEF-PR/PG), à United Nations Organization for Industrial Development (UNIDO), à Global Environmental Facility (GEF) e também, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo aporte financeiro na realização do mestrado e desta dissertação.

“O que não te desafia não te transforma”.
José Roberto Marques.

RESUMO

Recentemente, questões relacionadas ao desenvolvimento rumo à economia circular vêm sendo levantadas, principalmente, questionamentos da não existência de uma configuração consensual em quantificar economias, regiões e, até mesmo, indústrias em matéria de circularidade. Com a finalidade de apontar os potenciais ganhos com a implementação de um biodigestor no sistema de manufatura de um produto industrial, o objetivo geral desta dissertação foi mapear as oportunidades de circularidade do sistema de manufatura de um produto industrial em diferentes níveis e cenários. Para atingir esse objetivo, primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica caracterizando as práticas de economia circular e metabolismo territorial (avaliação de fluxos materiais, imateriais e financeiros significativos de determinada região) no contexto de bioenergia na indústria. Na sequência, levantou-se os dados dos fluxos integrados de materiais e energia do sistema de manufatura de um produto da indústria parceira desta pesquisa. A coleta de dados, foi realizada através de contatos diretos com a indústria, e complementarmente, em dois projetos que levantaram dados de diversos produtos, suas atividades e desempenho ambiental. Posteriormente, os dados foram inseridos na ferramenta *AgroCircle Wins* (ACW) obtendo gráficos circulares que permitiu a visualização de diversas informações interconectadas, os fluxos de entrada e saída de informações quantitativas e também, valores percentuais de circularidade em três níveis de abrangência, N1 (Indústria), N2 (Parque Industrial) e N3 (Cooperativas). Através da análise dos resultados, apontou-se um benefício de maior circularidade quando se avalia o N3, nível de maior abrangência, apresentando 89% de circularidade referente aos fluxos de materiais, enquanto o N1 e N2 apontaram 37,8% e 39,14%, respectivamente. Este resultado demonstra a importância e o benefício da troca de materiais entre os processos, sendo eles pertencentes à Indústria, ao Parque Industrial e às Cooperativas, em que reduz o desperdício e os custos na produção, além de, agregar valor e unir o desenvolvimento econômico territorial às restrições ambientais. Na avaliação da circularidade do produto em termos de energia, por consequência do emprego exclusivo de energia proveniente de rede externa, essa circularidade foi nula nos três níveis, mas há possibilidade de inclusão de ações para circularidade com iniciativas de inclusão de painéis fotovoltaicos, fontes eólicas e/ou geração de energia elétrica proveniente da combustão do biogás. Mediante uma gestão mais eficiente dos recursos e do desenvolvimento de tecnologias para a redução de resíduos sólidos os ganhos econômicos e ambientais com o uso da bioenergia favorecem a economia circular.

Palavras-chave: economia circular; bioenergia; simbiose industrial; metabolismo territorial.

ABSTRACT

Recently, issues related to development towards a circular economy have been raised, mainly questions about the non-existence of a consensual configuration to quantify economies, regions and even industries in terms of circularity. In order to point out the potential gains with the implementation of a biodigester in the manufacturing system of an industrial product, the general objective of this thesis was to map the circularity opportunities of the manufacturing system of an industrial product at different levels and scenarios. To achieve this objective, firstly, a bibliographical review was carried out characterizing the practices of circular economy and territorial metabolism (assessment of significant material, intangible and financial flows in a given region in the context of bioenergy in industry. Next, data on the integrated flows of materials and energy in the manufacturing system of a product from the partner industry of this research were collected. Data collection was carried out through direct contact with the industry and in two projects that collected data on various products, their activities, and environmental performance. Subsequently, the data were entered into the AgroCircle Wins (ACW) tool, obtaining circular graphs that allowed the visualization of various interconnected information, the input and output flows of quantitative information and also percentage values of circularity at three levels of coverage, N1 (Industry), N2 (Industrial Park) and N3 (Cooperatives). Through the analysis of the results, it was pointed out a benefit of greater circularity when evaluating the N3, the most comprehensive level, presenting 89% of circularity referring to material flows, while the N1 and N2 indicated 37.8% and 39.14 %, respectively. This result demonstrates the importance and benefit of exchanging materials between processes belonging to the Industry, the Industrial Park, and the Cooperatives, reducing waste and production costs, adding value, and uniting economic development. Territorial to environmental restrictions. Taking only the external grid energy supply showed a null circularity at the three levels in terms of energy. Still, there is the possibility of including actions for circularity with initiatives to include photovoltaic panels, wind, and, or generation of electric power from the combustion of biogas. Through more efficient management of resources and the development of technologies to reduce solid waste, economic and environmental gains from the use of bioenergy favor the circular economy.

Keywords: circular economy; bioenergy; industrial symbiosis; territorial metabolism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura do Trabalho	21
Figura 2 - Estrutura Metodológica	22
Quadro 1 - Apêndice B.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico circular em termos de fluxos de materiais para o N1	60
Gráfico 2 - Gráfico circular em termos de fluxos de material para o N2	62
Gráfico 3 - Gráfico circular em termos de fluxos de material para o N3	64
Gráfico 4 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia para o N2	68
Gráfico 5 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia para o N3	68
Gráfico 6 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia com biodigestor externo (a) N1 e N2; (b) N3	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do Portfólio 1 da revisão teórica	23
Tabela 2 - Composição do Portfólio 2 da revisão teórica	24
Tabela 3 - Composição do Portfólio Final da revisão teórica	25
Tabela 4 - Cálculo de circularidade (%) por processo na Indústria (N1)	59
Tabela 5 - Cálculo de circularidade (%) por processo no Parque Industrial (N2)	61
Tabela 6 - Cálculo de circularidade (%) por processo nas Cooperativas (N3)	63
Tabela 7 - Comparativo de circularidade (%) nos cenários 1 e 2 no Parque Industrial (N2)	65
Tabela 8 - Comparativo de circularidade (%) nos cenários 1 e 2 nas Cooperativas (N3)	66

LISTA DE SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACW	<i>AgroCircle Wins</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EC	Economia Circular
EMF	<i>Ellen MacArthur Foundation</i>
FI	Fator de Impacto
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRS	<i>Global Status Report</i>
MCI	<i>Material Circularity Indicator</i>
OMC	Organização Mundial do Comércio
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PPGEP	Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
CEIP	<i>Circular Economy Indicator Prototype</i>
CET	<i>Circular Economy Toolkit</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
LESP	Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis
SESCOOP	Serviço Nacional de Aprendizagem do Cooperativismo
ONU	Organização das Nações Unidas
UNEP	<i>United Nations Environment Program</i>
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Área de Concentração do Programa, Aderência à Engenharia de Produção e Relevância em Gestão Industrial.....	19
1.4	Estrutura da Dissertação	20
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
2.1	Fase 1: Revisão Bibliográfica.....	22
2.1.1	Composição do Portfolio 1	23
2.1.2	Composição do Portfolio 2	24
2.1.3	Composição do Portfolio Final.....	24
2.2	Fase 2: Coleta de Dados	25
2.2.1	Planilha para coleta de dados	26
2.2.2	Coleta de Dados da Indústria	26
2.3	FASE 3: Aplicação dos Dados na Ferramenta.....	27
2.3.1	Descrição da ACW e Aplicação dos Dados na ferramenta	27
2.3.2	Critérios para Definição e Escopo dos Níveis	29
2.4	FASE 4: Apreciação dos Resultados de Circularidade.....	33
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	34
3.1	Economia Circular.....	34
3.1.1	Ferramentas Metodológicas para a Mensuração de Circularidade	38
3.2	Metabolismo Territorial	43
3.3	Bioenergia Aplicada no Contexto Industrial	46
3.4	Circularidade, Bioenergia e Metabolismo Territorial.....	49
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58

4.1	Diagnóstico de Circularidade Multiníveis	58
4.1.1	Cenário 1 – Análise com biodigestor no escopo.....	59
4.1.2	Cenário 2 – Análise sem biodigestores no escopo.....	65
4.2	Circularidade com Energia Integrada na Indústria.....	67
5	OPORTUNIDADES PARA AMPLIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DO SISTEMA DE MANUFATURA DE UM PRODUTO INDUSTRIAL	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A - Composição Final dos Resultados da Coleta de Dados.....	90
	APÊNDICE B - Portfólio final de artigos descobertos na literatura..	98

1 INTRODUÇÃO

Em busca de maior eficiência de energia e materiais, e da substituição de produtos mais nocivos para o meio ambiente e saúde, as indústrias vêm apostando na Produção Mais Limpa (P+L), conceito colocado em prática desde 1987 em que proporcionou um impacto socioeconômico expressivo a uma ideia, que originalmente, foi criada para despertar as indústrias para suas responsabilidades ambientais (HENS *et al.*, 2018). Nesta jornada, diversas ferramentas e abordagens surgiram com propósitos similares. Como exemplo, é possível citar as normas da série ISO 14.000, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), logística reversa, Simbiose Industrial (SI), *design for environment* (design para o meio ambiente), *cradle-to-cradle* (berço a berço), biomimetismo e principalmente a Economia Circular (EC) (HASS *et al.*, 2015).

Por ser fundamentada em projetos de sistemas de circuito fechado e na reutilização de materiais, a EC potencialmente se traduz em uma economia sustentável, de baixo carbono e eficiente em termos de recursos (THEROND *et al.*, 2017; PIWOWAR, 2020; RODIAS *et al.*, 2021). Complementarmente, o reaproveitamento e o repensar de materiais a serem reciclados nas cadeias de abastecimento, contribui, significativamente, para a melhora da qualidade, quantidade e sustentabilidade na produção de bioenergia (MOLINA-MORENO *et al.*; 2017).

Como parte do processo evolutivo, a EC combina desenvolvimento econômico com benefícios para as indústrias, empresas, a sociedade e o meio ambiente (JUN; XIANG, 2011; CANTZLER *et al.*, 2020). Somente o setor industrial, em 2020, foi responsável por 26,3% do produto interno bruto mundial (WORLD BANK, 2022). Diante dessa representatividade, as atividades industriais como o abate de animais, a produção de álcoois combustíveis e óleos vegetais e o processamento de leite e mandioca são atividades que geram maiores quantidades de resíduos e efluentes em todo o mundo (MARTINEZ-BURGOS *et al.*, 2021).

Sendo cada vez mais adotado em diversas localidades o uso do biogás, proveniente de resíduos e efluentes, no sul do Brasil essa prática se tornou uma atividade economicamente viável devido a fatores relacionados à disponibilidade de diversas fontes de efluentes (abatedouros, frigoríficos, suinoculturas, fazendas leiteiras e amido), clima favorável e aumento do custo da energia elétrica (FERREIRA *et al.*, 2018; VILVERT *et al.*, 2020)

A implementação de biodigestores nas indústrias para a conversão desses resíduos de baixo valor em produtos altamente valiosos, como o que acontece com a bioenergia, é uma oportunidade particularmente interessante para o setor agroindustrial, visto que esses resíduos representam grandes preocupações entre os setores econômicos devido ao custo agregado e impactos ambientais nos processos de descarte (CUSENZA *et al.*, 2021). A produção de bioenergia e biocombustíveis advindos da produção de biogás, proveniente da digestão anaeróbia de biorresíduos de indústrias alimentares, é uma prática amplamente reconhecida como uma opção ambiental, econômica e sustentável (CUSENZA *et al.*, 2021; KOPPELMÄKI; HELENIUS; SCHULTE, 2021; LAMOLINARA, 2022).

Para Riding *et al.* (2015), os sistemas de bioenergia têm um potencial significativo para apoiar a formação da economia circular nas indústrias, principalmente, para o setor de processamento de alimentos, visto que, além de gerenciar seus resíduos biológicos, poderão produzir bioenergia para autoconsumo. Dessa forma, as indústrias se beneficiam com a diminuição do custo, com a compra de energia e eliminação de biorresíduos, melhoram seu desempenho e se tornam mais competitivas em uma economia global que pretende ser mais sustentável (SANTOS; MAGRINI, 2018; CUSENZA *et al.*, 2021). Para maximizar a sustentabilidade desses benefícios, as comunidades locais precisam ser incluídas no modelo de desenho de negócios e na tomada de decisões e ter oportunidades de participar das atividades da cadeia de suprimentos (RÖDER; CHONG; THORNLEY, 2022).

O desenvolvimento sustentável simboliza, acima de tudo, a proteção do ambiente natural e a redução da dependência excessiva dos recursos naturais (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2015). Neste sentido, a simbiose industrial, praticada com a EC nos setores industriais, em nível local ou regional, utilizam uma variedade de agentes complementares em que as saídas ou desperdícios de uma atividade são empregados como entradas para outras (THEROND *et al.*, 2017). Essa integração territorial das atividades econômicas, para Kline *et al.* (2016), favorece potenciais benefícios com o uso de insumos alternativos, maior oportunidade de comercialização e produção de energia local ou regional, principalmente para bioenergia.

A avaliação do desenvolvimento rumo à economia circular está no centro de inúmeras questões levantadas recentemente por pesquisadores, decisores políticos, empresários e ativistas (PRIYADARSHINI; ABHILASH, 2020). Tais questionamentos

acontecem em decorrência da não existência de uma configuração consensual, robusta e integrada de quantificar o quão efetivas são as economias, as regiões ou, mesmo, as empresas e seus produtos em matéria de circularidade.

As indústrias de processamento de alimentos são consideradas essenciais para o abastecimento mundial, em virtude disso, a avaliação do ciclo de vida de produtos alimentícios vem ganhando destaque (FERRARI *et al.*, 2020; VEGA *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2021), bem como, o tratamento de biomassa para uso e aplicação da bioenergia como fonte de energia renovável (LIU *et al.*, 2022; RÖDER; CHONG; THORNLEY, 2022). Alguns estudos enfatizaram a necessidade de aplicação de ferramentas metodológicas ou indicadores abrangentes em diversos níveis capazes de mensurar a circularidade das indústrias e seus produtos (MORAGA *et al.*, 2019, NIERO, KALBAR, 2019; SAIDANI *et al.*, 2019, KRAVCHENKO, MCALOONE, PIGOSSO, 2020; OLIVEIRA, DANTAS, SOARES, 2021). Dentre essas ferramentas, a AgroCircle Wins (ACW) apresenta, através de gráficos circulares, os fluxos externos e internos de materiais, energia e financeiro, com opções de circularidade em cada categoria (BARROS, 2019; BARCELOS *et al.*, 2021).

A ACW foi escolhida para esta análise por ser uma ferramenta pioneira na análise autônoma de fluxos de dados de materiais e energia elétrica dentro e fora das organizações agroindustriais. Além de, ser uma ferramenta versátil que pode ser implementada em diversos casos, ela apresenta soluções sustentáveis capaz de reduzir o impacto ambiental e financeiro, desde que haja dados para processá-los e transformá-los em relatório avaliativo.

Em conformidade com os artigos encontrados, apenas um estudo avaliou a circularidade na produção de casulos de seda para promover a bioeconomia (BARCELOS *et al.*, 2021), não identificando nenhum estudo que propõe mapear as oportunidades da circularidade do sistema de manufatura de um produto industrial em diferentes níveis de abrangência (ou multiníveis).

Fundamentando-se na literatura, o presente estudo parte da seguinte problemática de pesquisa: “Quais as oportunidades de ampliação de circularidade de um sistema de manufatura de um produto industrial, com e sem biodigestor, em diferentes níveis?”.

Como resposta à problemática, são descritos os seguintes objetivos na subseção a seguir.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Mapear as oportunidades de circularidade do sistema de manufatura de um produto industrial em diferentes níveis e cenários.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar práticas de economia circular e metabolismo territorial no contexto de bioenergia na indústria;
- Levantar dados dos fluxos integrados de materiais e energia da indústria;
- Avaliar os resultados obtidos a partir de gráficos circulares;
- Comparar os dados nos cenários com e sem biodigestor;
- Analisar a circularidade com energia integrada na indústria.

1.2 Justificativa

A primeira justificativa para a realização desta dissertação encontra-se na oportunidade de ampliação da circularidade de um produto industrial em seu sistema de manufatura, em multiníveis com o auxílio da ferramenta ACW. Os estudos analisados ressaltam a carência de aplicação de ferramentas metodológicas em diferentes níveis (Seção 2.3.2 - Critérios para definição e escopo dos níveis) com a finalidade de mensurar a circularidade das indústrias e seus produtos.

Ressalta-se, ainda, que a identificação de oportunidades para ampliar a circularidade pode tornar a cadeia produtiva mais eficiente e limpa, impulsionar o progresso tecnológico das unidades industriais com processos financeiramente atraentes, possibilitando a transição para um caminho mais sustentável a médio e longo prazo (CUSENZA *et al.*, 2021; MARTINEZ-BURGOS *et al.*, 2021). Considerando este ponto, a segunda justificativa.

Por fim, a pesquisa se justifica pela integração das restrições ambientais ao desenvolvimento econômico por meio de uma dinâmica produtiva, cujos produtos e externalidades se difundem por todo território com contribuições socioambientais que

atendem alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): através da inserção de energia renovável no processo de manufatura (melhoria da eficiência energética – 7.3, promover tecnologia de energia limpa – 7.a, adotar tecnologia e processos industriais mais limpos e ambientalmente corretos – 9.4, uso eficiente dos recursos naturais - 12.2); pelo reaproveitamento de descartes industriais para produção de energia (dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental - 8.4, alcançar o manejo saudável dos produtos e de resíduos ao longo de todo ciclo de vida - 12.4, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso - 12.5) e, fortalecimento da pesquisa científica (melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais principalmente em países em desenvolvimento – 9.5).

1.3 Área de Concentração do Programa, Aderência à Engenharia de Produção e Relevância em Gestão Industrial

Inicialmente, este estudo está inserido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa, na área de concentração em Gestão Industrial, linha de pesquisa em Gestão da Produção e Manutenção (PPGEP, 2021), voltado ao projeto de Bioprodução.

Sobre a linha de pesquisa em Gestão da Produção e Manutenção, o estudo propõe aplicar uma ferramenta regionalmente adequada para a manutenção dos processos produtivos e automatizados. E voltando-se ao projeto de Bioprodução, a pesquisa inclui como principais temáticas a economia circular, tecnologias e inovações verdes, avaliações econômica e financeira, bioenergia, mapeamento e análise de fluxos de materiais e energia.

O Bioprodução é um projeto de pesquisa do PPGEP e vinculado ao Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis (LESP) que desenvolve pesquisas e soluções verdes a fim de promover a bioeconomia e o desenvolvimento sustentável (PPGEP, 2021)

Entre as áreas apresentadas pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO, 2008), este estudo ainda atua nas áreas de engenharia de operações e processo de produção, engenharia organizacional e engenharia da sustentabilidade.

Quanto à concentração em Gestão Industrial, este estudo pretende atender a demanda pela circularidade no setor industrial através da otimização dos fluxos de materiais, energia e financeiro. Ademais, o estudo propõe o fortalecimento entre a universidade e as indústrias, mediante demanda e oferta de soluções tecnológicas auxiliando no desenvolvimento regional.

1.4 Estrutura da Dissertação

O estudo está estruturado em cinco capítulos. Inicialmente, seção 1, as considerações temáticas, a problemática encontrada por este estudo, bem como o objetivo geral, objetivos específicos, justificativas para a sua realização, área da Engenharia de Produção, área de concentração e linha de pesquisa.

Na sequência, seção 2, é apresentada a metodologia utilizada, dividida em quatro etapas, para a elaboração e desenvolvimento do estudo, e em seguida, na seção 3, o embasamento teórico é explanado compondo as temáticas envolvidas. A análise e discussão dos resultados obtidos no desenvolvimento deste estudo são exibidos na seção 4. Por fim, na seção 5 é descrita as considerações finais.

Portanto, para obter a melhor visualização da estrutura deste trabalho, a dissertação está estruturada de acordo com a Figura 1, apresentando a visão geral da organização relatada.

A seção seguinte apresenta a metodologia que norteou este estudo para o alcance do objetivo geral proposto e solução da problemática de pesquisa encontrada.

Figura 1 - Estrutura do Trabalho

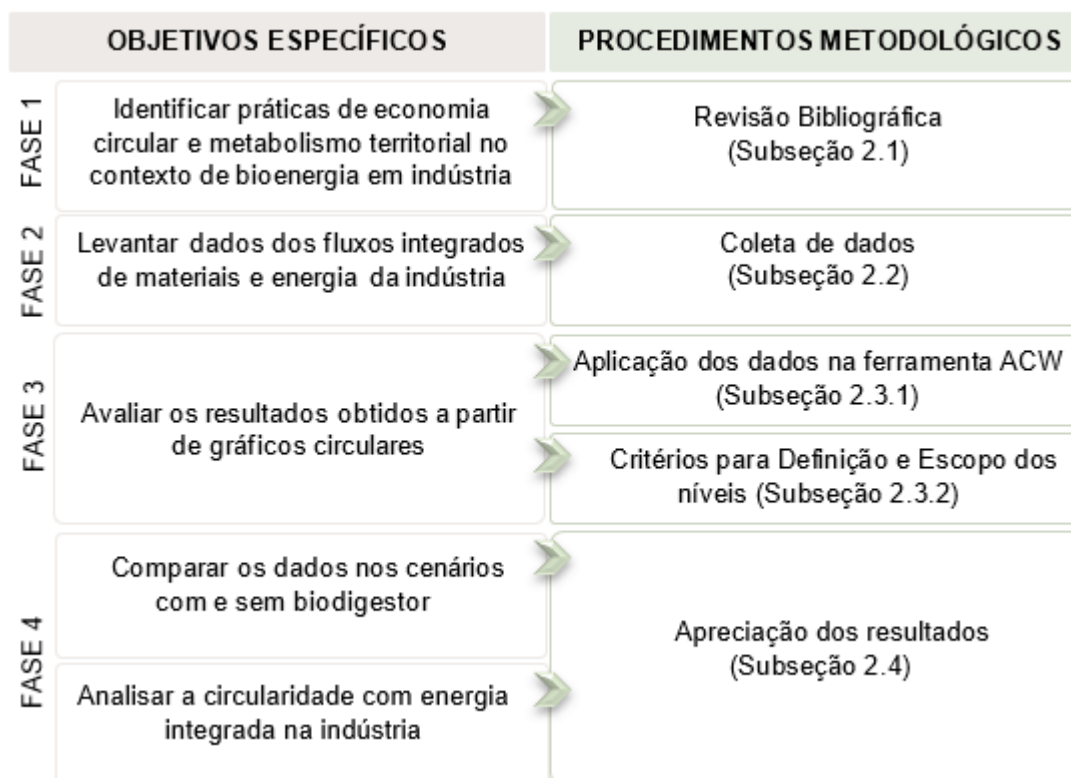
CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA				
Desenvolvimento Sustentável	Economia Circular	Simbiose Industrial	Bioenergia	
Problemática				
Quais as oportunidades de ampliação de circularidade de um sistema de manufatura de um produto industrial, com e sem biodigestor, em diferentes níveis?				
Objetivo Geral				
Mapear as oportunidades de circularidade do sistema de manufatura de um produto industrial em diferentes níveis e cenários				
Objetivos Específicos				
Identificar práticas de economia circular e metabolismo territorial no contexto de bioenergia na indústria	Levantar dados dos fluxos integrados de materiais e energia da indústria	Avaliar os resultados obtidos a partir de gráficos circulares	Comparar os dados nos cenários com e sem biodigestor	Analisar a circularidade com energia integrada na indústria
Procedimentos Metodológicos				
Revisão Bibliográfica	Coleta de dados	Aplicação dos dados na ACW	Critérios para Definição e	Apreciação dos Resultados
Referencial Teórico				
Economia Circular	Metabolismo Territorial	Bioenergia Aplicada no Contexto Industrial	Circularidade, Bioenergia e Metabolismo Territorial	
Análise e Discussão dos Resultados				
Diagnóstico da circularidade em três níveis	Circularidade com energia renovável na indústria	Oportunidades para aumentar a circularidade		
Considerações Finais				
Conclusão	Limitações	Oportunidades de estudos futuros		

Fonte: Autoria Própria (2022)

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia apresentada nesse capítulo foi estruturada em quatro fases, realizadas de forma cronológica, onde cada fase atendeu a um objetivo específico, como exposto na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura Metodológica



Fonte: Autoria Própria (2022)

As subseções seguintes apresentam detalhadamente as fases expostas na figura acima.

2.1 Fase 1: Revisão Bibliográfica

Para uma melhor abrangência dos termos em estudo, optou-se por realizar duas buscas distintas para a construção do portfólio final que compõe a revisão bibliográfica deste estudo, sendo chamados de Portfólios 1 e 2. Em ambas as buscas, as bases de dados pesquisadas foram: Science Direct, Scopus e Web of Science. Esses bancos de dados foram selecionados devido à sua ampla cobertura de periódicos das áreas de interesse do estudo.

2.1.1 Composição do Portfólio 1

A busca das palavras-chave para a composição deste portfólio seguiu a seguinte combinação aplicada com operadores Booleanos: (*bioenergy AND (“circular economy” OR “territorial metabolism” OR “industrial symbiosis”*)). Essa combinação foi realizada nas três bases, bem como, o período da busca não foi limitado, sendo investigada desde o início da contabilidade em 1945, até 30 de março de 2021 (data efetiva da busca).

Durante a fase de busca na base de dados, optou-se em selecionar artigos disponíveis e publicados em periódicos internacionais, sendo artigos completos e de revisão. Um total de 406 artigos foram encontrados nas três bases. Na sequência, três tipos de filtros foram aplicados para a seleção dos documentos, conforme apresentado a seguir:

- Filtro 1: Eliminação de documentos duplicados;
- Filtro 2: Análise e exclusão de documentos com títulos, resumos e palavras-chave que não possuem relevância ao tema; e
- Filtro 3: exclusão de trabalhos apresentados em conferências, livros e capítulos de livros, resultando em um portfólio final de 40 artigos.

A quantidade de documentos em cada base de dados, bem como o resultado após a aplicação de cada filtro estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Portfólio 1 da revisão teórica

Procedimentos de Pesquisa	Quantidade
Science Direct	80
Scopus	156
Web of Science	170
Total	406
Filtro 1	198
Filtro 2	56
Filtro 3	40
Portfólio 1	40

Fonte: Autoria Própria (2022)

2.1.2 Composição do Portfólio 2

A composição deste portfólio, partiu da necessidade de encontrar ferramentas metodológicas aplicadas nas indústrias para mensuração da circularidade. A combinação das palavras-chaves aplicada com operadores Booleanos foi: (“*methodological tools*” AND *circularity*). O período realizado dessa busca também não foi limitado, portando a contabilidade foi desde o início estabelecida pela base, 1945, até 13 de abril de 2021 (data efetiva da busca).

Um total de 30 artigos foram identificados nas três bases e na sequência também passaram pelos três filtros, como da composição do Portfólio 1. O resultado após a aplicação dos 3 filtros aplicados foi de 15 de documentos. Na Tabela 2, segue a ordem dos filtros e o resultado da composição do portfólio 2.

Tabela 2 - Composição do Portfólio 2 da revisão teórica

Procedimentos de Pesquisa	Quantidade
Science Direct	16
Scopus	13
Web of Science	1
Total	30
Filtro 1	24
Filtro 2	18
Filtro 3	15
Portfólio 2	15

Fonte: Autoria Própria (2022)

2.1.3 Composição do Portfólio Final

O portfólio final que compõe esta revisão teórica, compreende primeiramente os 40 estudos do portfólio 1, acrescentando os 15 estudos do portfólio 2, totalizando 55 estudos encontrados mediante a realização da revisão bibliográfica. No entanto, outros estudos foram utilizados para complementar as discussões realizadas, como o uso da estratégia *snowballing* ou efeito cascata (utilização de referências de citações dos artigos encontrados), normativas e homepages. Portanto, na Tabela 3, pode-se observar um total de 83 citações para o referencial teórico.

Tabela 3 - Composição do Portfólio Final da revisão teórica

Portfólio	Quantidade
Artigos P1	40
Artigos P2	15
Artigos resultantes da <i>snowballing</i>	16
Normas	2
Homepage	10

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Dessa forma, 83 documentos foram utilizados, efetivando a leitura na íntegra e analisados individualmente. Esses documentos foram armazenados em um gerenciador de referência bibliográfica que permitiu uma melhor organização da pesquisa. Algumas características dos artigos do P1, P2 e resultantes da *snowballing* podem ser observados no Quadro 1 (Apêndice B, p.97)

2.2 Fase 2: Coleta de Dados

Essa fase foi subdivida em 2 etapas que são referentes ao preenchimento das atividades, processos e níveis que fazem parte da ferramenta *AgroCircle Wins* (AGROCIRCLEWINS, 2021) selecionada para mensurar a circularidade do sistema produtivo e, a etapa para a coleta efetiva dos dados.

Essa ferramenta foi aplicada em uma indústria, em diferentes níveis (ou limites do sistema), com a finalidade de analisar e apontar os benefícios da circularidade com a instalação de um biodigestor.

A plataforma *AgroCircle Wins* (AGROCIRCLEWINS, 2021), foi desenvolvida pela chamada CNPq SESCOOP nº 07/2018 - Faixa A - Processo 403267/2018-8 pelo Serviço Nacional de Aprendizagem do Cooperativismo (SESCOOP) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Essa ferramenta foi associada também ao trabalho de Barros (2019). Mais detalhes e informações sobre a ferramenta *AgroCircle Wins* podem ser vistos na subseção 2.3.1.

2.2.1 Planilha para coleta de dados

Para orientar essa etapa de coleta de dados foi utilizada uma planilha baseada na estrutura da ficha elaborada especificamente para a coleta de dados em organizações e inserção na ferramenta ACW (BARROS, 2019).

A planilha fornece no cabeçalho informações necessárias e essenciais como: nome do processo e descrição (funcionamento, histórico, informações qualitativas e quantitativas). Na sequência, campos para o preenchimento de informações divididas em duas etapas: entrada de material e energia do seu respectivo fornecedor e especificação; e, saída de material e energia, especificação e destino.

O preenchimento desta planilha foi embasado nos processos existentes da organização, como fluxos de materiais e energia referentes às entradas e saídas, fornecedores e destino.

O modelo da planilha proposta para a coleta de dados para completar a etapa inicial da ferramenta pode ser observada no Apêndice A (p.89).

2.2.2 Coleta de Dados da Indústria

Com base nas informações a serem preenchidas na ficha, os dados utilizados são provenientes de dois projetos realizados pelo LESP e contatos diretos com a indústria.

Um dos projetos é o *“Development of Innovative Tools for Locating and Evaluating Business Opportunities Related to Biogas Utilization for Energetic Purposes”*, vinculado a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), e o segundo envolveu projeto realizado com a indústria parceira desta dissertação.

Esses projetos levantaram dados de diversos produtos, suas atividades e desempenho ambiental. Para o presente estudo extraímos, especificamente, as informações obtidas de um dos produtos industrializados e foram preenchidos conforme planilhas de apêndices. Os valores fornecidos pela indústria parceira foram preservados, respeitando o sigilo industrial.

A composição final dos resultados da coleta de dados pode ser vista no Apêndice A (p.89).

2.3 Fase 3: Aplicação dos Dados na Ferramenta

Essa fase foi dividida em duas seções que tratam da descrição da ACW e aplicação dos dados na ferramenta (subseção 2.3.1) e dos critérios para definição e escopo dos níveis (subseção 2.3.2)

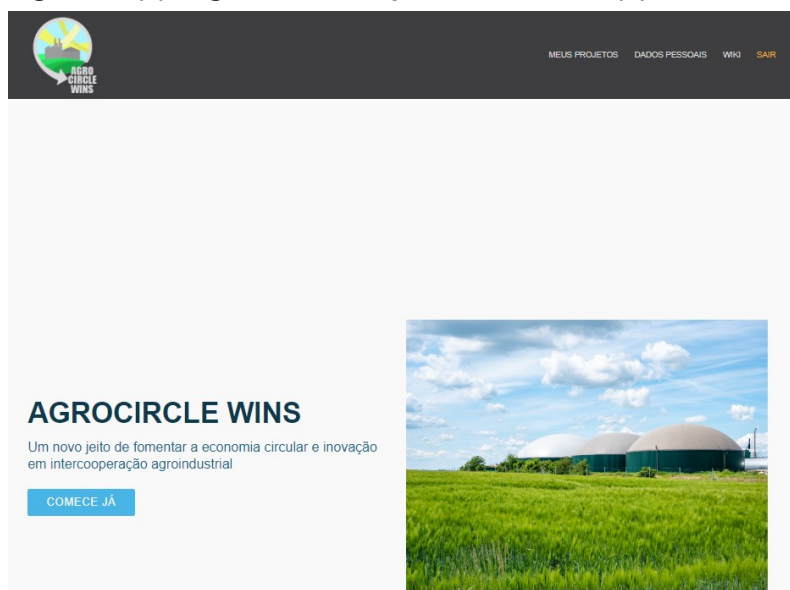
2.3.1 Descrição da ACW e Aplicação dos Dados na ferramenta

Após o preenchimento das informações solicitadas na planilha, segue para a fase de inserção dos dados obtidos na ferramenta AgroCircle Wins (ACW).

Na página inicial da plataforma ACW (Figura 3a) é possível realizar um cadastro vinculado ao correio eletrônico. Nela ainda, o usuário tem acesso à Wiki (Figura 3b) que introduz a plataforma e apresenta informações que auxiliam o usuário a explorar o site.

Figura 3 - (a) Página inicial da plataforma ACW; (b) Wiki

(a)



(b)



Boas vindas

Seja bem vindo(a) ao projeto AgroCircle Wins: Economia circular e inovações em intercooperação agroindustrial

Objetivo do projeto:
Desenvolver um modelo para [economia circular](#) em intercooperações agroindustriais que promova sustentabilidade, inovação e competitividade.

Objetivo da ferramenta online e gratuita:
Para cumprir com o objetivo do projeto, o modelo desenvolvido foi inserido em uma ferramenta disponibilizada de modo online e gratuito para a sociedade. Portanto, o objetivo da ferramenta é apresentar de forma gráfica ([gráfico circular](#)) fluxos internos e externos (de material, energia e financeiro), com os respectivos percentuais de [circularidade](#) de cada unidade, permitindo a internalização desses fluxos para dentro do sistema, tendo o potencial de agregação de valor no negócio, e também para atuar com práticas direcionadas para a economia circular.

Aplicações:
A ferramenta foi aplicada, testada e validada em uma propriedade rural, inserida na marca institucional Unium e Cooperativa Agroindustrial Castrolanda, como forma de um estudo de caso piloto.

Resultados do projeto:

- Modelo para economia circular em intercooperações agroindustriais que promova sustentabilidade, inovação e competitividade
- [Plataforma online](#) com interface para utilização gratuita do modelo construído neste projeto com o foco de mensurar a circularidade de organizações e processos.
- [Publicação científica](#) em periódico científico internacional de alto impacto.

Público alvo:
Embora a ferramenta tenha sido testada, aplicada e validada no ambiente agroindustrial (devido o escopo do projeto), a construção e os dados de fundo podem ser direcionadas para outros ambientes minúsculos do local de aplicação da ferramenta são: possuir processos que contenham fluxos quantitativos de entrada e saída de: material, energia ou financeiro.

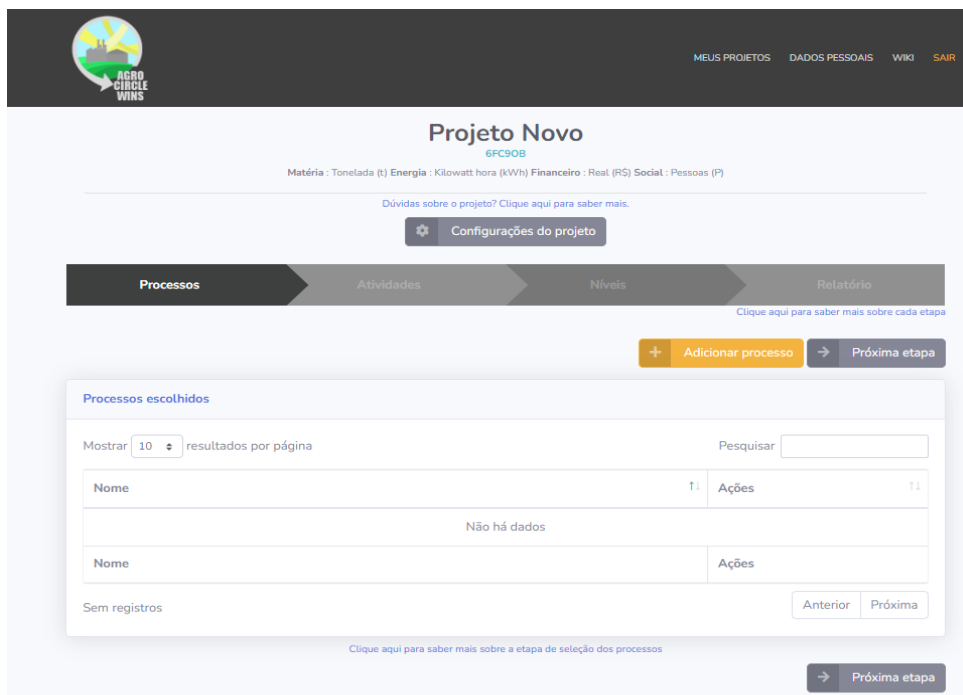
Impacto gerado no projeto:

- Impacto social: a promoção da economia circular a partir da aplicação da ferramenta pode influenciar a geração de emprego, renda e desenvolvimento social, devido novas oportunidades de desenvolvimento também pode ser levado em consideração é a disponibilização da ferramenta em meio web e de forma gratuita para a sociedade. Logo, gestores agrícolas e stakeholders podem utilizar a ferramenta para a baseadas em ações voltadas para economia circular.
- Impacto no setor agro: a inserção de alternativas em prol da economia circular pode trazer benefícios consistentes aos negócios. O setor agro pode beneficiar-se de requisitos ambientais, competitivos e processos internos. A identificação de circularidade na cadeia produtiva agrícola pode torná-la mais eficiente e limpa. O desenvolvimento no campo pode fomentar o aumento da eficiência energética, metc consequentemente, custos podem ser reduzidos. Tais abordagens podem impulsionar o progresso tecnológico das propriedades rurais e cooperativas agroindustriais, permitindo a transição para um camin
- Impacto acadêmico: tendo em vista esta iniciativa como pioneira, original e de âmbito internacional, os resultados e contribuições direcionam-se para o meio acadêmico. As aplicações práticas utilizando a energia e financeiro em organizações podem servir como referência para o enriquecimento do aspecto teórico na literatura.
- Impacto socioambiental: as contribuições socioambientais desenvolvidas com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) está vinculado na aplicação e resultados desta ferramenta.

Fonte: Agrocircle Wins (2022)

Após o cadastro do usuário é possível criar um novo projeto (Figura 4) e na sequência, a ACW apresenta 3 etapas consecutivas de preenchimento de dados. Na primeira, são inseridos os nomes dos processos. Na segunda, as atividades indicando os fluxos (processo de origem e destino) e a quantidade (massa ou energia elétrica) envolvida na atividade. E a terceira etapa, se trata do estabelecimento do nível, ou limites do sistema que será adotado para o projeto.

Figura 4 - Novo Projeto



Projeto Novo
6FC90B

Matéria : Tonelada (t) Energia : Kilowatt hora (kWh) Financeiro : Real (R\$) Social : Pessoas (P)

Dúvidas sobre o projeto? Clique aqui para saber mais.

Configurações do projeto

Processos | Atividades | Níveis | Relatório

Clique aqui para saber mais sobre cada etapa

Adicionar processo | Próxima etapa

Processos escolhidos

Mostrar 10 resultados por página

Pesquisar

Nome	Ações
Não há dados	
Nome	Ações

Sem registros

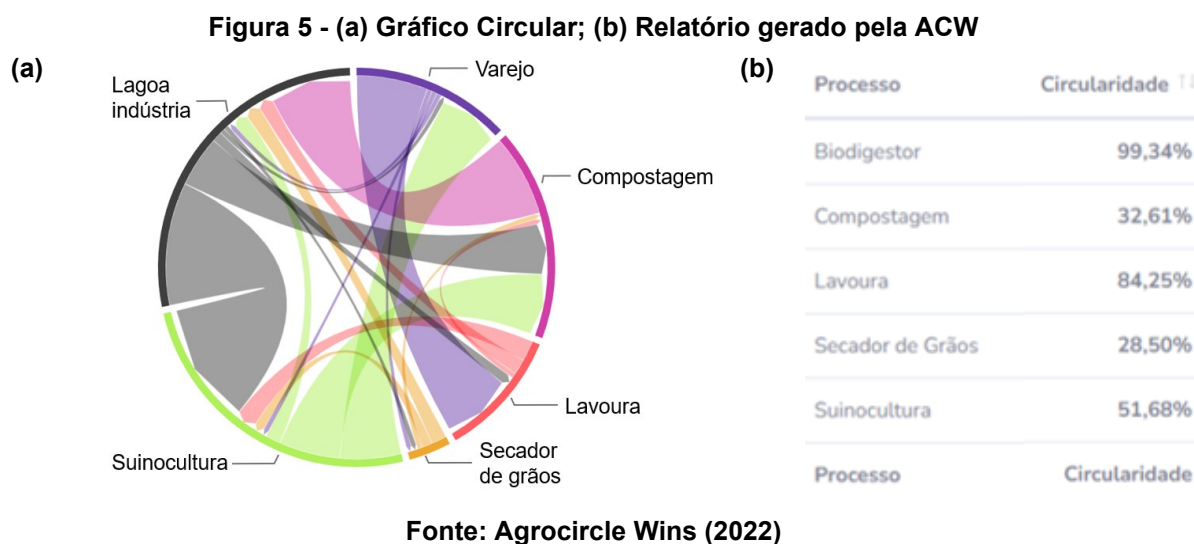
Anterior | Próxima

Clique aqui para saber mais sobre a etapa de seleção dos processos

Próxima etapa

Fonte: Agrocircle Wins (2022)

Finalizado o cadastro das informações de processos, atividades e níveis, um gráfico circular (Figura 5a) e um relatório padrão (Figura 5b) é gerado pela ferramenta sendo possível escolher a apresentação em termos de matéria, energia e financeiro.



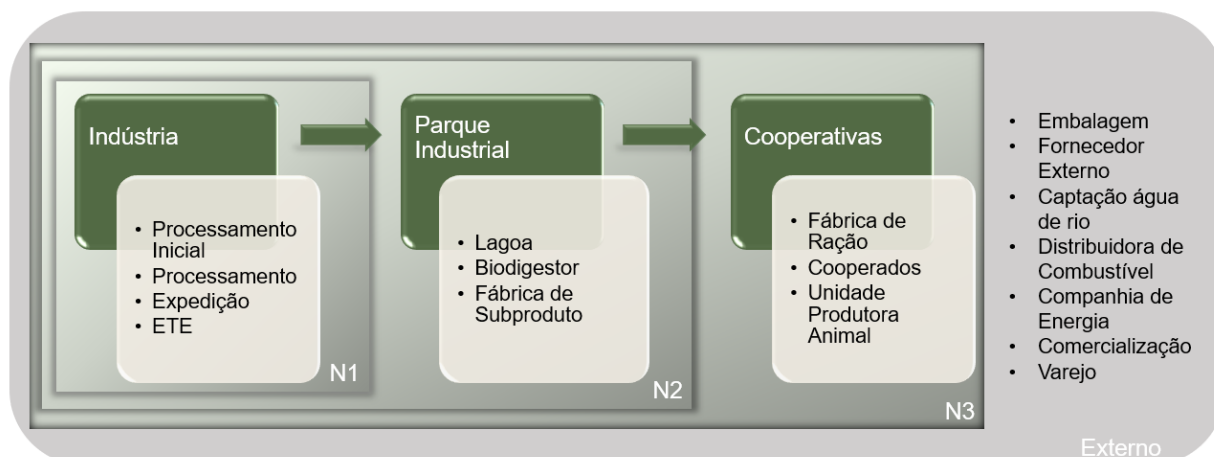
Com a identificação da circularidade dos processos e dos níveis inseridos na ACW, é possível identificar potenciais pontos de inovação e desenvolvimento de novos negócios com objetivo de ampliar a circularidade e agregar mais valor ambiental, social e econômico nos escopos definidos pelo projeto.

2.3.2 Critérios para Definição e Escopo dos Níveis

Para uma melhor compreensão desta análise alguns critérios foram adotados a fim de delimitar o escopo dos níveis, bem como, os fluxos de entrada e saída dos processos.

Uma composição dos níveis proposta por Oliveira, Dantas e Soares (2021) envolve esferas micro (fluxos de materiais e energia presentes dentro e nos limites da Indústria), meso (fluxos de materiais e energia da Indústria e Parque Industrial) e macro (fluxos de materiais e energia da Indústria, Parque Industrial e Cooperados). Na Figura 6, são apresentados os processos que constituem cada nível e a ligação entre eles.

Figura 6 - Composição dos Níveis e Processos



Fonte: Autoria Própria (2022)

O nível da Indústria (N1) é composto por processamento inicial, embalagem, processamento, expedição e estação de tratamento de esgoto (ETE). Para a avaliação do nível do Parque Industrial (N2) considera-se além dos processos deste nível (lagoa, biodigestor e Fábrica de Subproduto) os processos do nível N1. Já para a avaliação do nível das Cooperativas (N3) são considerados todos os processos do N1 e N2 acrescentado a Fábrica de Ração, Cooperados e Unidade Produtora Animal.

Os processos foram nomeados de acordo com as atividades da indústria e a coleta de dados. O “Processamento Inicial”, caracteriza a atividade que recebe a matéria prima, vinda dos criadores no campo, passa pelo abatedouro e posteriormente são separadas as peças e destinadas a setores específicos para serem preparadas, processadas e/ou condimentadas. Nesse processo foi realizado alocação por massa por base no rateio dos valores contabilizados de entrada e saída para todos os materiais e energia.

O “Processamento”, recebe o produto beneficiado, processa, embala e envia, agora o “Produto 2F” (Produto Final), para a “Expedição”. No processo de “Expedição” recebe-se tanto o Produto 2F (embalagem primária com 2,5kg) quanto o Produto Embalagem secundária (preparado em outro setor, com 15kg).

A estação de tratamento de esgoto (ETE) está alocada próxima da indústria e recebe todo resíduo descartado. Tomando como base o estudo de Kuns, Steinmetz e Do Amaral (2022), 20% do lodo retirado da ETE é destinado ao biodigestor. Do digestato, proveniente do biodigestor, foi considerado que 12% é encaminhado como biofertilizante para aplicação no N3 e 88% vai para a lagoa de estabilização (aberta).

Ainda como saída do biodigestor, temos o biogás que através de sua combustão em um motor gerador, gera energia elétrica que retorna para auto consumo na Indústria.

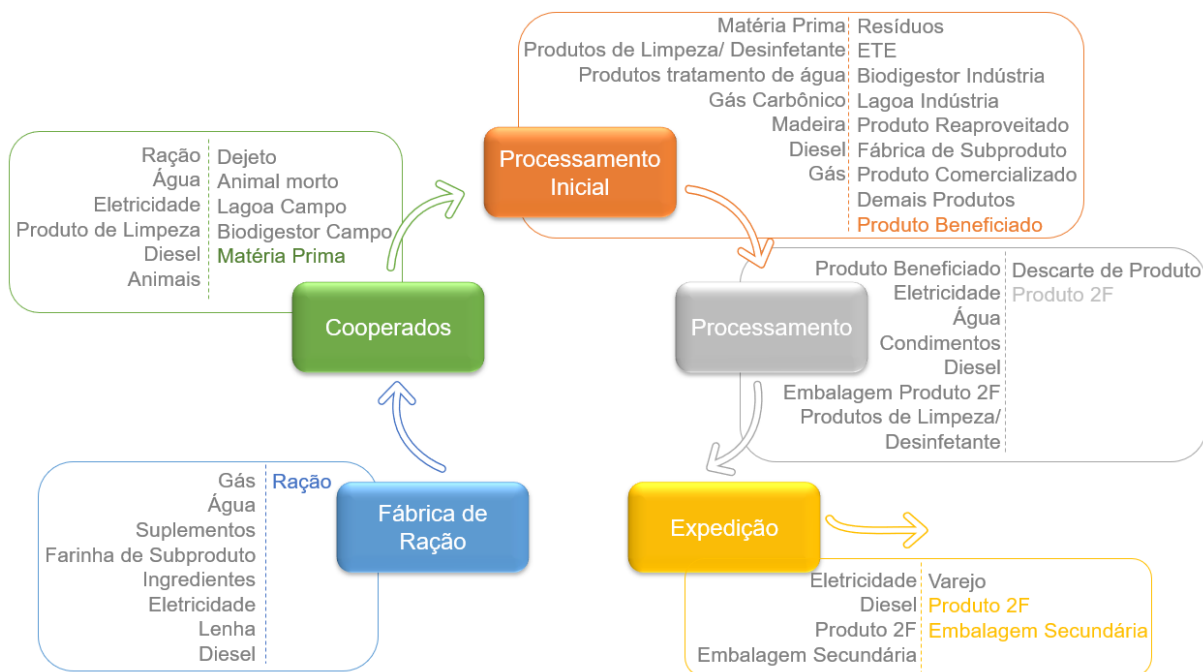
A “Fábrica de Subproduto” pertence ao N2 e recebe materiais do Processamento Inicial e Processamento. A “Fábrica de Ração” é integrante do N3 e responsável pela produção e distribuição da ração para os campos. São 3 fábricas, cada uma delas fornece, respectivamente, aos cooperados vinculados a cooperativa a qual pertence, sendo agrupados em Campos (Fábrica de Ração 1 – Campo 1, Fábrica de Ração 2 – Campo 2, Fábrica de Ração 3 – Campo 3). O Campo 4, é constituído por produtores não cooperados, porém recebe uma porcentagem de ração das três fábricas cooperadas e também ração de fábrica externa (fornecedor externo). Os valores utilizados na planilha para ração no Campo 4 foram resultantes de uma média do valor total fornecido.

Os “Cooperados” são todos fornecedores de matéria prima, agrupados por cooperativas e características de produção, nomeados como Campo 1,2,3 e 4. E por fim, a “Unidade Produtora Animal”, unidade que engloba o setor de reprodução animal.

Alguns processos foram inseridos e classificados como “Externo” por terem origem externa e fornecerem produtos ou materiais prontos aos demais processos, como o que acontece com embalagem (caixa, etiquetas, filmes, fita), fornecedor externo (fornecedor de: condimentos, produtos de limpeza e desinfetante, produtos tratamento de água, gás carbônico, suplemento ração, ingredientes ração), captação água de rio, distribuidora de combustível, companhia de energia, comercialização e varejo.

Na Figura 7, são apresentados os principais processos com suas respectivas entradas e saídas de fluxos de materiais e energia. Em cada processo, um quadro exibe à esquerda a entrada dos fluxos e à direita a saída. Esses fluxos também podem ser vistos com mais detalhes nas tabelas do Apêndice A (Composição Final dos Resultados da Coleta de Dados, p.89).

Figura 7 – Principais Fluxos com entradas e saídas

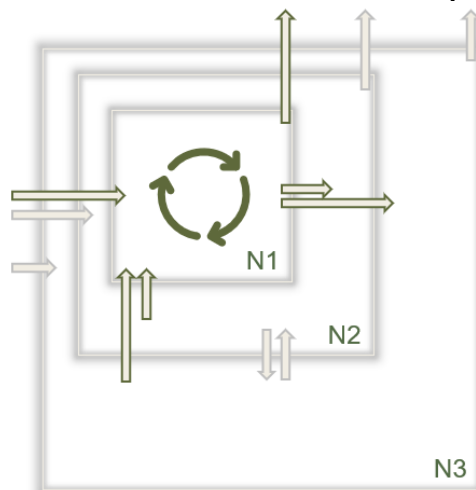


Fonte: Aatoria Própria (2022)

Segundo os relatórios analisados (seção 2.2.3 Coleta de Dados da Indústria), o diesel utilizado na indústria tem origem externa, sendo considerado como Distribuidora de Combustível. A água consumida na Indústria no “processamento” do produto, 90% é de captação superficial de rio e 10% é de captação de águas pluviais.

Os fluxos de entrada e saída dos processos que foram considerados estabelecem relação direta com a Indústria, sendo desconsiderados os fluxos de outro nível que não tenha essa ligação. A Figura 8, exemplifica essa análise.

Figura 8 - Análise dos fluxos dos níveis e processos



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Observa-se que as setas em destaque representam os fluxos que foram considerados na avaliação do nível N1. Esses fluxos são de materiais ou energia que entram e saem dos processos que compõem a análise de circularidade do produto neste nível. As demais setas correspondem aos fluxos dos níveis N2 e N3, em que na análise do N1 não são considerados por não terem ligação direta com a Indústria.

Por se tratar da avaliação de circularidade de um produto específico não foram considerados fluxos de material que outros processos envolvem e que não estão diretamente relacionados com o processo de manufatura do produto, sendo: Fábrica de Subproduto (N2), Fábrica de Ração (N3), Cooperados (N3) e Unidade Produtora Animal (N3).

Para alcançar o resultado e identificar oportunidade de ampliar a circularidade do produto nos três níveis foi adotada a alocação de massa no processamento inicial (N1) com base no rateio dos valores contabilizados de entrada e saída dos fluxos referentes à unidade funcional de 1 tonelada por ano (1ton/ano).

2.4 Fase 4: Apreciação dos Resultados de Circularidade

Como resultado principal da aplicação dos dados na ferramenta é obtido um gráfico circular que permite a visualização de diversas informações interconectadas, os fluxos de entrada e saída de informações quantitativas. Também são apresentados os valores percentuais de circularidade em diferentes níveis.

A avaliação de circularidade do produto foi realizada em termos de matéria e energia elétrica. Incorporado a esses termos estão os níveis que foram avaliados: Indústria (N1), Parque Industrial (N2), e Cooperativas (N3). Em cada nível serão apresentados pontos positivos, negativos e potenciais.

Para obter os gráficos suficientes para a comparação e identificação de oportunidades de circularidade com a implementação do biodigestor foi aplicado a ferramenta ACW.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentadas as abordagens a respeito das áreas de pesquisa deste estudo. Os tópicos discutidos envolvem economia circular e as ferramentas metodológicas para a mensuração de circularidade; metabolismo territorial; bioenergia aplicada no contexto industrial e, por fim, circularidade, bioenergia e metabolismo territorial.

3.1 Economia Circular

Os efeitos da degradação dos sistemas biofísicos, quantificados em termos de esgotamento de recursos, poluição e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), impactam negativamente o meio ambiente, ao mesmo tempo que limitam o desenvolvimento dentro das dimensões sociais e econômicas da sustentabilidade (PRIYADARSHINI; ABHILASH, 2020). Neste sentido, diversos órgãos governamentais globais, internacionais e regionais visam adotar modelos e abordagens de EC dedicadas ao desenvolvimento sustentável (WYSOKIŃSKA, 2020).

A adoção dos princípios da EC é uma das estratégias para uma transição de economia menos poluente e de baixo carbono (MORSELETTO, 2020), voltada para a proteção do meio ambiente (MOLINA-MORENO *et al.*, 2017) resultando em um processo harmônico de circulação de materiais (JUN, XIANG, 2011; FORTUNATI, MOREA, MOSCONI, 2020).

A noção da EC, segundo Hass *et al.* (2015), parte da constituição de fluxos de materiais sejam eles biológicos, que após o descarte estão disponíveis para ciclos ecológicos, ou de materiais projetados para circular dentro de sistemas socioeconômicos com reaproveitamento e reciclagem técnica como estratégia chave. Nesse sentido, a EC abre caminhos para um metabolismo industrial mais sustentável e promissora para atender aos desafios ambientais e econômicos, como também, definir metas de recursos de uso sustentável (EMF, 2013).

A fim de reproduzir o metabolismo natural, as práticas de EC vem sendo aplicadas no metabolismo industrial, urbano e territorial a partir de analogias com ecossistemas naturais, possibilitando novos arranjos para os fluxos de energia e materiais (HAAS *et al.*, 2015). Esses novos arranjos permitem novas atividades

comerciais, gerando benefícios econômicos e ainda, reduzindo a degradação ambiental.

O conceito de EC está intimamente relacionado à ideia de economia verde, como também inspirado em sistemas ecológicos (EMF, 2013). Ao adotar padrões de produção baseados em projetos de sistemas de circuito fechado (RODIAS *et al.*, 2021), a EC pode ser definida como um modelo econômico voltado para o uso eficiente de recursos por meio da minimização de resíduos (BARROS *et al.*, 2020), retenção de valor a longo prazo, redução de recursos primários (BALAMAN *et al.*, 2018), peças de produtos e materiais dentro dos limites de proteção ambiental e benefícios socioeconômicos (MORSELETTO, 2020).

Enquanto o conceito da EC é relativamente novo, Hens *et al.* (2018), datam a teoria ao final dos anos 1970, e desde então, moldado por uma série de linhas de pensamento (MORSELETTO, 2020), como o design regenerativo, *cradle to cradle*, ecologia industrial e a simbiose industrial em que essencialmente visam a circulação de cadeias de valor lineares.

Para Molina-Moreno *et al.* (2017) a EC vai além da abordagem convencional de “reduzir, reutilizar e reciclar”, também inclui o reaproveitamento e o repensar de materiais, reparo, reforma e manutenção de produtos a serem reciclados nas cadeias de abastecimento (PRIYADARSHINI; ABHILASH, 2020),

De forma abrangente, a EC simula os sistemas naturais pois pode ser concebido como um sistema, processo ou abordagem operando na indústria, parque ecoindustrial ou nível regional (PRIYADARSHINI; ABHILASH, 2020). Esta simulação é apresentada essencialmente em termos de regeneração por meio de reciclagem, *loop* fechado de fluxos de materiais (HASS *et al.*, 2015), redução e eliminação de resíduos, garantindo assim um avanço no desenvolvimento sustentável e bem-estar humano (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2015).

Complementarmente, Moraga *et al.* (2019), destacam estratégias de EC para preservar produtos, suas partes (módulos e componentes) ou materiais (e substâncias) presentes em cada produto. Além disso, as estratégias podem preservar a energia incorporada em recursos que não podem ser preservados por outras estratégias (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Essas estratégias são capazes de promover modelos de negócios inovadores, com multifuncionalidade, redundância e intensificação do uso de produtos evitando o consumo de novos produtos ou criando padrões de consumo (MORAGA *et al.*, 2019).

No mundo dos negócios, a temática ganhou repercussão mundial após o lançamento do relatório “*Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*”, em 2014, no Fórum Econômico Mundial, elaborado em colaboração com a Fundação Ellen MacArthur (CNI, 2018). Desde então, a EC vem recebendo mais atenção em relação à sua implementação nos setores agrícola, urbano e industrial em direção a inovação nos modelos de negócios para otimizar o uso de recursos, desempenho nos processos e políticas de desenvolvimento (SANGATA *et al.*, 2020).

Sob uma perspectiva global, todas as organizações mundiais, internacionais e regionais, entre elas OMC (Organização Mundial do Comércio), Nações Unidas (ONU), órgãos como UNEP (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), UNCTAD (Conferência das Nações para o Comércio e Desenvolvimento), ou UNIDO (Organizações de Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas) e a FAO (Organização para a Alimentação e Agricultura), objetivam a implementação da EC como forma estratégica para alcançar o desenvolvimento sustentável, bem como a proteção e preservação do meio ambiente (WYSOKIŃSKA, 2020).

Entre os agrupamentos regionais internacionais, a União Europeia desempenha um papel extremamente ativo na implementação da EC (HAAS *et al.*, 2015). Em março de 2019, a Comissão Europeia adotou o Plano de Ação da Economia Circular, apresentando as principais realizações e desafios para moldar a economia e preparar o caminho para uma EC neutra para o clima, eficiente em termos de recursos e competitiva, ao mesmo tempo que reduz o uso de energia e matérias primas (HOLZER *et al.*, 2021).

Ainda na Europa, estimativas apontam que as práticas associadas à EC podem trazer redução de custos de mobilidade entre 60 e 80%, e no setor de alimentos gerar economia de 25 a 50% (EMF, 2017). Os potenciais benefícios da EC poderão gerar na Europa 320 bilhões de euros por ano até 2025, enquanto na Índia, esse potencial pode alcançar 624 bilhões de dólares por ano até 2050.

Um destaque entre as organizações mundiais é a Fundação Ellen MacArthur, estabelecida em 2010 e atualmente, responsável pela disseminação e aceleração da EC em todo o mundo. Essa mesma fundação, instaurou ainda, o programa de inovação *Circular Economy 100* (CE 100), no qual possibilita que organizações criem novas oportunidades e realizem suas ambições na EC mais rapidamente (EMF, 2017). Uma contribuição para o ano de 2017 foi a Norma BSI 8001, desenvolvida

exclusivamente para que as empresas adotem práticas de EC, podendo aplicá-las em operações, produtos e novos modelos de negócios ao redor do mundo.

O precursor no estabelecimento da EC foi a Alemanha, no ano de 1996 (SHENEM; PEREIRA, 2019), mediante a aprovação de uma lei de gestão das substâncias tóxicas e resíduos em ciclo fechado. Em seguida, O Japão promulgou um projeto piloto em 2000.

O primeiro país a implementar os princípios da EC na política nacional foi a China por meio da Lei de Promoção da Economia Circular de 2008 (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). Comparada com a China, a Europa ainda necessita de um sistema unificado de indicadores, visto que na China, a EC se tornou uma estratégia central para o desenvolvimento nacional com um sistema de indicadores de avaliação dos níveis de parque nacional e industrial, existente desde 2007 (AVDIUSHCHENKO; ZAJAČ, 2019).

No Brasil, várias oportunidades voltadas para a EC são identificadas na indústria, entre elas pode-se citar os potenciais setores: eletroeletrônico, com a recuperação de materiais e novos serviços; construção civil, através da redução de resíduos gerados; têxteis, com novos materiais e cadeias circulares de valor; e, plástico, com a redução e recuperação, além de novos materiais (EMF, 2017; CNI, 2018). Essas oportunidades de impulsionar a economia e agregar valor aos produtos tem um grande potencial de desenvolvimento para o país, no qual evidencia-se por dispor de uma das condições-chave para a EC: o potencial de geração de energia renovável (solar, eólica, biomassa de 1ª, 2ª e 3ª geração, marés, entre outras) (CNI, 2018).

Para a Fundação Ellen MacArthur (2017), vários modelos bem-sucedidos estão surgindo no Brasil a partir de novas formas de colaboração entre grandes empresas, startups, governos municipais, e na academia, sendo responsáveis pela oferta de capacidade, infraestrutura e grandes fluxos de materiais.

A transição para a EC no Brasil, pode ainda gerar oportunidades de maior inovação e criação de valor, visto que, o país possui características mercadológicas e sociais únicas e um capital natural incomparável, atraente para exploração de oportunidades que a EC pode trazer na construção do capital econômico, social e natural (EMF, 2017).

Porém, ainda é necessário um maior incentivo de políticas públicas alinhadas a essa visão e mecanismos de financiamento que apoiem soluções circulares. Além

do mais, as empresas já entenderam que para prosperar, a longo prazo, é inevitável a transição para uma economia circular.

3.1.1 Ferramentas Metodológicas para a Mensuração de Circularidade

Na atual transição de modelos lineares para circulares, o desenvolvimento de estratégias que abordem efetivamente a mensuração dos resultados vem ganhando destaque na literatura (SAIDANI *et al.*, 2019; KRAVCHENKO, MCALOONE, PIGOSSO, 2020), enfatizando a necessidade de aplicação de ferramentas metodológicas ou indicadores abrangentes em diversos níveis capazes de mensurar a circularidade de forma ampla (OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021).

Kravchenko, Mcaloone e Pigozzo (2020), descrevem a circularidade pelo número de vezes que um recurso é usado em um sistema de produto, e longevidade, o tempo de uso de um recurso, como indicadores de eficiência de recursos na EC. Quanto maior for esse número, maior será a sua contribuição. Mas ainda existem outros aspectos importantes, como perdas e ganhos sociais ao meio ambiente, que poderiam ser incluídos no âmbito da EC (ROSSI *et al.*, 2020), dessa forma, poderia ser experimentado um ecossistema funcionando e compartilhando valores para todas as partes interessadas.

Complementarmente, Oliveira, Dantas e Soares (2021) definem circularidade como o alinhamento de materiais ou energia, fluxo, produto, processos ou sistema para um conjunto de estratégias que apontem aos objetivos gerais da EC, contando com redesenho, desmontagem do produto, reciclagem e uso de energia renovável. A seleção de unidades que permitem a integração desses diferentes aspectos da circularidade em um único valor é um dos principais desafios para a avaliação da circularidade (STANCHEV *et al.*, 2020).

Uma vez que o princípio central da EC é percebido com a redução dos impactos ambientais, surge a necessidade em compreender totalmente as implicações da EC em diferentes níveis do sistema (LINDER *et al.*, 2017; SAIDANI *et al.*, 2019). Isso inclui impactos de serviços e produtos circulares, bem como seus potenciais efeitos macro, como os efeitos de recuperação, em que o aumento da eficiência no nível do produto leva a um maior impacto no nível macro (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). Várias metodologias de avaliação ambiental estão

disponíveis para a aplicação em diferentes níveis do sistema, porém, não está claro quais são as melhores e qual forma complementar pode ser utilizada, isso porque, a seleção de um método de avaliação depende de quais são os objetivos do estudo (LINDER *et al.*, 2017).

Na literatura, a circularidade pode ser analisada em três níveis espaciais (macro, meso e micro), aplicando diferentes técnicas e métodos (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007; LINDER *et al.*, 2017; VERGER *et al.*, 2018). Os indicadores de nível macro determinam o impacto sociometabólico de uma EC e são mais desenvolvidos que os indicadores de nível micro (LINDER *et al.*, 2017). Além de auxiliar na avaliação, monitoramento e melhorias políticas, os indicadores de circularidade, bem como as ferramentas, têm recebido investimentos da Comissão Europeia, Japão e China, adotando a abordagem da Análise de Fluxo de Materiais (AFM).

Como exemplo de indicador de circularidade a nível macro, Hass *et al.* (2015), desenvolveram um indicador baseado na AFM e o aplicaram à economia europeia. Como resultado, identificaram um baixo grau de circularidade em virtude dos materiais processados serem utilizados para fornecer energia.

A nível meso, a AFM também pode ser aplicada para avaliar a simbiose industrial, como em indústrias de silvicultura (KARLSSON; WOLF, 2008), indústria agroalimentar (PAGOTTO; HALOG, 2015) e vários parques industriais da China (GENG *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2016). Estas avaliações demonstraram os benefícios econômicos gerados, como baixos custos financeiros e estabilidade dos sistemas.

Na tentativa de lançar um padrão para o nível micro, a *British Standards Institution* (BSI), denominou a BS 8001:2017 contendo definições, princípios e um painel de indicadores como guia de gerenciamento para a implementação da EC nas organizações (LINDER *et al.*, 2017). Porém, esse padrão passou por vários questionamentos por não determinar a obrigatoriedade a um requisito, não dispendo de alguma forma de certificação (PAULIUK, 2018).

Em 2015, em parceria com a *Granta Design*, a Fundação Ellen MacArthur desenvolveu o “Projeto de Indicadores de Circularidade” fornecendo às empresas uma metodologia e ferramentas web, como o *Material Circularity Indicator* (MCI), ferramenta de modelagem dinâmica em nível de produto e agregada ao nível da empresa (EMF 2015). Essa metodologia permite aos usuários avaliarem uma série de riscos ambientais, regulamentares e de cadeia de suprimentos para seus projetos e

produtos. Segundo Rocchi *et al.* (2021), o MCI pode ser considerada complementar à ACV por ser mais focada no fluxo de materiais, porém, é projetada para ciclos técnicos e materiais de fontes não renováveis.

Ainda em 2015, Di Maio e Rem, desenvolveram o *Circular Economy Index* (CEI), capaz de medir a circularidade através da razão do valor econômico recirculado dos componentes da *EoL (End-of-Life)* sobre o valor total do produto (PAULIUK, 2018). Neste caso, Linder *et al.* (2017), apontam que ao focar na eficiência do processo de reciclagem, outras formas de recuperação de materiais são excluídas, prejudicando a métrica de circularidade do produto.

Outra ferramenta lançada pela Fundação Ellen MacArthur é a *Circulytics 2.0* (2020). Os indicadores *Circulytics* foram desenvolvidos em colaboração com 13 parceiros estratégicos e empresas associadas à fundação. Essa ferramenta apoia a transição de uma empresa para a economia circular, independente do setor, complexidade e tamanho, revelando após a medição até que ponto a empresa atingiu a circularidade em suas operações. Os dados para avaliação são fornecidos em uma plataforma online, mediante cadastro gratuito, para as perguntas do indicador predefinido. Cada empresa é avaliada aplicando 18 indicadores fixos e dependendo da indústria e tipo de negócio. A pontuação é dividida em 11 temas, sendo 5 facilitadores baseados na transformação da empresa (estratégia e planejamento; pessoas e habilidades; inovação; operações; e, engajamento externo) e 6 para resultados que abrangem holisticamente os resultados da economia circular a nível empresa (produtos e materiais; serviços; ativos – propriedade, plantar, equipamentos; água; energia; e, finanças). No entanto, uma desvantagem citada pela própria fundação, é que embora os únicos campos obrigatórios sejam os incluídos em “Informações Gerais”, os campos posteriormente respondidos nas seções seguintes não contribuirão positivamente para a pontuação geral da empresa.

Uma ferramenta apresentada em 2021 é a *AgroCircle Wins* (ACW), disponibilizada de modo online e gratuita (AGROCIRCLEWINS, 2021). Essa ferramenta foi desenvolvida por uma equipe de pesquisadores do Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos (LESP), do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa (BARROS, 2019).

A ferramenta ACW apresenta, através de um gráfico circular, os fluxos internos e externos (de material, energia e financeiro) com os percentuais de

circularidade em cada categoria. Esse percentual varia de 0 a 100%, demonstrando quão circular é a organização ou o processo analisado. Para chegar ao resultado, o usuário deve preencher uma sequência de dados, passando por processos, atividades, níveis e interpretação do relatório. Para utilizar a ACW é importante obter as características mínimas do local de aplicação da ferramenta, como: possuir processos que contenham fluxos quantitativos de entrada e saída de material, energia e financeiro. O objetivo dessa ferramenta é possibilitar ao usuário tomar decisão em termos de internalizar os fluxos do sistema, tendo o potencial de agregação de valor no negócio, e também atuar com práticas direcionadas à EC. Assim como todas as ferramentas apresentadas possuem uma desvantagem, na ACW, uma possível desvantagem, estaria voltada à disponibilidade de análise quantitativa, não oferecendo uma análise qualitativa.

De modo geral, todas as ferramentas apresentam resultados quantitativos e cada ferramenta funciona melhor em uma determinada situação ou um tipo específico de produto. As ferramentas MCI e CEI, são voltadas para a avaliação de produtos e componentes, enquanto a *Circulytics 2.0* e ACW avaliam a nível de organização. As ferramentas e indicadores, ou mesmo, a combinação de vários, são essenciais para avaliar o desempenho de um país, organizações ou produtos em relação aos princípios da EC.

Cada ferramenta apresenta potencialidades, bem como, limitações quanto à aplicação e construção. Porém, fornecem uma visão rápida do produto ou da organização em termos de EC. Na Figura 9, é apresentado um comparativo das ferramentas mencionadas com uma breve descrição. A finalidade desta figura é auxiliar na escolha da ferramenta para a aplicação do estudo de caso.

Figura 9 - Comparativo das Ferramentas

FERRAMENTA	DESCRIÇÃO	FORMATO	INPUTS	OUTPUTS	VANTAGEM	DESvantAGEM
<i>Material Circularity Indicator (MCI)</i>	Ajuda as empresas a medir sua transição para uma EC	Planilha de Cálculo	Diferentes porcentagens sobre origem do material e destino	Quantitativo: Pontuação única, valor entre 0 e 1 onde valores mais altos indicam uma circularidade superior	Facilidade de acesso e uso do indicador. Rápido e aplicação prática	Restringe CE em apenas algumas práticas como a reutilização e reciclagem. Dificuldade em obter de entrada dados
<i>Circular Economy Index (CEI)</i>	Avalia as taxas de reciclagem, excluindo todos os outros efeitos e ciclos da EC	Equação Matemática	Informações detalhadas dos valores dos componentes e materiais em cada produto	Quantitativo (% , razão de valor econômico)	Possibilidade de avaliar a reciclagem ligada à economia	Restrição ao âmbito da reciclagem, além da dificuldade de aplicação por causa do ausência de um modelo
<i>Circulytics 2.0</i>	Apoia a transição das empresas para uma economia circular	Questionário Online	Até 18 indicadores divididos em 11 temas e 2 categorias	Quantitativo: Oportunidades para eliminar resíduos, manter materiais e produtos em uso e gerar benefícios ambientais	Destaca oportunidades de inovação e permite que as empresas monitorem o seu progresso	Os campos obrigatórios são incluídos nas informações gerais e não contribui positivamente para a pontuação geral nas seções seguintes
<i>AgroCircle Wins (ACW)</i>	Auxilia a tomada de decisão em termos de internalizar os fluxos do sistema, tendo o potencial de agregação de valor no negócio	Webpage Dinâmica	Preenchimento de processos, atividades, níveis e interpretação do relatório	Quantitativo: Gráfico circular, com os fluxos internos e externos com os percentuais de circularidade em cada nível	Possibilidade de identificar potenciais pontos de inovação e desenvolver novos negócios, ampliar a circularidade e agregar mais valor ambiental, social e econômico	Não possibilita o cálculo em termos de emissões.

Fonte: Autoria Própria (2022)

Por se tratar de uma avaliação que envolve o uso de biodigestor para a avaliação da circularidade, a sequência dos processos e a quantidade ilimitada de dados que podem ser inseridos, a ferramenta ACW é a mais compatível com o escopo do trabalho. Um outro benefício da ferramenta é poder configurar 3 níveis diferentes para a avaliação e, ainda dentro desses níveis, obter a circularidade através de gráficos visuais e porcentagens em matéria, energia e financeiro. Além de ser uma ferramenta pioneira na identificação de oportunidades para internalizar fluxos externos de materiais e energia utilizando conceitos de economia circular a ACW é versátil e pode ser implementada em qualquer ambiente industrial.

3.2 Metabolismo Territorial

O termo metabolismo territorial surgiu em 1965 por Abel Wolman como premissa em examinar entradas e saídas, de abastecimento de água adequado, descarte eficaz de esgoto e controle da poluição do ar, como parte do funcionamento socioeconômico de uma cidade hipotética nos Estados Unidos (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007). Posteriormente, o termo foi aplicado na ecologia industrial, sistemas urbanos e territoriais com a finalidade de equilibrar os fluxos fundamentais de água, energia, materiais e nutrientes (CURRIE, MUSANGO, MAY, 2017; FONTANA, BOAS, 2019).

Já o termo territorial envolve as atividades humanas em uma área delimitada e um aspecto muito especial é atribuído às atividades criadoras de riquezas, ou seja, organizadas pela população com objetivo principal da geração de renda, em particular à produção de bens e serviços (BUCLET; DONSIMONI, 2020). Essas atividades podem ser destinadas ao consumo direto ou mesmo, à coleta de renda em forma monetária e, em seguida, é empregado para adquirir bens e serviços produzidos em outra localidade, e para investir e aumentar o potencial de criação de riqueza controlada pela população. Em um nível local, essas atividades coexistem, por vezes se cruzam e impulsiona dinâmicas conjuntas que formam um território, nomeadamente através de atores que as empregam e que frequentemente envolvem várias atividades (NOË *et al.*, 2016).

A junção dos termos, tornando-se metabolismo territorial é considerado por Buclet e Donsimoni (2020) como um conjunto de subsistemas geradores de riqueza com atividades estruturantes do território à medida em que envolvem fluxos de materiais, imateriais e financeiros significativos para a região. Iablonski e Bognon (2019), complementam que o metabolismo territorial pode ser qualificado como sustentável se os fluxos de matéria e energia mobilizados não ultrapassarem a capacidade de regeneração pelo meio ambiente. Ou seja, o consumo pelo território deve ser inferior ou igual ao que o ambiente natural pode proporcionar, e os resíduos não devem ser uma ameaça à capacidade desse meio ambiente em fornecer recursos à população humana, como também, a outros seres vivos (IABLONOVSKI; BOGNON, 2019).

Barles (2014), destaca que cada território possui seu próprio metabolismo sendo constituído por características sociais e naturais. O metabolismo territorial ainda

leva em consideração a retenção de materiais, como estoque no ambiente construído, e o comércio de materiais entre fronteiras, quantificando e qualificando todos os fluxos que abastecem ou afetam esse território e suas atividades (ALLAIS; GOBERT, 2019).

Como resultados dos inventários desses metabolismos territoriais estão a extração local, importação e exportação (biomassa, minerais, combustíveis fósseis, etc.) e saídas para a natureza (emissões para o ar, água, solo) (BARLES, 2014) sendo usado para identificar dependências e riscos para a resiliência territorial e sustentabilidade (como por exemplo, a competição por terras e recursos num determinado espaço, aumentando o consumo de certos materiais) (ALLAIS; GOBERT, 2019).

Os estudos do metabolismo territorial fazem parte da biologia, ecologia industrial, ecologia social, e, mais recentemente, da ecologia territorial, se tornando interdisciplinar à medida que diversas disciplinas foram se apropriando do termo para analisar as interações entre a sociedade humana e a natureza (VERGER *et al.*, 2018; BUCLET, DONSIMONI, 2020). Embora haja uma contradição na aplicação do conceito às sociedades humanas, desde as fundações da teoria social, identificam-se pesquisas em que o usam como referência para análise das relações entre organização social, produção e exploração de recursos naturais (BUCLET; DONSIMONI, 2020).

Dentre os estudos da ecologia, a territorial visa caracterizar o metabolismo em uma base local, com a finalidade de compreender adequadamente as formas como a sociedade e a natureza se integram (VERGER *et al.*, 2018). Este estudo pode servir para aprimorar a governança dos fluxos de materiais, sob uma perspectiva de economia circular, como alternativa sustentável ao metabolismo linear caracterizada pela situação atual (ALLAIS; GOBERT, 2019). As ecologias industrial e territorial apoiam o metabolismo territorial através de estratégias de planejamento regional que propõe uma busca sistemática de simbiose física ou organizacional em uma escala local, implementando métodos de contabilidade física e pesquisa social (ALLAIS, REYES, ROUCOULES, 2015; VERGER *et al.*, 2018). Esses estudos fornecem soluções inovadoras que auxiliam os gestores a reduzir custos, agregar valor aos produtos, ao mesmo tempo em que unem o desenvolvimento econômico territorial e as restrições ambientais, por meio de estratégias que visam facilitar o intercâmbio de recursos tangíveis e intangíveis entre os atores de uma rede local, a fim de criar valor para as empresas e para o território (ALLAIS; REYES; ROUCOULES, 2015).

O estudo do metabolismo territorial vem ganhando maior importância nos últimos anos por meio análise dos fluxos de materiais - AFM (VERGER *et al.*, 2018). Essa análise trata de uma avaliação sistemática dos fluxos e estoques de materiais (bens e substâncias) dentro de um sistema definido no espaço e tempo, conectando fontes, caminhos, sumidouros intermediários e finais de um material (ALLAIS; GOBERT, 2019). Esta ferramenta é a mais citada entre os autores para contribuir com a análise do metabolismo territorial (KENNEDY, CUDDIHY, ENGEL-YAN, 2007; ALLAIS; REYES; ROUCOULES, 2015; SWILLING *et al.*, 2018; VERGER *et al.*, 2018; ALLAIS, GOBERT, 2019; BUCLET, DONSIMONI, 2020).

As AFM realizadas nos metabolismos territoriais são relevantes para o entendimento dos elos que os constituem, resultando também numa lógica organizacional para fazer o melhor uso dos recursos comuns e gerar de forma sustentável riqueza mercantil, monetária, know-how, patrimonial e capacidade de especificação de um território (BUCLET; DONSIMONI, 2020). Em alguns países, essa análise tem sido aplicada por diversas disciplinas para o entendimento de sistemas a nível regional, nacional e global, ou em específicas áreas e atividades como parques industriais (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007; VERGER *et al.*, 2018).

Outro método de avaliação ambiental que também pode ser aplicado combinado ao metabolismo territorial é a avaliação do ciclo de vida – ACV (VEGA *et al.*, 2019). Esse método, segundo Sohn, Vega e Birkved (2018), cria a oportunidade para avaliação direta de impactos ambientais incorporando a dinâmica do sistema e o uso de análise multicritério. Por se tratar de uma modelagem de impacto ambiental baseada em processos de escala regional, o método combinado metabolismo territorial – ACV, parte do conceito de território de produção para avaliar as mudanças dos sistemas duráveis, como infraestrutura energética e avaliação agrícola (SOHN; VEGA; BIRKVED, 2018).

As dinâmicas dos metabolismos territoriais são um tanto complexas, pois resultam em interações entre atividades internas e externas, e a partir da mobilização dos recursos é estabelecido uma dinâmica produtiva, cujos produtos e externalidades se difundem por todo território (BUCLET; DONSIMONI, 2020). Cada atividade possui uma lógica própria de funcionamento que pode interferir nas demais atividades territoriais, que muitas vezes podem ser atividades sazonais (NOË *et al.*, 2016).

O estudo e análise do metabolismo territorial podem ser um complemento na compreensão dos esforços necessários para promover uma transição real tanto para

o metabolismo circular, quanto para a economia circular. A AFM e ACV contribuem como força dominante na circulação de materiais do metabolismo territorial, orientando pelo menos em parte, os impactos ambientais das atividades dos ecossistemas.

3.3 Bioenergia Aplicada No Contexto Industrial

O fornecimento de energia limpa, acessível e segura, bem como, alcançar uma economia verdadeiramente circular e, dissociar o crescimento econômico do uso de recursos e produção de resíduos são questões centrais das metas globais para anular as emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até 2050 (ONU, 2015).

Neste contexto, os recursos de energia renováveis foram reconhecidos, no setor de energia, como soluções eficazes e eficientes para contribuir com as metas globais (UNIDO, 2018; CUSENZA *et al.*, 2021). Entre esses recursos, a bioenergia pode contribuir com um papel fundamental, uma vez que se trata de uma solução confiável e flexível para a demanda de energia (SOUZA *et al.*, 2017), e, ao mesmo tempo, apoiar, como importante pilar, a economia circular na gestão de resíduos (FRACCASCIA *et al.*, 2020; JATO-ESPINO; RUIZ-PUENTE, 2020).

A produção de bioenergia pode ser obtida pelo desacoplamento de biorresíduos, limitando a extração de recursos (MAJJED; LUNI, 2020) como também, levar essas fontes de energia a um melhor desempenho ambiental geral (SILVEIRA *et al.*, 2017; VEGA *et al.*, 2020). A bioenergia pode ser composta por uma ampla variedade de matérias-primas derivadas da agricultura, indústria de alimentos, silvicultura ou resíduos biológicos, no entanto, a silvicultura ainda é a principal fonte de biomassa na maioria dos países (MURADIN; KULCZYCKA, 2020).

A bioenergia vem sendo considerada como uma fonte de energia atraente e com baixo teor de carbono por apoiar a conversão da biomassa de maneira ambientalmente correta e com baixas emissões de CO₂ (SILVEIRA *et al.*, 2017). As formas de bioenergia incluem energia, calor, e, combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, sendo usadas em aplicações residenciais, comerciais e industriais (CLAUSER *et al.*, 2021).

As atividades industriais resultam na transformação de matérias-primas em produtos, levando conseqüentemente, à geração de resíduos ou subprodutos

potencialmente nocivos ao meio ambiente (JATO-ESPINO; RUIZ-PUENTE, 2020). A conversão desses resíduos de baixo valor em produto altamente valioso, como o que acontece com a bioenergia, é uma oportunidade particularmente interessante para o setor agroalimentar, visto que esses resíduos representam grandes preocupações entre os setores econômicos devido ao custo agregado e impactos ambientais nos processos de descarte (CUSENZA *et al.*, 2021).

A produção de bioenergia e biocombustíveis advindos da produção de biogás, proveniente da digestão anaeróbia de biorresíduos de indústrias alimentares, é uma prática amplamente reconhecida como uma opção ambiental (com a eliminação de biorresíduos), econômica (tornando a indústria mais competitiva perante economia global) e sustentável (evitando a compra de energia) (CUSENZA *et al.*; KOPPELMÄKI, HELENIUS, SCHULTE, 2021).

De acordo com o relatório de desenvolvimento industrial da United Nations Industrial Development Organization (UNIDO, 2018), as indústrias devem criar um “ciclo virtuoso de desenvolvimento industrial sustentável e inclusivo que compreende a geração de renda, diversificação da demanda e massificação do consumo”. Em outras palavras, o ciclo sustentável é um sistema em que os insumos de combustíveis fósseis são gradualmente substituídos pela energia renovável, os materiais e a energia são usados de maneira mais eficiente e os bens finais são reutilizados ou reciclados para realimentar os processos de geração de insumos (BUTTURI *et al.*, 2019).

Para Anca-Couce, Hochenauer e Scharler (2020) a bioenergia é de longe a fonte de energia renovável mais relevante perante as outras fontes. Somente a bioenergia foi responsável por 10,3% da energia em todo mundo enquanto, em conjunto com as demais fontes renováveis totalizaram 18,1% (STOLARSKI *et al.*, 2020). Neste contexto, a União Europeia ocupa a posição de liderança, representando 59% do consumo total de energia renovável, sendo a Áustria destaque com 18,4% desse percentual, sustentada principalmente pela bioenergia (ANCA-COUCÉ; HOCHENAUER; SCHARLER, 2020).

Especialmente no setor industrial, a contribuição da bioenergia como fonte de calor, corresponde cerca de 9% e está concentrada em grande maioria em subsectores como papel e celulose e outras indústrias que produzem resíduos de biomassa localmente (REN21, 2020). O consumo de energia para fins térmicos inclui vapor de

processo industrial, secagem e refrigeração, e para usos finais elétricos como operação de máquinas e iluminação (STOLARSKI *et al.*, 2020).

A indústria na União Europeia aplicou a bioenergia diretamente para o aquecimento em 2018, cerca de 86% em indústrias de papel e celulose, madeira e alimentos (ANCA-COUCÉ; HOCHENAUER; SCHARLER, 2020). Neste mesmo ano, o Brasil foi o maior usuário de biomassa para aquecimento industrial, com a utilização de resíduo da cana (bagaço) da produção de açúcar para gerar calor em sistemas de cogeração de energia (REN21, 2020). A Índia ficou em segundo lugar, também como produtor de bioenergia proveniente de açúcar para aquecimento industrial, e em terceiro lugar veio os Estados Unidos, com importante indústria de celulose e papel (NAQVI *et al.*, 2020).

O emprego de bioenergia nas indústrias compreende uma ampla gama negócios, sendo esses, envolvidos em complexas cadeias de abastecimento que transformam muitas matérias-primas de biomassa em potencial sólido, líquido e combustíveis gasosos que são empregados com a finalidade de produzir eletricidade, calor e combustíveis para o transporte (SILVA-MARTÍNEZ, 2020). Complementarmente, as empresas envolvidas nestes processos, também demonstram diferenças nas escalas e complexidade das cadeias de abastecimento e a inovação necessária para responder a novos desafios e oportunidades (REN21, 2020).

A atenção para a política de uso de energias renováveis na indústria ainda é limitada, porém, um conjunto de políticas vem sendo implementado e já apresenta respostas às mudanças tecnológicas e de mercados, bem como as necessidades e realidades em evolução de diferentes governos (SILVA-MARTÍNEZ; REN21, 2020). Como exemplos, a União Europeia anunciou o desenvolvimento de compromissos para a implementação de energia renovável na indústria, enquanto a Austrália, deu início à primeira fase para promover a adoção de energia térmica renovável, e a segunda fase foi lançada em janeiro de 2020 (REN21, 2020).

O *Renewables 2020 Global Status Report* (GSR) (REN21, 2020), indica que a inserção global de energias renováveis aumentou significativamente nos últimos anos, com novos recordes sendo definidos ano a ano, como também, o crescente número de países se comprometendo a ampliar o uso energias renováveis e habilitar novas tecnologias.

Percebe-se que em países desenvolvidos e mercados maduros, os tomadores de decisão estão adaptando a política para apoiar a integração técnica de mercado de energia renováveis, como também, apoiar a inclusão de geração distribuída em pequena escala (ANCA-COUCÉ; HOCHENAUER; SCHARLER, 2020). Já em países em desenvolvimento, com economias emergentes, Anca-Couce, Hochenauer e Scharler (2020), apontam que a política se preocupa em aumentar a capacidade de energia renovável e geração para atender a demanda básica, promover a criação de empregos e segurança energética, bem como fornecer maior acesso a serviços de energia modernos.

3.4 Circularidade, Bioenergia e Metabolismo Territorial

Conforme mencionado na seção 2.1, os artigos foram selecionados com base em uma revisão bibliográfica. A busca dos trabalhos visou acompanhar as mudanças e evoluções ao longo do tempo, discutir a literatura da temática e identificar as lacunas de pesquisa.

Este trabalho apresenta o foco nas práticas de economia circular e metabolismo territorial no contexto de bioenergia na indústria. Os estudos encontrados contemplam variações da temática em duas formas de apresentação. Diversas características são apontadas nos estudos analisados (Quadro 1, Apêndice B, pg. 97), e uma análise descritiva foi realizada com o intuito de organizar a literatura e trazer novas contribuições sobre o assunto.

A elaboração do Quadro 1 contribuiu para diferenciar as características dos estudos encontrados na literatura, facilitando a discussão, histórico e possíveis tendências da temática. As práticas da economia circular são aplicadas em diversas áreas de atuação, como biogás, setor industrial e territorial, desenvolvimento de produtos, metabolismo urbano, agricultura e diversos outros. Com relação aos tipos de estudos, foram agrupados em duas categorias distintas, sendo estudos de caso e artigos de revisão. Os estudos de caso atingiram cerca de 64% dos trabalhos encontrados enquanto os estudos de revisão 36%.

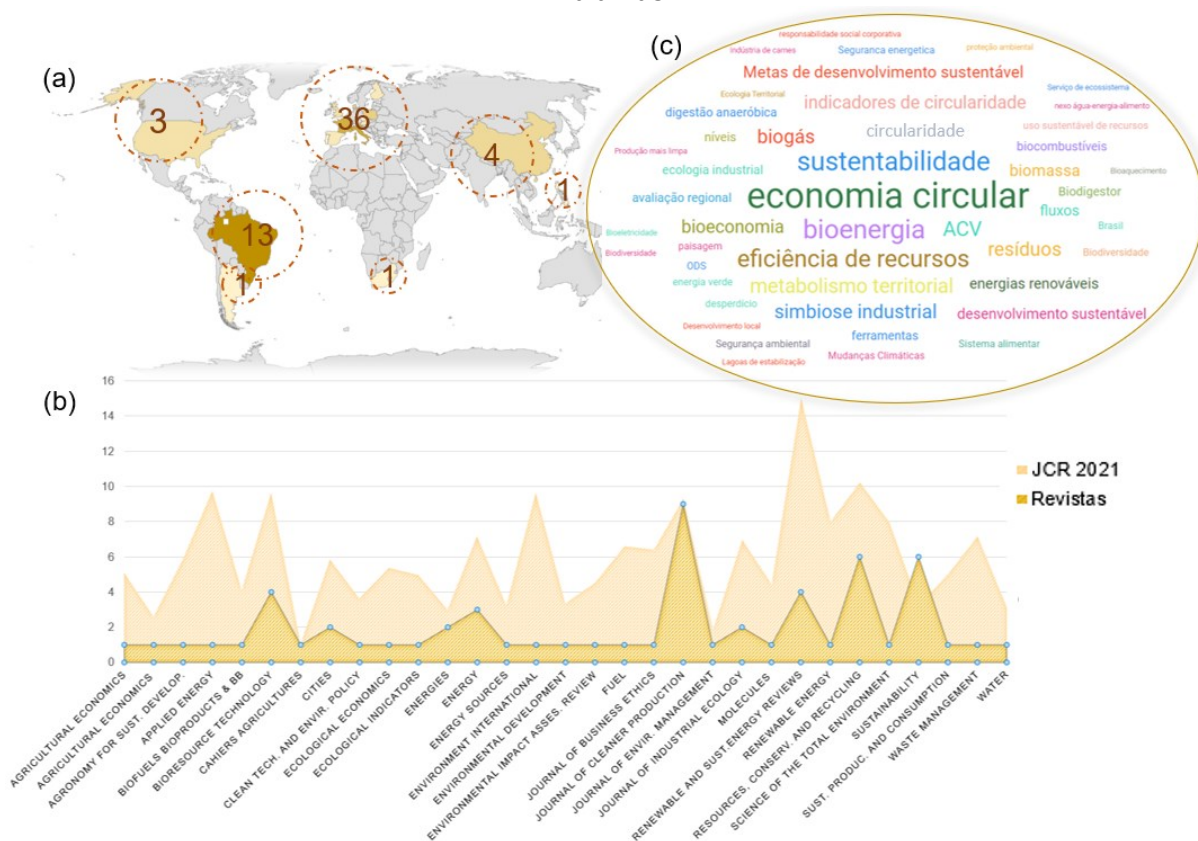
Uma das características avaliadas nos estudos encontrados foram as instituições e os países de origem. Não foi identificado um expressivo histórico ou uma tendência em termos de instituição ou universidade. Já entre os países com maior

produção dos documentos (Figura 10a), os mais assíduos são os países europeus, como Itália, Dinamarca e Polônia, sendo justificável em virtude das iniciativas de economia circular estarem presentes há mais tempo e os esforços atuais estarem concentrados nesse continente. Um país que vem ganhando destaque recentemente em publicações é o Brasil, principalmente a região Sul com a produção do biogás.

Os periódicos com maior número de publicações nesta temática são Journal of Cleaner Production, Sustainability, Resources, Conservation And Recycling, Renewable And Sustainable Energy Reviews e Energy (Figura 10b), justificando-se essa ênfase devido ao escopo desses periódicos serem adeptos ao tema de economia circular. Com relação ao aspecto editorial, a principal editora foi a Elsevier (65%) de todo portfólio final desta revisão, seguida pela MDPI (16%), Springer (6%) e Wiley (5%). Em termos de Fator de Impacto (FI) (Figura 8b), o índice parte de zero (Natures Sciences Sociétés, International Journal of Sustainable Engineering, Flux, Procedia CIRP, Resources, Cahiers Agricultures, Energy Procedia, Recycling, Comparative Economic Research) e atinge 14,982 (Renewable And Sustainable Energy Reviews).

Pode-se observar ainda na nuvem de palavras (Figura 10c), que os termos mais citados, extraídos das palavras-chaves dos documentos avaliados, estão diretamente ligados ao tema principal, economia circular. Esses termos envolvem variados estudos como desenvolvimento urbano, industrial e territorial, energia renovável e biocombustíveis a partir do biogás, segurança alimentar, mudanças climáticas, entre outros.

Figura 10 - (a) Publicação por países; (b) Publicação por revistas e FI (JCR 2021); (c) Nuvem de Palavras



Fonte: Autoria Própria (2022)

Identifica-se diversos autores que elaboraram pesquisas referentes ao tema. Nessas, a perspectiva foi de caracterizar nos últimos anos os resultados e avanços encontrados em diferentes revisões e contextos. Dentre os 42% dos estudos que revisaram a literatura do tema encontram-se os autores: Jun e Xiang (2011), Murray e Haynes (2015), Kline *et al.* (2016), Kirchherr, Reike e Hekkert (2017), Silveira *et al.* (2017), Souza *et al.* (2017), Therond *et al.* (2017), Ferreira *et al.* (2018), Hens *et al.* (2018), Allais e Gobert (2019), Butturi *et al.* (2019), Iablonski e Bognon (2019), Barros *et al.* (2020), Chen *et al.* (2020), Fraccascia *et al.* (2020), Jato-Espino e Ruiz-Puente (2020), Kravchenko, Mcaloon e Pigosso (2020), Mancini e Nuss (2020), Morseletto (2020), Silva Martínez (2020), Wysiklnska (2020), Chiocchio *et al.* (2021), Clauser *et al.* (2021), Lamolinara *et al.* (2021), Liu *et al.* (2021) e Martinez-Burgos *et al.* (2021).

Nos estudos de revisão, identifica-se algumas vertentes correlacionadas à economia circular. Jun e Xiang (2011) defendem a promoção de uma economia da reciclagem através da conscientização não somente industrial, mas também da

comunidade abordando a proteção e conservação dos recursos. Complementarmente, Murray e Haynes (2015), em seu estudo voltado à ética empresarial, enfatiza a participação da sociedade, meio ambiente e economia. Em 2018, Hens *et al.* destacam alguns passos para o desenvolvimento sustentável através da Produção mais limpa, com abordagens amplas e integradas que combinam avanços tecnológicos e aspectos éticos. E, relacionado às regulamentações, Wysiklnska (2020) identificou a necessidade de implementar um novo modelo de desenvolvimento eficiente em recursos, que vem sendo proposto há vários anos por empresas transacionais e organizações.

A pesquisa de Lamorinara *et al.* (2021), aponta que o gerenciamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbica e produção de digerido como um produto valioso promovem benefícios econômicos. Relacionado a esse reaproveitamento de materiais e resíduos, encontra-se diversos estudos com foco na bioenergia, com a finalidade de: garantir a segurança alimentar (KLINE *et al.*, 2016); ampliar abordagens da bioenergia sustentável global (SOUZA *et al.*, 2017); promover sistemas de bioenergia e as sinergias com serviços sistêmicos da União Europeia (SILVEIRA *et al.*, 2017); apontar o potencial da biomassa no mercado brasileiro para a produção de biogás e conseqüentemente o uso para geração de energia elétrica (FERREIRA *et al.*, 2018); averiguar tendências e perspectivas dos resíduos agrícolas para produção de biomassa e posteriormente a bioenergia (BARROS *et al.*, 2020); fornecer materiais de maneira responsável para uma sociedade de baixo carbono (MANCINI; NUSS, 2020); indicar a alta viabilidade em resíduos orgânicos que podem ser transformados em energia na América Latina e no Caribe (SILVA MARTINEZ, 2020); avançar nos processos bioquímicos e termoquímicos para a produção de bioenergia (LIU *et al.*, 2021); apresentar alternativas para resíduos agroindustriais e possibilidades de geração de produtos de valor agregado (MARTINEZ-BURGOS *et al.*, 2021).

Baseada na pesquisa de Therond *et al.* (2017) a economia circular tem origem na ecologia industrial. Desta maneira, os pesquisadores revisaram a literatura e desenvolveram uma estrutura analítica para classificar os modelos de agricultura que buscam abordar questões ambientais decorrentes do desenvolvimento da agricultura industrial. Também caracterizada como um ramo da ecologia industrial e facilitadora da economia circular, a simbiose industrial foi um termo frequente entre os autores europeus Allais e Gobert (2019), avaliando os impactos de projetos ou produtos sobre a perspectiva de cadeia de valor ou territorial, Butturi *et al.* (2019), apontando soluções

viáveis urbano-industrial através do melhoramento da absorção de fontes de energia renovável a nível industrial, Fraccascia *et al.* (2020), abordando a simbiose industrial baseada em energia, e Jato-Espino e Ruiz-Puente (2020), analisando as dificuldades da integração de informações e conhecimentos atuais relacionados à simbiose industrial, dificultando a criação de sinergias.

Na Holanda, Kirchherr, Reike e Hekkert (2017), abordaram conceitos e a estrutura 4Rs (reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar) como a estrutura política oficial da União Europeia para a economia circular. Três anos depois, Morsetto (2020), reuniu um conjunto metas para a transição para uma economia circular, juntamente com uma nova visão sobre metas destinadas a acadêmicos e tomadores de decisão, a estrutura R9 (recuperação, reciclagem, reaproveitamento, remanufatura, recondição, reparo, reutilizar, repensar, recusar). Enquanto na Dinamarca, Kravchenko, Mcaloon e Pigozzo (2020), avaliaram o contexto da economia circular na produção têxtil e discutiram a importância da complementação de métricas para a circularidade neste setor.

A abordagem de estudos de caso foi a mais recorrente entre os documentos analisados. Sobre essa perspectiva, diversas ferramentas e indicadores foram propostos e testados. Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017), avaliou a ferramenta CEIP, disponibilizada pela Fundação Ellen MacArthur, em uma fábrica de couro. O estudo destacou que a ferramenta pode melhorar a tomada de decisão por meio da difusão mais ampla do pensamento circular. No mesmo ano, Saidani *et al.* (2017), realizaram uma comparação com ferramentas CET, MCI e CEIP com dados de um conversor catalítico que equipava veículos off-road pesados, concluindo que uma ferramenta pode ser melhor em determinada situação, como comparar rapidamente o impacto de dois materiais diferentes no desempenho da circularidade (MCI); outros são mais centrados no produto e no pensamento do ciclo de vida (CET ou CEIP).

Ainda na Europa, Figge *et al.* (2018), desenvolveram uma métrica de combinação, explorando pontos fortes de circularidade e longevidade. Posteriormente, para alcançar um crescimento inteligente e sustentável voltados ao contexto europeu, Avdiushchenko e Zajac (2019), concentraram-se nas tendências dos indicadores, enquanto Moraga *et al.* (2019) aplicou indicadores quantitativos de microescala para estrutura de monitoramento, e, Saidani *et al.* (2019), complementou em níveis de escala micro, meso e macro a partir de categorias (loops, performance, perspectiva, dimensionalidade, transversabilidade, formato). Já em 2020, Santagata

et al. propuseram um novo indicador fornecendo estrutura para avaliar os fluxos de energia e materiais, quantificar o progresso, apoiar a formulação política e interação com o design.

No Brasil, Rossi *et al.* (2019), desenvolveram um conjunto de indicadores focado nas três dimensões da Sustentabilidade (ambiental - da perspectiva material, econômica e social), aplicada em Modelos de Negócios Circulares para capturar as inovações trazidas pela Economia Circular que os indicadores convencionais não medem. Essas inovações incluem pensamento sistêmico, mudança de mentalidade, diversidade, eficácia, resiliência e longo prazo para todas as partes interessadas.

Outra ferramenta bastante relevante é a ACV aplicada recentemente em estudos industriais e agrícolas. Ferrari *et al.* (2020), aplicaram a ferramenta a um fabricante de revestimentos cerâmicos e os resultados obtidos comprovaram que a ACV é uma ferramenta valiosa para a avaliação e monitoramento dos impactos ambientais relacionados ao processo produtivo. Já, Cusenza *et al.* (2021), destinaram a estimar os potenciais impactos ambientais de um digestor acoplado a uma central combinada de calor e energia alimentada por resíduos agroindustriais e obtiveram desempenhos energético e ambientais positivos em comparação com sistemas alternativos que oferecem as mesmas funções.

Ainda no setor industrial, Kumar *et al.* (2021), avaliaram os impactos ambientais de 7 produtos lácteos, durante a etapa de processamento e embalagem, e identificaram que no laticínio os principais fatores que contribuem para maiores impactos ambientais são consumo de energia elétrica e combustível para energia térmica, a utilização de água, diversos produtos químicos, juntamente com os materiais de embalagem.

Na agricultura, o estudo de Koppelmaki, Helenius e Schulte (2021), além da aplicação da ACV foi introduzido o conceito de 'circularidade aninhada' fornecendo uma visão para localizar os sistemas alimentares, fechando os ciclos de nutrientes, biomassa e energia em várias escalas. Diferentemente dos demais autores, Muradin e Kulczycka (2020), envolveram a metodologia para fornecer uma avaliação abrangente do impacto ambiental na produção de um sistema de bioenergia .

Com a finalidade de avaliar o impacto ambiental de um território de produção, alguns autores dinamarqueses envolveram a ACV com o método do metabolismo territorial (TM-LCA). Sohn, Veja e Birkved (2017), apontam através do estudo que o método cria a oportunidade para avaliação direta de impactos ambientais,

incorporação de dinâmicas de sistema e o uso de análise de decisão multicritério. Posteriormente, Vega *et al.* (2019), implementaram o mesmo modelo a fim de fornecer uma comparação de potenciais escolhas de biorrefinaria para o tratamento de resíduos em duas localidades da Dinamarca. Em ambas localidades, os autores concluíram que a mistura de bagaço de uva e dejetos de bovinocultura para biorrefinarias seja ambientalmente benéfico. No ano seguinte, Vega *et al.* (2020), avaliaram três variações de tecnologia para digestão anaeróbica e avaliadas em duas escalas diferentes, para duas regiões diferentes.

Além disso, as análises de fluxos de materiais vem sendo desenvolvidas em território francês apontando que os principais fluxos correspondem às importações de alimentos humanos, exportações de fertilizantes sintéticos e exportação de produção agrícola, evidenciando o baixo nível de conexões internas que caracterizam esse sistema (VERGER *et al.*, 2018). Buclet e Donsimoni (2020), em um estudo de produção de queijo, aplicaram um mecanismo de decisão e ajuste para alcançar um justo equilíbrio socioecológico juntamente com o metabolismo territorial e análise das formas de capacidade, que caracteriza a ecologia territorial, respondendo a questões econômicas essenciais que promoveram o bem-estar e a melhor utilização dos recursos disponíveis e instituições que promovam uma coordenação eficaz entre os atores. No Brasil, Barcelos *et al.* (2021), identificaram oportunidades de criação de valor internalizando fluxos na produção de casulos de seda promovendo uma bioeconomia circular, aplicando a ferramenta ACW para avaliar a circularidade do sistema.

Neste contexto de análise dos fluxos, Kennedy, Cuddihy e Engel-Yan (2007), analisaram quatro fluxos (água, materiais, energia e nutrientes) de oito cidades americanas e identificaram que com o crescimento populacional esses fluxos fundamentais também aumentaram, porém em cidades com iniciativas de reciclagem de resíduos tiveram reduções nos descartes de resíduos residenciais. Posteriormente, na Europa, Haas *et al.* (2015), basearam na estrutura conceitual e nos limites do sistema para contabilizar os fluxos de materiais em toda economia europeia e constataram que apenas 6% dos materiais processados são reciclados e ainda, se considerar a biomassa como fluxo independente das condições de produção, o grau de circularidade aumenta para 37%. Riding *et al.* (2015), analisaram os fluxos de resíduos de nutrientes da conversão térmica de biomassa (cinzas) e digestão anaeróbica (digerir) como corretivos sustentáveis do solo para uso no lugar de

fertilizantes tradicionais, destacando que a mistura de cinzas e digerido não tem maiores impactos ambientais prejudiciais quando aplicada ao solo do que o esterco animal não digerido, e pode estimular a biodiversidade.

Em 2017, Currie, Musango e May, tratou a análise dos fluxos como nexos, Currie, Musango e May (2017), e traçaram os tipos e quantidades de fluxos de recursos que suportam o funcionamento da Cidade do Cabo e apontaram que cada processo e recurso está interligado por meio de domínios de recursos específicos (nexos clima-alimento-energia-água, habitação-transporte energia, ou desperdício-alimento-energia). Dois anos depois, Fontana e Boas (2019), através de um estudo exploratório em Amsterdã, constataram uma maior cooperação entre o nexo água-energia, papel principal da busca do nexo leva a uma transformação mais radical das redes infraestruturais de abastecimento de água, energia e alimentos e suas conexões.

A aplicação da simbiose industrial voltada ao desenvolvimento sustentável foi abordado por alguns autores: Alfaro e Miller (2014), em pequenas fazendas e a geração de um modelo de fluxos entre animais e peixes, produção de ração, sistema de digestor, mercado e casa do consumidor; Allais, Reyes e Roucoules (2015), analisaram uma indústria de cimento e fabricante de facas através da integração de recursos territoriais tangíveis e intangíveis no processo de design do produto agregando valor ao cliente, a empresa e seu território; Benjamin, Tan e Razon (2014), com um procedimento computacional para identificar o índice de criticidade em plantas de poligeração e parques simbióticos energéticos; e, Santos e Magrini (2017), verificaram uma rede de simbiose agroindustrial por meio de três fluxogramas de curto, médio e longo prazo em uma biorrefinaria.

Uma abordagem significativa se refere ao tratamento de efluentes industriais. Resíduos de abatedouros e de processamento são considerados substratos ideais para a produção de biogás, pois geralmente contêm alta concentração de matéria orgânica e são ricos em proteínas e lipídios, que favorecem a produção de metano. Bayr *et al.* (2012), analisaram o potencial desses resíduos em escala laboratorial e verificaram que no processo mesofílico o rendimento de metano é maior e o processo mais estável comparado com o processo termofílico. Anos depois, Lima *et al.* (2020), estimaram o potencial desses efluentes e a viabilidade da produção de energia a partir do biogás gerado em reatores por meio de simulações enquanto Vilvert *et al.* (2020), monitoraram o tratamento biológico de efluentes de um frigorífico de bovinos, e

detectaram que a quantidade de biogás produzida supriria 16% da demanda total de lenha que é utilizada para energia térmica. No mesmo ano, Naqvi *et al.* (2020), realizaram uma análise através do comportamento térmico dinâmico e classificaram outros resíduos agroindustriais em termos crescente de energia da ativação, sendo eles: espiga de milho, casca de arroz, cavaco de madeira, palha de trigo e bagaço.

Utilizando a perspectiva da economia circular para o reaproveitamento de águas residuais na agricultura Molina-Moreno *et al.* (2017), apontaram redução do consumo de água, gás natural e maior geração de energia elétrica pelo biogás na agroindústria de suínos. Por outro lado, Maroulek (2020), avaliou o desempenho químico e econômico da biomassa de resíduos alimentares e identificou níveis superiores de lignocelulose e teores de fibra bruta comparados à biomassa de matéria-prima agrícola.

Em estudo recente, novas instalações para produção do biogás agroindustrial evidenciaram efeitos positivos na economia e meio ambiente (PIWOWAR, 2020). Stolarski *et al.* (2020), identificou uma grande diversidade no potencial de biomassa e tecnologias de bioenergia em nove países do Mar Báltico. Essa diversidade é resultante da localização geográfica, estrutura de uso da terra e tamanho da população.

No Reino Unido, um modelo com multiobjetivo fuzzy foi desenvolvido por Balaman *et al.* (2018) para melhorar o projeto e planejamento de multiresíduos de biomassa. Esse modelo constrói a cadeia de suprimentos identificando a configuração ideal e seleciona a tecnologia mais adequado de pré-processamento de biomassa e produção de energia.

Não obstante, Holzer *et al.* (2021), realizaram uma análise de cluster para identificar grupos de pequenas e médias empresas que variam de acordo com o desempenho geral percebido e a importância das áreas tópicas da economia circular. Os resultados ilustram a heterogeneidade das empresas e os clusters foram descritos como “pioneiros”, “seguidores rápidos”, “maioria tardia” e “retardatários”, têm características distintas e podem exigir abordagens diferentes em relação à comunicação e suporte.

Portanto, esta revisão procurou apresentar e relacionar algumas pesquisas atuantes sobre as práticas de economia circular e metabolismo territorial no contexto de bioenergia na indústria, através da associação das diversas características buscadas nos documentos (ver Apêndice B, pg. 97).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise do trabalho contempla a avaliação de circularidade de um sistema de manufatura de um produto industrial. Essa análise foi realizada através da inserção de dados obtidos em relatórios (citados na subseção 2.2.3) na ferramenta *AgroCircle Wins* (ACW) (descrita na seção 2.2). A análise e discussão dos resultados foram separados em três seções. A primeira seção (4.1) aborda o diagnóstico de circularidade multiníveis. A segunda seção (4.2) apresenta a circularidade com energia renovável na indústria. A terceira seção (4.3) versa a evidenciação da circularidade com a implementação do biodigestor na indústria.

4.1 Diagnóstico de Circularidade Multiníveis

O diagnóstico de circularidade do produto, obtido através de gráficos circulares, permite a visualização de diversas informações interconectadas, os fluxos de entrada e saída de informações quantitativas.

Os gráficos de circularidade, juntamente com os relatórios, mostram todos os fluxos dos processos de materiais e energia que circulam no sistema. A espessura dos fluxos varia de acordo com a quantidade de material ou energia e são representados com cores diferentes. Apenas os processos que foram considerados externos em determinado nível aparecem na cor cinza

As porcentagens representadas nos relatórios indicam a quantidade de material ou energia está circulando dentro do processo ou nível. Quanto maior o percentual de circularidade, mais matéria e energia está circulando nos limites do sistema estipulado.

Cada processo apresentado no gráfico circular, pode ter mais de um fluxo de entrada ou saída sendo vistos e analisados de maneira intuitiva, pois são representados por flexas que direcionam a origem e o destino.

O diagnóstico de circularidade foi segmentado em Cenário 1 (subseção 4.1.1) apresentando os resultados da análise com a implementação do biodigestor, e, Cenário 2 (subseção 4.1.2) expondo os resultados da análise sem o biodigestor. Em cada cenário são analisados três níveis de abrangência: Indústria (N1), Parque Industrial (N2) e Cooperativas (N3).

4.1.1 Cenário 1 – Análise com biodigestor no escopo

No Cenário 1, os níveis N1, N2 e N3 são representados graficamente e os fluxos envolvidos em cada nível podem ser observados em percentuais de circularidade em termos de material.

O N1 (Indústria) representa os fluxos de materiais presentes dentro e nos limites da fábrica, como processamento inicial, estação de tratamento de efluentes (ETE), processamento e expedição. A Tabela 4, mostra a circularidade (%) por processo no N1.

Tabela 4 - Cálculo de circularidade (%) por processo na Indústria (N1)

Processo	Nível 1
Processamento Inicial	44,14%
ETE	83,33%
Processamento	28,06%
Expedição	49,76%
Captação de água pluvial	100%
Circularidade Total N1	37,8%

Fonte: Autoria Própria (2022)

O “processamento inicial” envolve os fluxos de entrada da matéria prima vinda dos campos (processo externo a esse nível por pertencer ao N3), produtos de limpeza e desinfetante, produtos para tratamento de água, gás carbônico, madeira, gás e diesel com duas entradas, consumo em atividades do processo e diesel aplicado no transporte da matéria prima dos campos até a indústria. Esses valores passaram por locação de massa para uma correta avaliação do produto.

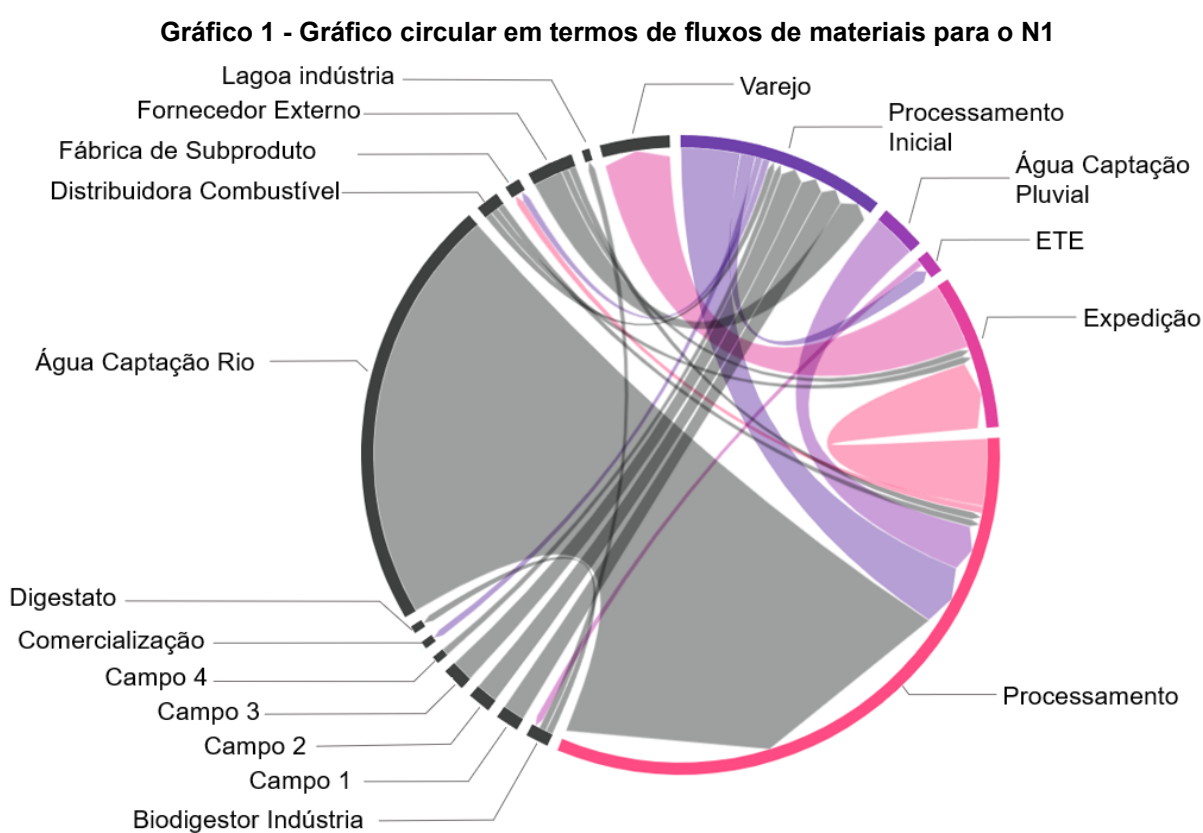
A ETE neste nível apresenta uma circularidade de 83,33% por receber fluxo de entrada de processo interno (resíduos e descartes – processamento inicial), porém o fluxo de saída (lodo) tem como destino um processo externo (biodigestor – N2).

No processamento, apenas dois fluxos de entrada são considerados internos, produto beneficiado que vem do processamento inicial e o reaproveitamento de água de chuva, os demais fluxos são de fontes externas, como: eletricidade, água captada do rio, embalagem, condimentos, produtos de limpeza e desinfetante e diesel.

A expedição, setor responsável por armazenagem do Produto 2F e distribuição ao varejo, representa no N1 49,76% de circularidade. Esse processo tem como

entrada de fluxos o Produto 2F, interno que vem do processamento, a eletricidade, o diesel e a embalagem secundária como externos. O fluxo de saída desse processo é o Produto 2F e a embalagem secundária que serão destinadas ao varejo.

A circularidade total para o N1 é de 37,8%, ou seja, 37,8% da somatória de fluxos de materiais circulam entre processos da indústria. Isso significa que a maior parte dos materiais (62,2%) são provenientes de fontes externas da Indústria ou pertencentes aos outros níveis. Nesse sentido, o Gráfico 1, mostra a circularidade em termos de fluxos de materiais.



Fonte: Aatoria Própria (2022)

O gráfico circular apresenta as rotas dos materiais dentro (processamento inicial, processamento, expedição e ETE) e fora da Indústria (varejo, digestato, lagoa indústria, fornecedor externo, fábrica de subproduto, distribuidora de combustível, distribuidora de água, comercialização e campo 1,2,3 e 4). Quanto maior a espessura da seta, maior será a quantidade de material (ton/ano) sendo movimentado.

O maior fluxo de material acontece na captação de água do rio para o processamento, considerado externo, enquanto a captação de águas pluviais, fluxo interno, corresponde a 9,5% desse valor. O segundo maior fluxo externo vem dos

campos 1,2,3 e 4 para o processamento inicial. O fluxo mais espesso do fornecedor externo se refere a produtos de limpeza, desinfetante, produtos para tratamento de água, gás e gás carbônico que vão para o processamento inicial. Esse fornecedor externo ainda fornece condimentos e produtos de limpeza e desinfetante para o processamento, e também, embalagem secundária para a expedição.

O termo “Comercialização”, que recebe fluxo de material do processamento inicial, representa em torno de 13% de material descartado vendido externamente.

Na análise do N2, como mencionado na seção 3 (Critérios para Definição e Escopo dos Níveis), abrange os limites do Parque Industrial, em que, além dos fluxos do N1 são acrescentados os fluxos da lagoa, do biodigestor e da fábrica de subproduto. A Tabela 5, apresenta a circularidade (%) por processo no N2.

Tabela 5 - Cálculo de circularidade (%) por processo no Parque Industrial (N2)

Processo	Nível 2
Processamento Inicial	47,08%
Biodigestor Indústria	94%
ETE	100%
Expedição	49,76%
Fábrica de Subproduto	100%
Lagoa Indústria	100%
Captação de água pluvial	100%
Processamento	28,06%
Circularidade Total N2	39,14%

Fonte: Autoria Própria (2022)

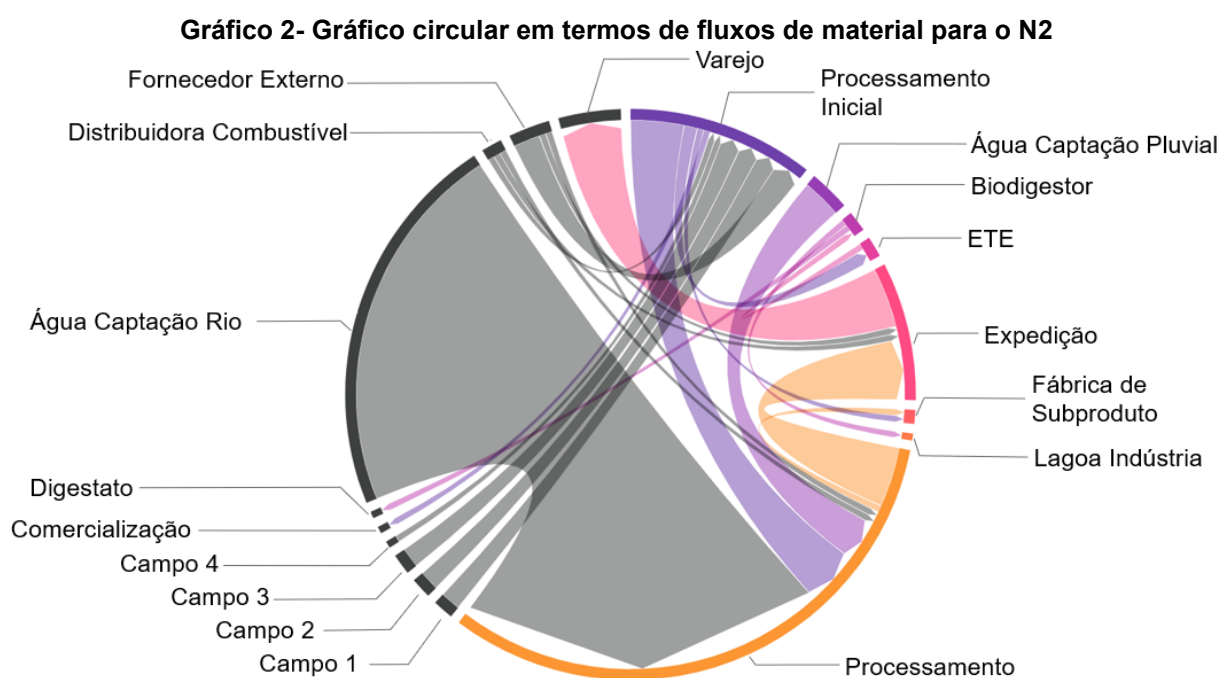
Alguns processos pertencentes ao N1 (processamento, varejo, ETE, água captação chuva) mantiveram as mesmas porcentagens de circularidade, pois já eram internos e não apresentam ramificações nos seus fluxos, diferentemente do processamento inicial que teve um aumento na circularidade de 2,94%, justificado pelo material que ele destina para ETE é parte encaminhado para o biodigestor da indústria e parte para a lagoa, ambos internos do N2.

Já entre os processos referentes ao N2, a fábrica de subproduto e a lagoa apresentaram circularidade de 100%. Essa representatividade é alcançada pois esses processos recebem fluxos que passaram a ser do mesmo nível, a fábrica de subproduto é o destino do material do processamento inicial e do processamento

(descarte do produto beneficiado), e a lagoa é receptora de parte do lodo retirado do biodigestor que pertence ao N2.

O biodigestor da indústria por sua vez, apresenta circularidade de 94%, isso porque, o digestato resultante desse processo tem como destino as cooperativas que integram o N3, aqui ainda considerado externo.

A circularidade total para o N2 é de 39,14%, um aumento de 1,34% comparado com o N1. Esse acréscimo se justifica pelo aumento de três processos envolvidos no N2. O Gráfico 2, exibe o gráfico circular em termos de fluxos de materiais.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Embora essa representatividade pareça pequena, essa porcentagem corresponde a produção de um ano do produto perante a demanda total da indústria.

Seguindo para a análise de circularidade no N3 (Cooperativas), a quantidade de fluxos de materiais aumentou consideravelmente comparando com níveis anteriores, pois cada processo é composto por 3 ou 4 subprocessos. O N3 traz novas oportunidades para fechar os fluxos de materiais que circulam para a produção do produto com um raio de abrangência maior, na tentativa de aumentar a circularidade.

A Fábrica de Ração representa as fábricas 1,2 e 3. Os Cooperados estão localizados nos Campos 1,2,3 e 4. E, a Unidade Produtora Animal, é subdivida em Unidade 1 (fornecendo animais para os campos 1 e 4), Unidade 2 (fornecendo animais

para os campos 2 e 4) e Unidade 3 (fornecendo animais para os campos 3 e 4). Na Tabela 6, encontra-se as porcentagens de circularidade em cada processo.

Tabela 6 - Cálculo de circularidade (%) por processo nas Cooperativas (N3)

Processo	Nível 2
Processamento Inicial	85,20%
Processamento	28,06%
Expedição	49,76%
Campo 1	100%
Campo 2	100%
Campo 3	100%
Campo 4	98,23%
Fábrica de Ração 1	58,03%
Fábrica de Ração 2	53,77%
Fábrica de Ração 3	52,66%
ETE	100%
Fábrica de Subproduto	100%
Poço Artesiano (Fábrica Ração)	100%
Poço Artesiano Campo	100%
Biodigestor Campo	100%
Biodigestor Indústria	100%
Digestato	100%
Unidade 1	100%
Unidade 2	100%
Unidade 3	100%
Lagoa Indústria	100%
Circularidade Total N3	89,42%

Fonte: Autoria Própria (2022)

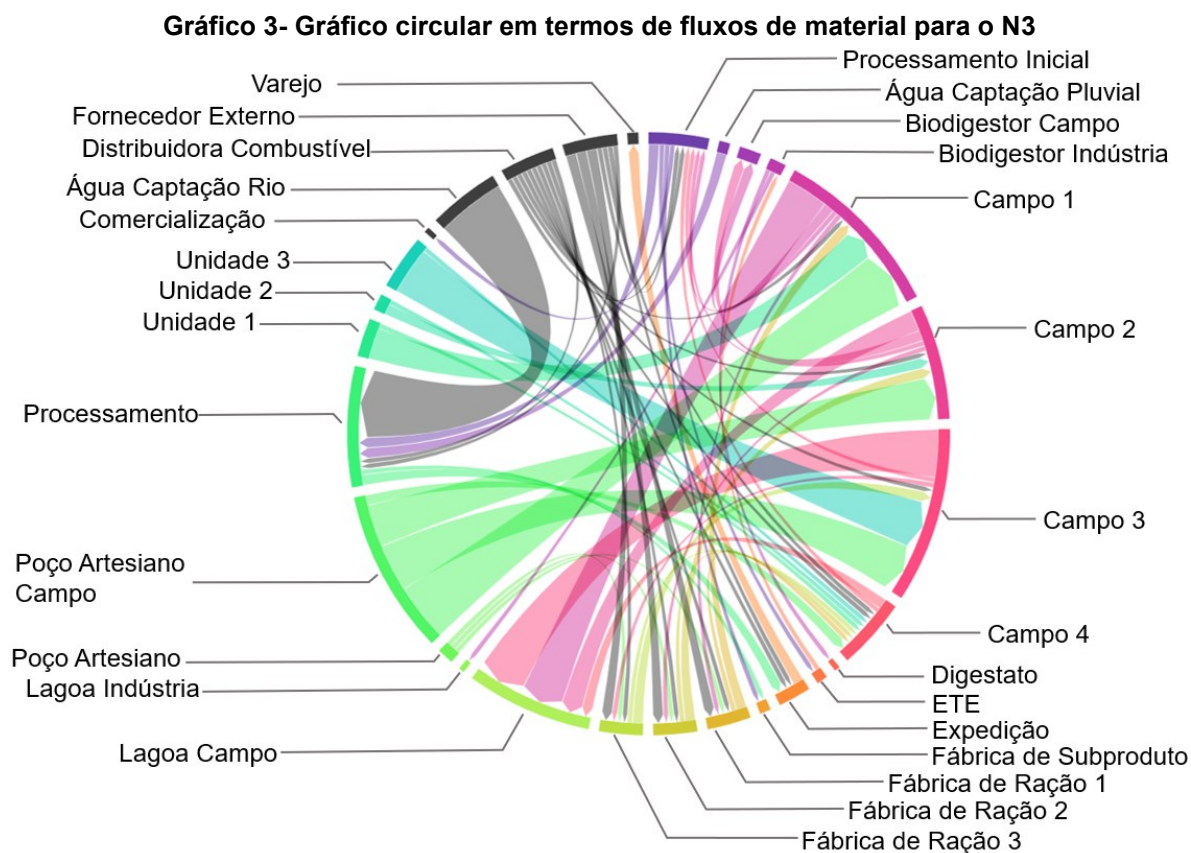
A circularidade dos processos que possuem fluxos destinados a processos pertencentes ao N3 obteve um aumento da circularidade. O processamento inicial, de 44,14% (N1) e 47,08% (N2) passou a apresentar circularidade de 85,20%, quase o dobro. O biodigestor da indústria também é um processo que obteve melhora na circularidade, de 94% (N2) passando para 100% (N3), devido aos 12% do digestato enviado para as Cooperativas.

Os campos 1,2 e 3 apresentam 100% da circularidade, pois recebem ração, produtos de limpeza e animais das próprias cooperativas como também os envia para

o processamento inicial que é um processo interno. O campo 4 indica circularidade de 98,23%, esse valor se justifica pela variação no fornecimento da ração, sendo aproximadamente 25% de origem externa, não cooperado. Um ponto importante a ser esclarecido sobre esta porcentagem dos campos, é que o está sendo analisado é apenas o processo de envio de matéria prima para o processamento inicial na indústria.

As fábricas de ração também apresentam pequenas variações em termos de circularidade, em decorrência da diferente composição e quantidade de ingredientes entre elas, quanto mais variados ingredientes são inseridos maior a quantidade de fornecedor externo, o que implica na diminuição de circularidade.

A circularidade total para o N3 é de 89,42%. Isso quer dizer que a maior parte dos materiais está circulando entre os três níveis, e apenas 10,58% dos materiais tem origem externa. Dessa maneira, o Gráfico 3, exhibe detalhadamente, os fluxos em termos de materiais através do gráfico circular.



Fonte: Autoria Própria (2022)

O aumento significativo na circularidade neste nível, representa a importância da troca de materiais entre os processos, sendo eles pertencentes à indústria, porque

industrial ou cooperados. Essa “rede de simbiose” com uma variedade de agentes complementares em que saídas ou desperdícios de um são usados, direta ou indiretamente, como entradas por outro é uma solução para reduzir custos, agregar valor aos produtos e às indústrias, ao mesmo tempo em que unem o desenvolvimento econômico territorial e restrições ambientais.

4.1.2 Cenário 2 – Análise sem biodigestores no escopo

O Cenário 2, analisa a circularidade do produto considerando o biodigestor da indústria como um biodigestor externo (processo externo) em todos os níveis de abrangência: Indústria (N1), Parque Industrial (N2) e Cooperativas (N3). Os demais processos e fluxos foram mantidos.

A avaliação do N1 no cenário 2, não apresenta alteração nas porcentagens de circularidade dos processos comparado com o cenário 1, visto que, o biodigestor já era considerado externo neste nível.

No N2, o processamento inicial, processamento e expedição, assim como no cenário 1, não apontou modificação. Já os processos que contemplam a ETE e a lagoa sofreram alterações. A Tabela 7, mostra um comparativo da circularidade nos cenários 1 e 2 por processo no Parque Industrial (N2).

Tabela 7 - Comparativo de circularidade (%) nos cenários 1 e 2 no Parque Industrial (N2)

Processo	Cenário 1 - N2	Cenário 2 - N2
Processamento Inicial	47,08%	47,08%
ETE	100%	83,33%
Expedição	49,76%	49,76%
Fábrica de Subproduto	100%	100%
Lagoa Indústria	100%	0%
Captação de água pluvial	100%	100%
Processamento	28,06%	28,06%
Circularidade Total N2	39,14%	38,53%

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Os processos neste cenário tiveram sua circularidade afetada por compartilhar de fluxos com o biodigestor externo. A circularidade da ETE mantém-se representativa, mesmo tendo reduzido 16,67%, isso porque a maior parte de fluxo de

entrada vem de processos internos (processamento inicial e processamento) enquanto apenas 20% do fluxo de saída vai para o biodigestor externo. A lagoa da indústria foi a mais prejudicada, perdendo toda sua circularidade, isso se deve ao fato de a lagoa ser receptora de 88% dos fluxos do biodigestor (KUNS; STEINMETZ; DO AMARAL, 2022), que neste nível está sendo considerado externo. Essa diminuição das porcentagens de circularidade nesses dois processos fez com que a circularidade no N2 reduzisse de 39,14% para 38,53%.

O mesmo acontece quando são comparados os processos do N3 para circularidade nos cenários 1 e 2, como apresenta a Tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo de circularidade (%) nos cenários 1 e 2 nas Cooperativas (N3)

Processo	Cenário 1 – N3	Cenário 2 – N3
Processamento Inicial	85,20%	85,20%
Processamento	28,06%	28,06%
Expedição	49,76%	49,76%
Campo 1	100%	93,78%
Campo 2	100%	90,79%
Campo 3	100%	100%
Campo 4	98,23%	98,23%
Fábrica de Ração 1	58,03%	58,03%
Fábrica de Ração 2	53,77%	53,77%
Fábrica de Ração 3	52,66%	52,66%
ETE	100%	83,33%
Fábrica de Subproduto	100%	100%
Poço Artesiano (Fábrica Ração)	100%	100%
Poço Artesiano Campo	100%	100%
Biodigestor Campo	100%	100%
Unidade 1	100%	100%
Unidade 2	100%	100%
Unidade 3	100%	100%
Lagoa Indústria	100%	0%
Lagoa Campo	100%	100%
Circularidade Total N3	89,42%	87,37%

Fonte: Autoria Própria (2022)

A circularidade total, em termos de massa, do N3 com a utilização de um biodigestor externo reduziu em 2,05% quando comparada a utilização do biodigestor da indústria.

Na comparação entre os dois cenários vale ressaltar que não foi considerado o consumo de diesel para o deslocamento desses materiais para um biodigestor externo, portanto, essa variação tende a ser maior, diminuindo a porcentagem de circularidade na avaliação do cenário 2, que considera o biodigestor externo.

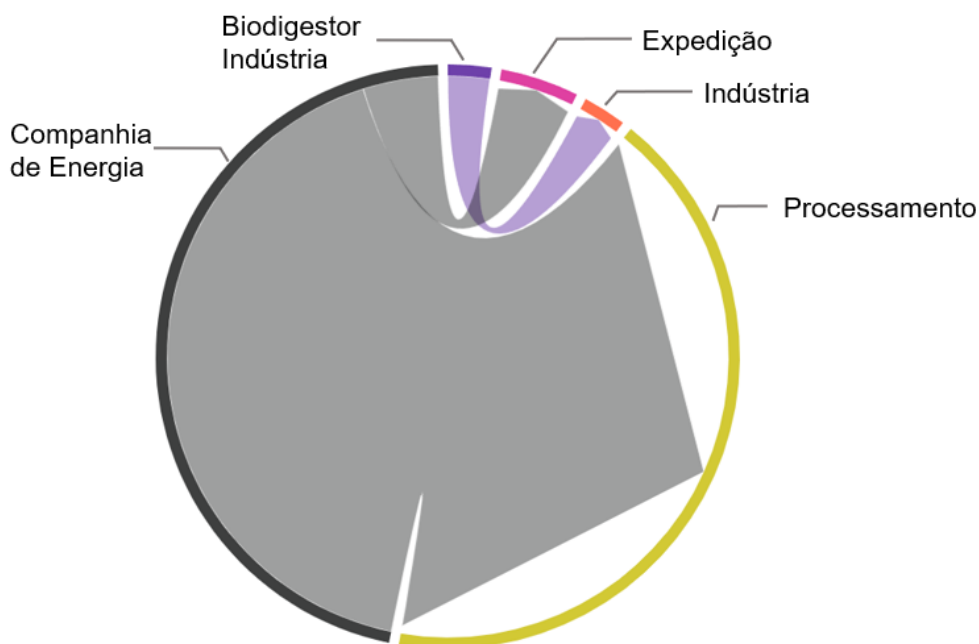
Na sequência, são analisados e comparados a circularidade do produto em termos de energia.

4.2 Circularidade com Energia Integrada na Indústria

A avaliação da circularidade do produto em termos de energia elétrica é uma das opções que a ferramenta ACW disponibiliza. Neste caso, grande parte da eletricidade consumida é proveniente da companhia de energia, chegando até a indústria através das redes de distribuição. Complementarmente, a Indústria pode aplicar em seus processos de manufatura energia elétrica (autogeração), proveniente da combustão do biogás extraído do biodigestor da própria indústria.

Os fluxos de energia foram inseridos e avaliados em todos os processos dos níveis da Indústria (N1), do Parque Industrial (N2) e das Cooperativas (N3). No N1 o valor de circularidade em todos os processos é nulo, visto que o biodigestor, que contribui com uma parcela de circularidade está sendo analisado como parte do N2. Na avaliação do N2, os processos biodigestor indústria e indústria contribuem para um ganho de circularidade em termos de energia de 8,17%, o que representa um consumo de mais de 90% de energia elétrica com origem externa neste nível. O Gráfico 4, apresenta o gráfico circular em termos de energia para o N2.

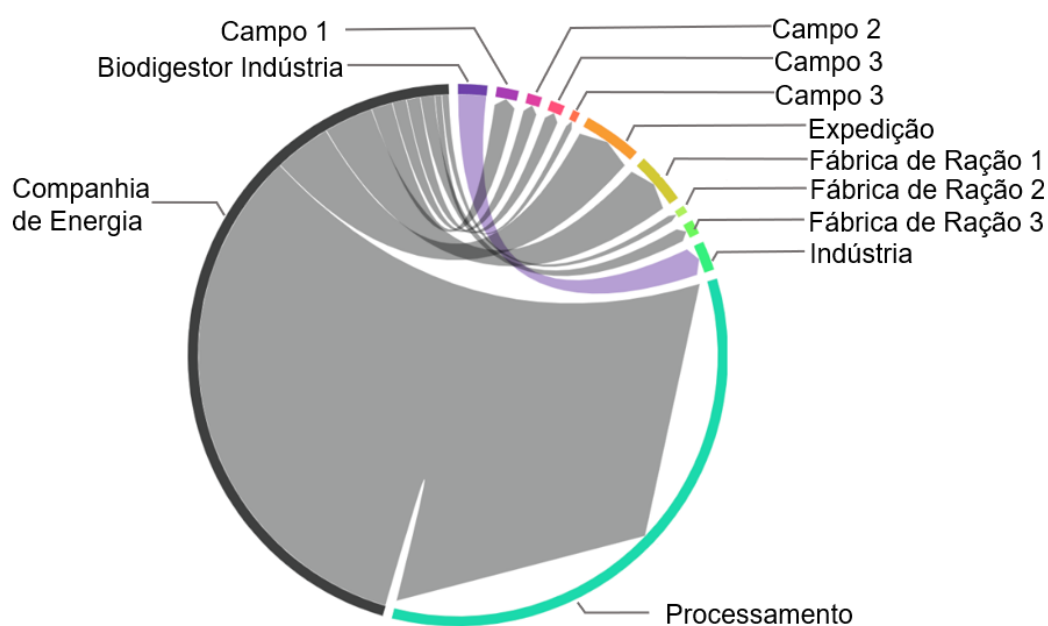
Gráfico 4 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia para o N2



Fonte: Autoria Própria (2022)

Ao avaliar o maior nível, o N3, assim como no N2, os processos biodigestor indústria e indústria mantiveram circularidade, justamente por haver a troca de energia entre eles e também, por serem processos internos. O mesmo não aconteceu com a circularidade do nível, pois com a incorporação de mais processos a circularidade em termos de energia reduziu para 7,09%, como apresenta o Gráfico 5.

Gráfico 5 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia para o N3

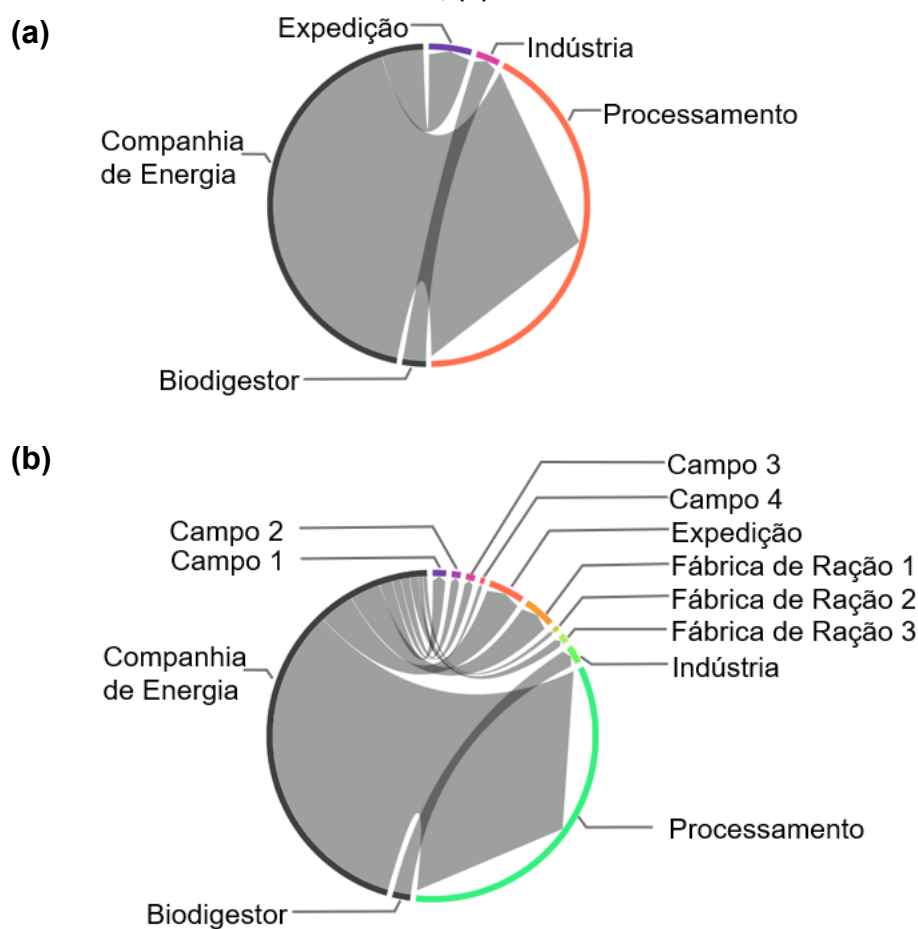


Fonte: Autoria Própria (2022)

Assim como na subseção anterior, aqui também foram analisados os processos e os níveis considerando o biodigestor da indústria como um processo externo (biodigestor externo) aos três níveis, porém agora, relacionando a circularidade em termos de energia. Tanto para os processos, quanto para os níveis, essa circularidade foi nula. Essa ausência de circularidade acontece exatamente por não existir energia de autogeração (motor gerador de biogás, eólica ou fotovoltaica, por exemplo).

Essa análise aponta que a oportunidade da autogeração de energia nas indústrias, além de contribuir para eficiência energética e sustentabilidade no negócio, é um fator decisivo para a resiliência de uma empresa. Na sequência, são expostos os gráficos circulares em termos de fluxos de energia com biodigestor externo nos níveis N1 e N2 (Gráfico 6a) e N3 (Gráfico 6b).

Gráfico 6 - Gráfico circular em termos de fluxos de energia com biodigestor externo (a) N1 e N2; (b) N3



Fonte: Autoria Própria (2022)

O maior consumo de energia nos gráficos analisados é apontado para o processamento do produto. Neste sentido, sugerem-se alternativas para tentar internalizar os fluxos de energia nos processos investigados.

A energia solar, produzida através de placas solares fotovoltaicas, é uma opção entre as energias renováveis e apresenta várias vantagens: facilidade de acesso à energia elétrica em locais mais remotos, baixo impacto ambiental, além de ser uma fonte de energia gratuita. Outra possibilidade seria a energia eólica, considerada um tipo de energia verde e promissora, podendo ser aplicada isolada ou combinada com a energia solar por possuírem características complementares.

Uma fonte de energia incorporada ao presente trabalho é a bioenergia. Essa energia apresenta baixo teor de carbono por apoiar a conversão da biomassa de maneira ambientalmente correta e baixas emissões de CO₂. Por meio de uma gestão mais eficiente dos recursos e do desenvolvimento de tecnologias para redução de resíduos sólidos, os ganhos ambientais e econômicos proporcionados pelo uso da bioenergia colaboram com a economia circular além de atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): inserção de energia renovável no processo de manufatura (melhoria da eficiência energética – 7.3, promover tecnologia de energia limpa – 7.a, adotar tecnologia e processos industriais mais limpos e ambientalmente corretos – 9.4, uso eficiente dos recursos naturais - 12.2); reaproveitamento de descartes industriais para produção de energia (dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental - 8.4, alcançar o manejo saudável dos produtos e de resíduos ao longo de todo ciclo de vida - 12.4, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso - 12.5).

A energia é um requisito primordial para o processamento industrial e principalmente a primeira estratégia considerada para a valorização de resíduos. A sustentabilidade industrial requer esforços colaborativos de diversos agentes participantes a nível regional para objetivos comuns que consistem na conservação de recursos, eficiência de produção, viabilidade econômica, baixas emissões de carbono e responsabilidade social corporativa (BICHRAOUI, GUILLAUME, HALOG; 2013).

5 OPORTUNIDADES PARA AMPLIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DO SISTEMA DE MANUFATURA DE UM PRODUTO INDUSTRIAL

Baseado nos dados obtidos na seção anterior, o aumento da circularidade nos sistemas de manufatura das indústrias vai além da gestão de resíduos e da reciclagem, pode ser uma oportunidade de melhorar os resultados e processos nas empresas e também, um desafio ao incorporar práticas mais sustentáveis em toda sua cadeia de abastecimento.

Algumas vantagens com a adesão de modelos de produção circulares estão diretamente relacionadas com oportunidades de novos negócios com novas fontes de investimento, otimização de matéria-prima (menor desperdício), maior eficiência operacional, crescimento econômico, conscientização da população (mais cautela no consumo e consciência ambiental), e geração de emprego.

Assim como, Jun e Xiang (2011) e Murray e Haynes (2015), enfatizaram a necessidade da conscientização não somente das indústrias, mas também da sociedade. Essa participação conjunta resulta em benefícios ambientais e possibilita a afinidade da marca com seus clientes e, conseqüentemente, economizar financeiramente e minimizar perdas.

A otimização de matéria-prima com o controle de desperdícios em uma empresa é fundamental para o processo produtivo. A criação de novos produtos a partir de subprodutos e sobras inteligentes além de reduzir o desperdício, a reutilização ou mesmo a venda de resíduos torna-se uma oportunidade de descobrimento de novos componentes ou novas matérias-primas que resultem em produtos confiáveis e tecnologicamente limpos.

O gerenciamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia e produção de digerido como um produto valioso, como cita Lamorinara *et al.* (2021), também promovem benefícios econômicos e no estudo avaliado apresentado em duas vertentes: a produção de biogás e como resultado o uso para geração de energia elétrica na própria indústria e o adubo orgânico de qualidade que retorna aos cooperados. A redução de resíduos orgânicos destinados aos aterros sanitários reduz a emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Essa redução pode ser substituída por créditos de carbono, e comercializáveis nacional e internacionalmente.

Uma abordagem realizada por Bayr *et al.* (2012) sobre o tratamento de efluentes industriais indica que a co-digestão (digestão anaeróbia da mistura de dois

ou mais substratos com composições complementares) desses resíduos com outros materiais de baixo teor de nitrogênio e/ou lipídios é uma opção para aumentar os rendimentos de metano, por consequência o aumento do biogás e produção de bioenergia.

A circularidade dos materiais presente na economia circular, não só tornam os processos industriais mais sustentáveis, mas também aumentam a rentabilidade e a recuperação dos recursos através da regeneração das funções dos sistemas naturais. Para as empresas, esta é uma forma inteligente de reaproveitar os recursos existentes e ampliar suas oportunidades econômicas e sociais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do desenvolvimento desta pesquisa foi possível alcançar o objetivo geral deste estudo, mapear as oportunidades de circularidade do sistema de manufatura de um produto industrial em diferentes níveis e cenários, juntamente com os objetivos específicos propostos.

O primeiro objetivo específico buscou identificar as práticas de economia circular e metabolismo territorial no contexto de bioenergia na indústria por meio de uma revisão sistemática de literatura. Os estudos apontaram diversas atividades relacionadas à economia circular, sendo elas, predominante em países da Europa e Brasil. Já o metabolismo territorial tem um foco atuante na França através da integração de recursos territoriais e análise de fluxos. Referente ao contexto de bioenergia, as atividades são variadas, porém o Brasil se destaca nas publicações, com pesquisas e aplicações direcionadas à agroindústria.

Quanto aos dados dos fluxos integrados de materiais e energia na indústria, segundo objetivo específico, foram levantados por meio de projetos de pesquisa realizados com a organização parceira desta pesquisa e contatos diretos, obtendo dados de diversos produtos, suas atividades e desempenho ambiental referentes ao ano de 2020. Na sequência, esses dados foram organizados por processos existentes na organização em uma planilha para posteriormente serem inseridos na ferramenta ACW.

No terceiro objetivo específico, foram avaliados os resultados obtidos a partir de gráficos circulares, indicadores de circularidade por processos e níveis, em termos de materiais e energia. Foram inseridos na ferramenta ACW, primeiramente, os processos (processamento inicial, processamento, ETE, expedição, biodigestor da indústria, fábrica de subproduto, lagoa indústria, fábrica de ração 1, fábrica de ração 2, fábrica de ração 3, campo 1, campo 2, campo 3, campo 4, biodigestor campo, lagoa campo, unidade produtora animal 1, unidade produtora animal 2, unidade produtora animal 3, digestato, poço artesiano campo, poço artesiano fábrica de ração). Em seguida, adicionado as atividades dos fluxos (origem e destino) e a quantidade envolvida (ton/ano). E por último, o estabelecimento do nível (N1, N2, N3) ou limites do sistema.

Por fim, o quarto objetivo específico, apresentou e discutiu a circularidade do produto na indústria, através da circularidade (%) de cada processo nos três níveis. A

porcentagem de circularidade que cada nível obteve representou variações considerando o biodigestor da indústria ou biodigestor externo. No cenário 1, em que as análises envolveram o biodigestor da indústria, os resultados apresentaram porcentagens significativas, no N1 com 37,8%, N2 com 39,14% e o N3 com 89,42%. Já no cenário 2, quando os níveis foram avaliados considerando o biodigestor externo, o N1 não sofreu alteração, visto que o biodigestor já era externo a este nível, no N2 a circularidade diminuiu em 0,61% e o N3 apresentou uma redução de 2,05%, comparados ao cenário 1.

A porcentagem de circularidade no N3 cenário 1, demonstra-se importante no sentido de entrega e recebimento de materiais, internalizando fluxos econômicos e verticalizando negócios através de vantagens competitivas. Este nível de maior abrangência, que envolveu a Indústria, o Parque Industrial e as Cooperativas, pode-se identificar um aumento significativo de circularidade comparado com os níveis 1 e 2, ambos do cenário 1, em torno de 50%. Esse dado relevante destaca a importância da circularidade de materiais entre os processos pertencentes ao nível avaliado em que se forma uma rede de simbiose, evitando desperdícios de materiais, reduzindo custos de produção, agregando valor aos produtos e às indústrias, contribuindo para o desenvolvimento econômico territorial e atendendo as restrições ambientais.

Com relação a avaliação da circularidade em termos de energia, os resultados apontaram que a aplicação de energia elétrica de autogeração, proveniente da combustão do biogás extraído do biodigestor da própria indústria, é uma oportunidade para contribuir com o aumento da circularidade. A adoção de outras fontes de autogeração (fotovoltaica, eólica) também pode ampliar essa circularidade e a independência energética, oferecendo menos riscos às variações de mercado e insegurança energética. Destaca-se ainda, que a energia é uma estratégia considerada fundamental para a valorização de resíduos bem como, para os processos industriais.

Os fatores limitantes do estudo estão voltados à indisponibilidade de dados referentes à ETE em que não foram considerados aplicação de produtos químicos. Entretanto, devido à baixa representatividade em termos de massa não há impacto na representatividade final, mas pode ter influência em potenciais impactos ambientais. A impossibilidade de garantir o balanço de massa na esfera industrial, em especial, os itens que não são matérias primas diretas também foi um fator limitante.

Muitos fluxos totalizam e integram toda a cadeia, outro fator limitante, e este estudo não consegue chegar a um nível tão detalhado.

Relacionado à ferramenta, uma limitação foi a não possibilidade de calcular os fluxos em termos de emissões que poderiam ter sido contabilizadas com relação aos transportes com uso de diesel.

Como sugestões para trabalhos futuros, a partir do desenvolvimento desta dissertação, sugerem-se: calcular a circularidade do produto com a utilização de outras fontes de energia renovável no processo de manufatura; calcular a circularidade dos demais produtos fabricados pela indústria; e, complementar a avaliação com contabilização de fluxos de emissões.

REFERÊNCIAS

- ABEPRO (Associação Brasileira de Engenharia de Produção). **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção: Áreas da Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&s=1&c=362>>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- AGROCIRCLE WINS. **Um novo jeito de fomentar a economia circular e inovação em intercooperação agroindustrial**. 2021. Disponível em: <<https://agrocirclewins.com.br/>> Acesso em: 30 mar. 2021.
- ALLAIS, R.; REYES, T.; ROUCOULES, L. Inclusion of territorial resources in the product development process. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 94, p. 187-197, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.091>.
- ALLAIS, R.; GOBERT, J. Conceptual framework for spatio-temporal analysis of territorial projects. **Environmental Impact Assessment Review**, [S.L.], v. 77, p. 93-104, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2019.03.003>.
- ALFARO, J.; MILLER, S. Applying Industrial Symbiosis to Smallholder Farms. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 145-154, 25 nov. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12077>.
- AVDIUSHCHENKO, A.; ZAJĄC, P. Circular Economy Indicators as a Supporting Tool for European Regional Development Policies. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 3025-3047, 28 maio 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11113025>.
- BALAMAN, Ş. *et al.* Network design and technology management for waste to energy production: an integrated optimization framework under the principles of circular economy. **Energy**, [S.L.], v. 143, p. 911-933, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.058>.
- BARCELOS, S. M. B. D. *et al.* Circularity of Brazilian silk: promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 296, p. 113373, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113373>.

BARLES, S. L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés: l'apport de l'analyse des flux de matières. **Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie**, v. 5, n. 1, 2014.

BARROS, M. V. **Ferramenta para promover a economia circular em propriedades rurais**. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4283>. Acesso em: 27 mar. 2021.

BARROS, M. V. *et al.* Mapping of research lines on circular economy practices in agriculture: from waste to energy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 131, p. 109958, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109958>.

BAYR, S. *et al.* Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 104, p. 28-36, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.104>.

BENJAMIN, M. F. D.; TAN, R. R.; RAZON, L. F. A methodology for criticality analysis in integrated energy systems. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 935-946, 9 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-014-0846-0>.

BICHRAOUI, N.; GUILLAUME, B.; HALOG, A. Agent-based Modelling Simulation for the Development of an Industrial Symbiosis - Preliminary Results. **Procedia Environmental Sciences**, [S.L.], v. 17, p. 195-204, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.029>.

BSI 8001. **The rise of the circular economy**. The British Standards Institution. 2019. Disponível em: <<https://www.bsigroup.com/en-GB/standards/benefits-of-using-standards/becoming-more-sustainable-with-standards/BS8001-Circular-Economy/>>. Acesso em: 08 abr. 2021.

BUCLET, N.; DONSIMONI, M. Dossier « L'économie circulaire: modes de gouvernance et développement territorial » : métabolisme territorial et capacités ». **Natures Sciences Sociétés**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 118-130, abr. 2020. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/nss/2020035>.

BUTTURI, M.A. *et al.* Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: a literature review and a conceptual synthesis. **Applied Energy**, [S.L.], v.

255, p. 113825-113841, dez. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113825>.

CANTZLER, J. *et al.* Saving resources and the climate? A systematic review of the circular economy and its mitigation potential. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, p. 123001, 2020.

CAYZER, S.; GRIFFITHS, P.; BEGHETTO, V. Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. **International Journal Of Sustainable Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 4-5, p. 289-298, 26 jun. 2017. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2017.1333543>.

CHIOCCHIO, I. *et al.* Plant Secondary Metabolites: An Opportunity for Circular Economy. **Molecules (Basel, Suíça)**. (2021, 18 de janeiro). NLM (Medline). <https://doi.org/10.3390/molecules26020495>

CLAUSER, N. M. *et al.* Biomass Waste as Sustainable Raw Material for Energy and Fuels. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 794-815, 15 jan. 2021. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/su13020794>.

CNI (Df). Confederação Nacional da Indústria. **CIRCULAR ECONOMY: opportunities and challenges for the brazilian industry / National Confederation of Industry**. – Brasília: CNI, 2018. 68 p.: il.

CURRIE, P. K.; MUSANGO, J. K.; MAY, N. D. Urban metabolism: a review with reference to cape town. **Cities**, [S.L.], v. 70, p. 91-110, out. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.06.005>.

CUSENZA, M. A. *et al.* Energy and environmental assessment of residual bio-wastes management strategies. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 285, p. 124815-124830, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124815>.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition. **Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK**, 2013.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. Circularity Indicators - An Approach to Measure Circularity. Methodology & Project Overview; **Ellen MacArthur Foundation (EMF): Cowes, UK**, 2015.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. Uma Economia Circular no Brasil: Uma Abordagem Exploratória Inicial; **Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK**, 2017.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. Resources: The tools to guide you through your Circulytics Journey; **Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK**, 2020. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circulytics-measuring-circularity/resources>>. Acesso em: 15 mai. de 2021.

FERRARI, A. M. *et al.* Dynamic life cycle assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and Enterprise resource planning (ERP) in an industry 4.0 environment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 286, p. 125314, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125314>.

FERREIRA, L.R.A. *et al.* Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 94, p. 440-455, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.

FIGGE, F. *et al.* Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 150, p. 297-306, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030>.

FONTANA, M. D.; BOAS, I.. The politics of the nexus in the city of Amsterdam. **Cities**, [S.L.], v. 95, p. 102388, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2019.102388>.

FORTUNATI, S.; MOREA, D.; MOSCONI, E. M. Circular economy and corporate social responsibility in the agricultural system: cases study of the italian agri-food industry. **Agricultural Economics (Zemědělská Ekonomika)**, [S.L.], v. 66, n. 11, p. 489-498, 27 nov. 2020. Czech Academy of Agricultural Sciences. <http://dx.doi.org/10.17221/343/2020-agricecon>.

FRACCASCIA, L. *et al.* Energy-based industrial symbiosis: a literature review for circular energy transition. **Environment, Development And Sustainability**, [S.L.], 30 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-020-00840-9>.

HAAS, W. *et al.* How Circular is the Global Economy?: an assessment of material flows, waste production, and recycling in the european union and the world in 2005. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 765-777, 13 mar. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12244>.

HENS, L.; BLOCK *et al.* On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 172, p. 3323-3333, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.082>.

HOLZER, D. *et al.* Mind the gap: towards a systematic circular economy encouragement of small and medium-sized companies. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 298, p. 126696, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126696>.

IABLONOVSKI, G.; BOGNON, S. Efficacité matérielle et performance écologique des territoires: analyse croisée de 67 métabolismes. **Flux**, [S.L.], v. 116-117, n. 2, p. 6-25, 2019. CAIRN. <http://dx.doi.org/10.3917/flux1.116.0006>.

JATO-ESPINO, D.; RUIZ-PUENTE, C. Fostering Circular Economy Through the Analysis of Existing Open Access Industrial Symbiosis Databases. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 952-976, 28 jan. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12030952>.

JUN, H.; XIANG, H. Development of Circular Economy Is A Fundamental Way to Achieve Agriculture Sustainable Development in China. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 5, p. 1530-1534, 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.262>.

LAMOLINARA, B. *et al.* Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. **Waste Management**, [S.L.], v. 140, p. 14-30, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>.

KARLSSON, M.; WOLF, A. Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 16, n. 14, p. 1536-1544, set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.08.017>.

KENNEDY, C.; CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. The Changing Metabolism of Cities. **Journal Of Industrial Ecology**. Massachusetts, p. 43-59. jul. 2007.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 127, p. 221-232, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

KLINE, K. L. *et al.* Reconciling food security and bioenergy: priorities for action. **Gcb Bioenergy**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 557-576, 14 jun. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12366>.

KOPPELMÄKI, K.; HELENIUS, J.; SCHULTE, R. P.O. Nested circularity in food systems: a nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 164, p. 105218, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105218>.

KRAVCHENKO, M.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A. To what extent do circular economy indicators capture sustainability? **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 90, p. 31-36, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.118>.

KUMAR, M. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of dairy processing industry: a case study of north india. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 326, p. 129331, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129331>.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2022.

LIMA, J. A. M. *et al.* Techno-economic and performance evaluation of energy production by anaerobic digestion in Brazil: bovine, swine and poultry slaughterhouse effluents. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 277, p. 123332, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123332>.

LIU, T. *et al.* Recent advances, current issues and future prospects of bioenergy production: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 810, p. 152181, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152181>.

MANCINI, L.; NUSS, P. Responsible Materials Management for a Resource-Efficient and Low-Carbon Society. **Resources**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 68-82, 5 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/resources9060068>.

MAJEED, M. T.; LUNI, T. (2020): Renewable energy, circular economy indicators and environmental quality: A global evidence of 131 countries with heterogeneous income groups, **Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)**, ISSN 2309-8619, Johar Education Society, Pakistan (JESPK), Lahore, Vol. 14, Iss. 4, pp. 866-912

MAROUŁEK, J. *et al.* Advances in nutrient management make it possible to accelerate biogas production and thus improve the economy of food waste processing. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [S.L.], p. 1-10, 10 jun. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2020.1776796>.

MARQUES, J. R. *Desperte seu poder*. Buzz Editora LTDA, 2018.

MARTINEZ-BURGOS, W. J. *et al.* Agro-industrial wastewater in a circular economy: characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 341, p. 125795, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125795>.

MOLINA-MORENO, V. *et al.* Design of Indicators of Circular Economy as Instruments for the Evaluation of Sustainability and Efficiency in Wastewater from Pig Farming Industry. **Water**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 653-653, 31 ago. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9090653>.

MORAGA, G. *et al.* Circular economy indicators: what do they measure?. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 146, p. 452-461, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>.

MORSELETTO, P. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 153, p. 104553-104565, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.

MURADIN, M.; KULCZYCKA, J. The Identification of Hotspots in the Bioenergy Production Chain. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 5757-5774, 3 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13215757>.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **Journal Of Business Ethics**, [S.L.], v. 140, n. 3, p. 369-380, 22 maio 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.

NAÇÕES UNIDAS. *World Population Prospects 2019*; United Nations: New York, NY, USA, 2019.

NAQVI, S. R. *et al.* Assessment of agro-industrial residues for bioenergy potential by investigating thermo-kinetic behavior in a slow pyrolysis process. **Fuel**, [S.L.], v. 278,

p. 118259-118267, out. 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118259>.

NIERO, M.; KALBAR, P. P. Coupling material circularity indicators and life cycle-based indicators: a proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 140, p. 305-312, jan. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>.

NOË, J. Le *et al.* La place du transport de denrées agricoles dans le cycle biogéochimique de l'azote en France: un aspect de la spécialisation des territoires. **Cahiers Agricultures**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 15004-15019, jan. 2016. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/cagri/2016002>.

OLIVEIRA, C. T.; DANTAS, T. E. T.; SOARES, S. R. Nano and micro level circular economy indicators: assisting decision-makers in circularity assessments. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 26, p. 455-468, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.024>.

ONU. **17 Metas para transformar o mundo**. 2015. Disponível em:
<<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>>. Acesso em: 12 abr. de 2021.

PIWOWAR, A. Agricultural Biogas—An Important Element in the Circular and Low-Carbon Development in Poland. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1733-1745, 5 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13071733>.

PPGEP (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção). **Área de concentração e Linhas de Pesquisa - Mestrado**. 2021. Disponível em:
<<http://www.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/stricto-sensu/ppgep-pg/ppgmodelo>>. Acesso em: 12 abr. de 2021.

PRIYADARSHINI, P.; ABHILASH, P. C. Circular economy practices within energy and waste management sectors of India: a meta-analysis. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 304, p. 123018-123029, maio 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123018>.

REN21. **RENEWABLES 2020**: global status report. Paris Renewables Now, 2020. 367 p..

RIDING, M. J. *et al.* Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: the case of soil conditioners from bioenergy. **Environment International**, [S.L.], v. 75, p. 52-67, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.025>.

ROCCHI, L. *et al.* Measuring circularity: an application of modified material circularity indicator to agricultural systems. **Agricultural And Food Economics**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-13, 8 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s40100-021-00182-8>.

RÖDER, M.; CHONG, K.; THORNLEY, P. The future of residue-based bioenergy for industrial use in Sub-Saharan Africa. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 159, p. 106385, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106385>. RODIAS, Efthymios *et al.* Water-Energy-Nutrients Synergies in the Agrifood Sector: A Circular Economy Framework. **Energies**, v. 14, n. 1, p. 159, 2021.

ROSSI, E. *et al.* Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: plastic, textile and electro-electronic cases. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 247, p. 119137, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137>.

SAIDANI, M. *et al.* How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. **Recycling**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 6, 3 mar. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling2010006>.

SAIDANI, M. *et al.* A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542-559, 2019.

SANTOS, V. E. N.; MAGRINI, A. Biorefining and industrial symbiosis: a proposal for regional development in brazil. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 177, p. 19-33, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.107>.

SANTAGATA, R. *et al.* Assessing the sustainability of urban eco-systems through Energy-based circular economy indicators. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 109, p. 105859, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105859>.

SCIENCE DIRECT. Acesso Cafe. 2021. Disponível em: <<http://bit.ly/2llecCj>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

SCOPUS. Acesso Cafe. 2021. Disponível em: <<http://bit.ly/2llecCj>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 35-62, 1 jan. 2019. IBEPES (Instituto Brasileiro de Estudos e Pesquisas Sociais). <http://dx.doi.org/10.21529/recadm.2019002>.

SILVA-MARTÍNEZ, R. D. *et al.* The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: challenges and opportunities. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 156, p. 509-525, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>.

SILVEIRA, S. *et al.* Opportunities for bioenergy in the Baltic Sea Region. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 128, p. 157-164, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.036>.

SOHN, J.; VEGA, G. C.; BIRKVED, M. A Methodology Concept for Territorial Metabolism – Life Cycle Assessment: challenges and opportunities in scaling from urban to territorial assessment. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 69, p. 89-93, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.10.005>.

SOUZA, G. M. *et al.* The role of bioenergy in a climate-changing world. **Environmental Development**, [S.L.], v. 23, p. 57-64, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2017.02.008>.

STOLARSKI, M. J. *et al.* Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 133, p. 110238-110257, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110238>.

SWILLING, M. *et al.* The weight of cities: Resource requirements of future urbanization. **IRP Reports**, 2018.

THEROND, O. *et al.* A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. **Agronomy For Sustainable Development**, [S.L.], v. 37, n. 3, jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>.

UNIDO (org.). **Industrial Development Report 2018**: demand for manufacturing: driving inclusive and sustainable industrial development.. Demand for Manufacturing: Driving Inclusive and Sustainable Industrial Development.. 2018. United Nations industrial Development Organization. Disponível em: <<https://www.unido.org/resources-publications-flagship-publications-industrial-development-report-series/industrial-development-report-2018>>. Acesso em: 01 jun. 2021.

VEGA, G. C. *et al.* Maximizing Environmental Impact Savings Potential Through Innovative Biorefinery Alternatives: an application of the tm-lca framework for regional scale impact assessment. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 14, p. 3836-3858, 13 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11143836>.

VEGA, G. C. *et al.* Assessing New Biotechnologies by Combining TEA and TM-LCA for an Efficient Use of Biomass Resources. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 3676-3711, 2 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12093676>.

VERGER, Y. *et al.* A N, P, C, and water flows metabolism study in a peri-urban territory in France: the case-study of the saclay plateau. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 137, p. 200-213, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.007>.

VILVERT, A. J. *et al.* Minimization of energy demand in slaughterhouses: estimated production of biogas generated from the effluent. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 120, p. 109613, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109613>.

WALKER, S. *et al.* Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 666, 1 mar. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10030666>.

WEB OF SCIENCE. Acesso Cafe. 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/303VmH5>> Acesso em: 30 mar. 2021.

WORLD-BANK. World Development Indicators: Structure of output. Disponível em: <<http://wdi.worldbank.org/table/4.2>> Acesso em: 23 jun. 2022.

WYSOKIŃSKA, Z. A Review of Transnational Regulations in Environmental Protection and the Circular Economy. **Comparative Economic Research. Central And Eastern Europe**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 149-168, 30 dez. 2020. Uniwersytet Lodzki (University of Lodz). <http://dx.doi.org/10.18778/1508-2008.23.32>.

ZAMBON, I. *et al*/ Rethinking Sustainability within the Viticulture Realities Integrating Economy, Landscape and Energy. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 320-333, 26 jan. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10020320>

ANEXO A - Modelo da planilha para a coleta de dados (BARROS, 2019)

Planilha para coleta de dados

NÍVEL					
Processo					
Descrição					
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados

APÊNDICE A - Composição Final dos Resultados da Coleta de Dados

INDÚSTRIA					
Processo	Processamento Inicial				
Descrição	Setor da Indústria que recebe matéria prima dos Campos				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Campo 1	Matéria prima		Resíduos		ETE
Campo 2	Matéria prima		Produto Reaproveitado		Fábrica de Subproduto
Campo 3	Matéria prima		Produto beneficiado		Processamento
Campo 4	Matéria prima		Produto comercializado		Comercialização
Fornecedor Externo	Produtos de Limpeza/ Desinfetante		Demais produtos		Outro Setor Indústria (Interno)
	Produtos tratamento de água				
	Gás carbônico				
	Madeira Caldeiras 1 e 2				
Distribuidora de Combustível	Diesel				
Fornecedor Externo	Gás				
Distribuidora de Combustível	Diesel C1/C2/C3/C4- Indústria	Diesel			

INDÚSTRIA					
Processo	Processamento				
Descrição	Condimentação e embalagem do produto				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/ Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Processamento Inicial	Produto Beneficiado	////	Produto 2F	////	Expedição
Companhia de Energia	Eletricidade	////	Descarte Produto	////	Fábrica de Subproduto
Captação Água	Água	////			
Água Reaproveitamento	Água	////			
Fornecedor Externo	Embalagem Produto 2F	////			
Fornecedor Externo	Condimentos	////			
	Produtos de Limpeza/ Desinfetante	////			
Distribuidora de Combustível	Diesel Embalagens/ Condimentos	Diesel ////			

INDÚSTRIA					
Processo	Expedição				
Descrição	Local final em que o Produto 2F é armazenado para ser distribuído ao varejo				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/ Energia	Especificação (ton/ano)	Material/ Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Companhia de Energia	Energia Armazenamento Transporte		Produto 2F + Embalagem Secundária		Varejo
Distribuidora de Combustível	Diesel				
Processamento	Produto 2F				
Fornecedor Externo	Embalagem secundária				

COOPERADOS					
Processo	Campo 1				
Descrição	Unidade de produção de matéria prima cooperada à Fábrica de Ração 1				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Poço artesiano	Água		Dejetos		Lagoa
Companhia de Energia	Eletricidade (KWh)		Dejetos		Biodigestor
Fábrica Ração 1	Produtos de Limpeza		Animal Morto		Lagoa
Fábrica Ração 1	Ração 1		Animal Morto		Biodigestor
Distribuidora de Combustível	Diesel Unidade 1/Fáb-Campo 1	Diesel	Matéria Prima		Processamento Inicial
Unidade Produtora Animal	Animal				

COOPERADOS					
Processo	Campo 2				
Descrição	Unidade de produção de matéria prima cooperada à Fábrica de Ração 2				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia (ton/ano)	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Poço artesiano	Água	////	Dejetos	////	Lagoa
Companhia de Energia	Eletricidade (KWh)	////	Dejetos	////	Biodigestor
Fábrica Ração 2	Produtos de Limpeza	////	Animal Morto	////	Lagoa
Fábrica Ração 2	Ração 2	////	Animal Morto	////	Biodigestor
Distribuidora de Combustível	Diesel Unidade 2/Fáb-Campo 2	Diesel	Matéria Prima	////	Processamento Inicial
Unidade Produtora Animal 2	Animal	////			

COOPERADOS					
Processo	Campo 3				
Descrição	Unidade de produção de matéria prima cooperada à Fábrica de Ração 3				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Poço artesiano	Água	////	Dejetos	////	Lagoa
Companhia de Energia	Eletricidade (KWh)	////	Animal Morto	////	Lagoa
Fábrica Ração 3	Produtos de Limpeza	////	Matéria Prima	////	Processamento Inicial
Fábrica Ração 3	Ração 3	////			
Distribuidora de Combustível	Diesel Unidade 3/Fáb-Campo 3	Diesel			
Unidade Produtora Animal 3	Animal	////			

COOPERADOS					
Processo	Campo 4				
Descrição	Unidade de produção de matéria prima externa				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação locação/massa (ton/ano)	Material/Energia	Especificação locação/massa (ton/ano)	Processos Cadastrados
Poço artesiano	Água		Dejetos		Lagoa
Companhia de Energia	Eletricidade (kWh)		Animal Morto		Lagoa
Fábrica Ração 1	Produtos de Limpeza		Matéria Prima		Processamento Inicial
Fábrica Ração 2					
Fábrica Ração 3					
Fábrica Ração 1	Ração				
Fábrica Ração 2					
Fábrica Ração 3					
Fábrica Ração Externa					
Distribuidora de Combustível	Diesel Unidades 1,2,3/Fáb-Campo 4	Diesel			
Unidade Produtora Animal 1,2,3	Animal				

PARQUE INDUSTRIAL					
Processo	Fábrica de Ração 1				
Descrição	Unidade de fabricação da ração e fornecedora de outros produtos para os Cooperados do Campo 1				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Fornecedor Externo	Gás	////	Ração 1	////	Campo 1
Poço Artesiano	Água	////			
Fornecedor Externo	Suplementos	////			
Indústria	Farinha de Subproduto/ Gordura	////			
Fornecedor Externo	Ingredientes	////			
Companhia de Energia	Eletricidade (kWh)	////			
Campo 1	Lenha	////			
Distribuidora de Combustível	diesel	////			

PARQUE INDUSTRIAL					
Processo	Fábrica de Ração 2				
Descrição	Unidade de fabricação da ração e fornecedora de outros produtos para os Cooperados do Campo 2				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Fornecedor Externo	Gás	////	Ração 2	////	Campo 2
Poço Artesiano	Água	////			
Companhia de Energia	Eletricidade (kWh)	////			
Campo 2	Lenha	////			
Fornecedor Externo	Ingredientes	////			
Distribuidora de Combustível	diesel	////			

PARQUE INDUSTRIAL					
Processo	Fábrica Ração 3				
Descrição	Unidade de fabricação da ração e fornecedora de outros produtos para os Cooperados do Campo 3				
ENTRADAS			SAÍDAS		
Processos Cadastrados	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Material/Energia	Especificação (ton/ano)	Processos Cadastrados
Campo 3	Lenha	////	Ração 3	////	Campo 3
Companhia de Energia	Eletricidade (kWh)	////			
Poço Artesiano	Água	////			
Distribuidora de Combustível	Diesel	////			
Fornecedor Externo	Ingredientes	////			
Fornecedor Externo	Produtos tratamento de água	////			

APÊNDICE B - Portfólio final de artigos descobertos na literatura

Quadro 1 - Características dos documentos encontrados na literatura

ID	Referência	Tipo	Área de Atuação	Instituição / País	Periódico / Editora	Citações (jun/22)	FI
1	Allais, Reyes e Roucoules (2015)	Estudo de Caso	Sustentabilidade Industrial e Territorial	Université de Technologie de Troyes / França	Journal of Cleaner Production / Elsevier	53	9,297
2	Allais e Gobert (2019)	Revisão	Inovação dos Sistemas	Apesa, Pôle de Coopération / França	Environmental Impact Assessment Review / Elsevier	7	4,549
3	Alfaro e Miller (2014)	Estudo de Caso	Simbiose Industrial	University of Michigan / Estados Unidos	Journal of Industrial Ecology / Wiley	63	6,946
4	Avdiushchenko e Zajac (2019)	Estudo de Caso	Desenvolvimento Regional	AGH University of Science and Technology / Polônia	Sustainability / MDPI	64	3,251
5	Bayr <i>et al.</i> (2012)	Estudo de Caso	Resíduos de Matadouros	University of Jyväskylä / Finlândia	Bioresource Technology / Elsevier	163	9,642
6	Balaman <i>et al.</i> (2018)	Estudo de Caso	Produção de energia com resíduos	Department of Industrial Engineering, Dokuz Eylül University / Reino Unido	Energy / Elsevier	45	7,145
7	Barcelos <i>et al.</i> (2021)	Estudo de Caso	Casulos de Seda / Circularidade	Universidade Estadual de Maringá / Brasil	Journal of Environmental Management / Elsevier	6	1,833
8	Barros <i>et al.</i> (2020)	Revisão	Resíduos Agrícolas / Bioenergia	Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) / Brasil	Renewable and Sustainable Energy Reviews / Elsevier	94	14,98
9	Benjamin, Tan e Razon	Estudo de Caso	Redes de Simbiose	De La Salle University / Filipinas	Clean Technologies And Environmental Policy / Springer	43	3,636
10	Buclet e Donsimoni (2020)	Estudo de Caso	Metabolismo Territorial	Aménagement et urbanisme, Université Grenoble-Alpes, CNRS, Sciences Po Grenoble, UMR Pacte, Grenoble / France	Natures Sciences Sociétés / EDP Sciences	1	-
11	Butturi <i>et al.</i> (2019)	Revisão	Sinergias Energéticas em Parques Eco-industriais	University of Modena and Reggio Emilia / Itália	Applied Energy / Elsevier	79	9,746
12	Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017)	Estudo de Caso	Desempenho do Produto	Universita Ca Foscari / Itália	International Journal of Sustainable Engineering / Taylor & Francis	136	-

ID	Referência	Tipo	Área de Atuação	Instituição / País	Periódico / Editora	Citações	FI
13	Chiocchio <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Resíduos Industriais	University of Bologna / Itália	Molecules / MDPI	31	4,411
14	Clouser <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Biocombustíveis e Produção de Energia e Fatores Ambientais	Programa de Celulosa y Papel / Argentina	Sustainability / MDPI	49	3,251
15	Currie, Musango e May (2017)	Estudo de Caso	Fluxos de Recursos	Stellenbosch University / África do Sul	Cities / Elsevier	48	5,835
16	Chen <i>et al.</i> (2020)	Revisão	Pegada de Energia / Ciclo de Vida	Sun Yat-sen University / China	Applied Energy / Elsevier	35	9,746
17	Cusenza <i>et al.</i> (2021)	Estudo de Caso	Biodigestor	University of Palermo / Itália	Journal of Cleaner Production / Elsevier	21	9,297
18	Ferrari <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	ACV / ICV	University of Modena and Reggio Emilia / Itália	Journal of Cleaner Production / Elsevier	46	9,297
19	Ferreira <i>et al.</i> (2018)	Revisão	Biogás	Itaipu Technological Park / Brasil	Renewable and Sustainable Energy Reviews / Elsevier	79	14,98
20	Figge <i>et al.</i> (2018)	Estudo de Caso	Circularidade de Recursos	Kedge Business School / França	Ecological Economics / Elsevier	130	5,389
21	Fontana e Boas (2019)	Estudo de Caso	Nexo	Wageningen University & Research / Holanda	Cities / Elsevier	10	5,835
22	Fortunati, Morea e Mosconi (2020)	Estudo de Caso	Indústria Agroalimentar	University of Tuscia, Viterbo / Itália	Agricultural Economics / Caas	34	5,072
23	Fraccascia <i>et al.</i> (2020)	Revisão	Simbiose Industrial	Sapienza University of Rome / Itália	Environment, Development and Sustainability / Springer	15	3,326
24	Haas <i>et al.</i> (2015)	Estudo de Caso	Fluxos de materiais	Institute of Social Ecology / Áustria	Journal of Industrial Ecology / Wiley	920	6,946
25	Hens <i>et al.</i> (2018)	Revisão	Produção Mais Limpa	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek / Bélgica	Journal of Cleaner Production / Elsevier	184	9,297
26	Holzer <i>et al.</i> (2021)	Estudo de Caso	Eficiência de Recursos	University of Graz / Áustria	Journal of Cleaner Production / Elsevier	25	9,297
27	Iablonovski e Bognon (2019)	Revisão	Ecologia Territorial	Université Paris Dauphine / França	Flux / Cairn.Info	4	-
28	Jato-Espino e Ruiz-Puente (2020)	Revisão	Industrial	University of Cantabria / Espanha	Sustainability / MDPI	7	3,251

ID	Referência	Tipo	Área de Atuação	Instituição / País	Periódico / Editora	Citações	FI
29	Jun e Xiang (2011)	Revisão	Agrícola	Huaqiao University / China	Energy Procedia / Elsevier	99	-
30	Lamolinará <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Industrial / Gestão de Resíduos	Polytechnic of Leiria / Portugal	Waste Management / Elsevier	7	7,145
31	Kennedy, Cuddihy e Engel-Yan (2007)	Estudo de Caso	Análise de Fluxos de Materiais	University of Toronto / Canadá	Journal of Industrial Ecology / Wiley	1507	6,946
32	Kirchherr, Reike e Hekkert (2017)	Revisão	Desenvolvimento sustentável	Utrecht University / Holanda	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	58	10,2
33	Kline <i>et al.</i> (2016)	Revisão	Bioenergia / Segurança Alimentar	Department of Energy / Estados Unidos	Bioenergy / Wiley	162	2,804
34	Koppelmaki, Helenius e Schulte (2021)	Estudo de Caso	Agrícola	Wageningen University & Research / Finlândia	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	32	10,2
35	Kravchenko, Mcalooone e Pigosso (2020)	Estudo de Caso	Fábrica	Technical University of Denmark / Dinamarca	Procedia CIRP / Elsevier	19	-
36	Kumar <i>et al.</i> (2021)	Estudo de Caso	Indústria de Laticínios / ACV	National Institute of Technology Patna / Índia	Journal of Cleaner Production / Elsevier	3	9,297
37	Lima <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Biogás / Efluentes de Matadouros	Dom Bosco Catholic University / Brasil	Journal of Cleaner Production / Elsevier	5	9,297
38	Liu <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Bioenergia / Biomassa	Xi'an Jiaotong-Liverpool University / China	Science of The Total Environment / Elsevier	6	7,963
39	Martinez-Burgos <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Efluentes Agorindustriais	Centro Politécnico, Curitiba Paraná, Brasil	Bioresource Technology / Elsevier	7	9,642
40	Maroulek (2020)	Estudo de Caso	Biogás	Instituto de Tecnologia e Negócios em České Budějovice / República Tcheca	Energy Sources / Taylor&Francis	75	3,205
41	Mancini e Nuss (2020)	Revisão	Oferta de Materiais	European Commission / Itália	Resources / MDPI	7	-
42	Meng <i>et al.</i> (2019)	Revisão	Nexos	Dongguan University of Technology / China	Energy / Elsevier	80	7,145
43	Molina-Moreno <i>et al.</i> (2017)	Estudo de Caso	Biogás	University of Granada / Espanha	Water / MDPI	66	3,103

ID	Referência	Tipo	Área de Atuação	Instituição / País	Periódico / Editora	Citações	FI
44	Moraga <i>et al.</i> (2019)	Estudo de Caso	Indicadores - Preservação de Materiais	Ghent University / Bélgica	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	490	10,2
45	Morseletto (2020)	Revisão	Eficiência de Recursos	VU University Amsterdam / Holanda	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	412	10,2
46	Muradin e Kulczycka (2020)	Estudo de Caso	ACV / Bioenergia	Poznan University of Economics and Business / Polônia	Energies / MPDI	4	3,004
47	Murray e Haynes (2015)	Revisão	Sustentabilidade de Negócios e Política	Winchester Business School / Reino Unido	Journal of Business Ethics / Springer	2144	6,403
48	Naqvi <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Resíduo Agroindustrial / Bioenergia	National University of Sciences and Technology / Paquistão	Fuel / Elsevier	42	6,609
49	Niero e Kalbar (2019)	Estudo de Caso	Indicadores de Circularidade / Indústria	Aalborg University / Dinamarca	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	128	10,2
50	Noe <i>et al.</i> (2016)	Estudo de Caso	Agrícola	Fédération Île-de-France de Recherche sur l'Environnement / França	Cahiers Agricultures / EDP Sciences	31	--
51	Oliveira, Dantas e Soares (2020)	Revisão	Indicadores de Circularidade / Escalas	Federal University of Santa Catarina (UFSC) / Brasil	Sustainable Production and Consumption / Elsevier	47	5,032
52	Piwowar (2020)	Estudo de Caso	Agrícola / Biogás	Wroclaw University of Economics and Business / Polônia	Energies / MPDI	18	3,004
53	Priyadarshini e Abhilash (2020)	Estudo de Caso	Política / Circularidade Municipal	Banaras Hindu University, / Índia	Bioresource Technology / Elsevier	82	9,642
54	Riding <i>et al.</i> (2015)	Estudo de Caso	Bioenergia / Fluxos de Resíduos	Lancaster University / Reino Unido	Environment International / Elsevier	63	9,621
55	Rossi <i>et al.</i> (2019)	Estudo de Caso	Indicadores de Circularidade / Indústria	São Carlos School of Engineering / Brasil	Journal of Cleaner Production / Elsevier	108	9,297
56	Saidani <i>et al.</i> (2017)	Estudo de Caso	Circularidade de Produto / Indústria	Université Paris-Saclay / França	Recycling / MDPI	182	-
57	Saidani <i>et al.</i> (2019)	Estudo de Caso	Indicadores de Circularidade / Indústria	Université Paris-Saclay / França	Journal of Cleaner Production / Elsevier	488	9,297

ID	Referência	Tipo	Área de Atuação	Instituição / País	Periódico / Editora	Citações	FI
58	Santos e Magrini (2017)	Estudo de Caso	Simbiose Industrial / Análise de Fluxos de Materiais	Universidade Federal do Rio de Janeiro / Brasil	Journal of Cleaner Production / Elsevier	39	9,297
59	Santagata <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Indicadores de Circularidade	Parthenope University of Napoli / Itália	Ecological Indicators / Elsevier	49	4,958
60	Silva Martínez (2020)	Revisão	Resíduos Orgânicos / Bioenergia	University of São Paulo, Institute of Energy and Environment / Brasil	Renewable Energy / Elsevier	28	8,001
61	Silveira <i>et al.</i> (2017)	Revisão	Bioenergia / Sinergias	KTH Royal Institute of Technology / Suécia	Energy Procedia / Elsevier	21	-
62	Sohn, Veja e Birkved (2017)	Revisão	Metabolismo Territorial / Sistemas de Produção duráveis	Technical University of Denmark / Dinamarca	Procedia CIRP / Elsevier	9	-
63	Souza <i>et al.</i> (2017)	Revisão	Biomassa / Bioenergia	Universidade de São Paulo / Brasil	Environmental Development / Elsevier	122	3,326
64	Stolarski <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Energia Renovável	University of Warmia and Mazury in Olsztyn / Polônia	Renewable and Sustainable Energy Reviews / Elsevier	24	14,98
65	Therond <i>et al.</i> (2017)	Revisão	Agrícola	UMR Agronomie, AgroParisTech / França	Agronomy For Sustainable Development / Springer	236	5,832
66	Vega <i>et al.</i> (2019)	Estudo de Caso	Metabolismo Territorial / ACV	Technical University of Denmark / Dinamarca	Sustainability / MDPI	10	3,251
67	Vega <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Avaliação / Biogás	Technical University of Denmark / Dinamarca	Sustainability / MDPI	2	3,251
68	Verger <i>et al.</i> (2018)	Estudo de Caso	Metabolismo Territorial	Université Paris-Saclay / França	Resources, Conservation and Recycling / Elsevier	21	10,2
69	Vilvert <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso	Indústria / Águas Residuais	Federal University of Paraná / Brasil	Renewable and Sustainable Energy Reviews / Elsevier	14	14,98
70	Wysiklnska (2020)	Revisão	Regulamentos / Proteção Ambiental	University of Lodz / Polônia	Comparative Economic Research / Central and Eastern Europe	3	-
71	Zambon <i>et al.</i> (2018)	Estudo de Caso	Vitivinícola / Biomassa	Tuscia University / Itália	Sustainability / MDPI	50	3,251